

MANUALE PER IL CALCOLO DI TRASFORMATORI

Giunchi Fabrizio

Introduzione.....	7
Che cosa è un trasformatore	7
Induzione Magnetica.....	7
Frequenza.....	8
Coefficiente di Dimensionamento K_d	8
Lamierino Ferromagnetico.....	9
Coefficiente di Stipamento K_s	9
Spessore del pacco lamellare e Superficie del pacco lamellare.....	9
Rendimento e Caduta di Tensione %	10
Densità di Corrente.....	11
Ingombro dell'Avvolgimento.....	11
Coefficiente di Ingombro K_i	12
Avvolgimenti Collegati in Serie oppure Isolati fra loro	12
Avvolgimenti Collegati in Serie con più carichi collegati contemporaneamente.....	12
Come Avvolgere il Trasformatore	13
Avvolgimenti in Bifilare, Trifilare, Quadrifilare, ecc.....	14
Identificazione di un trasformatore.....	15
Esempio di Identificazione di un Trasformatore	18
Raddrizzatori per Trasformatore Monofase.....	20
Raddrizzatore monofase a Semionda, Esempio con Diodi al Silicio.....	24
Raddrizzatore monofase a Doppia Semionda, Esempio con Diodi al Silicio	24
Raddrizzatore monofase a Ponte di Graetz, Esempio con Diodi al Silicio.....	24
Raddrizzatore monofase a Semionda, Esempio con Diodi a Vuoto	25
Raddrizzatore monofase a Doppia Semionda, Esempio con Diodi a Vuoto	25
Raddrizzatore monofase a Ponte di Graetz, Esempio con Diodi a Vuoto.....	26
Raddrizzatore monofase a Ponte di Graetz Ibrido, Esempio con Diodi al Silicio e Diodi a Vuoto	26
Raddrizzatore monofase a Duplicatore di Tensione, Esempio con Diodi al Silicio	27
Dimensionamento del Filtro di Livellamento a Condensatore.....	28
Dimensionamento dei Diodi del Raddrizzatore.....	31
Simulazione pratica della tensione continua sul carico	40
Dimensionamento di un Trasformatore Monofase.....	43
Elementi da prefissare.....	43
Formato Lamierino.....	43
Sezione del Nucleo	43
Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro.....	44
Numero Spire.....	44
Corrente primario e secondario.....	44
Diametro dei Conduttori.....	45
Lunghezza Filo Avvolgimento e Peso del Rame.....	45
Resistenza degli avvolgimenti.....	45
Perdite nel Rame	45
Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento.....	45
Controllo Ingombri	46
Verifica controllo, rendimento e caduta di tensione	46
Dimensionamento di un AutoTrasformatore Monofase	48
Fattore di Riduzione K_r	48
Considerazioni teoriche sull'Autotrasformatore	49
Considerazioni teoriche sull'Autotrasformatore Multipresa	51
Vantaggi dell' Autotrasformatore.....	53
Svantaggi dell' Autotrasformatore.....	53
Esempio pratico di Autotrasformatore Monofase	55

Elementi da prefissare.....	55
Potenze dell'Autotrasformatore.....	55
Formato Lamierino.....	55
Sezione del Nucleo.....	55
Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro.....	56
Numero Spire.....	56
Corrente primario e secondario.....	56
Diametro dei Conduttori.....	57
Lunghezza Filo Avvolgimento e Peso del Rame.....	57
Resistenza degli avvolgimenti.....	57
Perdite nel Rame.....	57
Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento.....	58
Controllo Ingombri.....	58
Verifica controllo, rendimento e caduta di tensione.....	58
Esempio pratico di Autotrasformatore Monofase Multipresa.....	60
Elementi da prefissare.....	60
Potenze dell'Autotrasformatore.....	60
Formato Lamierino.....	61
Sezione del Nucleo.....	62
Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro.....	62
Numero Spire.....	62
Diametro dei Conduttori.....	63
Lunghezza Filo Avvolgimento e Peso del Rame.....	63
Resistenza degli avvolgimenti.....	63
Perdite nel Rame.....	63
Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento.....	64
Controllo Ingombri.....	64
Verifica controllo, rendimento e caduta di tensione.....	65
Introduzione al Trasformatore Trifase in Aria.....	66
Tipi di collegamenti.....	66
Scelta dei collegamenti.....	67
Spostamento di fase.....	68
Tabella Spostamento di Fase dei Principali Gruppi.....	69
Considerazioni fra Parametri di Linea, di Fase e di Avvolgimento.....	70
Avvolgimento a Triangolo.....	71
Avvolgimento a Stella.....	72
Avvolgimento a Zig-Zag.....	73
Avvolgimento Bifase.....	74
Analisi di un Trasformatore Tri-Bifase 380V/150V.....	75
Avvolgimento Esafase a Doppia Stella.....	76
Avvolgimento Esafase a Zig-Zag.....	77
Dimensionamento di un Trasformatore Trifase in aria.....	78
Elementi da prefissare.....	78
Calcolo della Potenza Totale secondario.....	78
Parametri di Singolo Avvolgimento Secondario.....	79
Parametri di Singolo Avvolgimento Primario.....	79
Formato Lamierino.....	80
Sezione del Nucleo Ferromagnetico di una colonna.....	80
Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro.....	80
Numero Spire.....	81
Diametro dei Conduttori.....	81
Lunghezza filo avvolgimento e peso del rame.....	81

Resistenza degli avvolgimenti.....	82
Perdite nel Rame	82
Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento.....	82
Controllo Ingombri	82
Verifica controllo, rendimento e caduta di tensione	83
Dimensionamento di un AutoTrasformatore Trifase in aria	84
Spostamento di fase dell'autotrasformatore trifase	84
Elementi da prefissare.....	85
Calcolo della Potenza Totale secondario.....	85
Parametri di Singolo Avvolgimento Secondario.....	85
Parametri di Singolo Avvolgimento Primario.....	85
Corrente primario e secondario.....	85
Potenze dell'Autotrasformatore.....	85
Formato Lamierino.....	86
Sezione del Nucleo Ferromagnetico di una colonna	86
Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro.....	86
Numero Spire.....	87
Diametro dei Conduttori.....	87
Lunghezza filo avvolgimento e peso del rame	87
Resistenza degli avvolgimenti.....	88
Perdite nel Rame	88
Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento.....	88
Controllo Ingombri	88
Verifica controllo, rendimento e caduta di tensione	89
Introduzione al Trasformatore di Uscita per Amplificatore Valvolare	90
Generalità sul trasformatore di uscita.....	90
La qualità del trasformatore d'uscita.....	90
Caratteristiche di un buon trasformatore di uscita.....	91
Distorsioni sui trasformatori di uscita	92
Materiali ferro-magnetici	92
Intensità di campo magnetico.....	92
Induzione Magnetica.....	92
Permeabilità Magnetica.....	93
Trasformatori di Uscita collegati in Serie	93
Trasformatori di Uscita collegati in Parallelo.....	93
Trasformatori di Uscita collegati in Serie e in Parallelo.....	94
Esempi di Trasformatori di Uscita collegati in Serie e in Parallelo per SE	95
Esempi di Trasformatori di Uscita collegati in Serie e in Parallelo per PP.....	96
Valvole finali collegate in parallelo	97
Trasformatori HI-FI.....	98
Trasformatore di Uscita Asimmetrico (Single-Ended SE).....	98
Trasformatore di Uscita Simmetrico (Push-Pull PP).....	98
Come avvolgere il trasformatore di uscita Asimmetrico Single-Ended	99
Come avvolgere il trasformatore di uscita Simmetrico Push-Pull.....	99
Qualche consiglio utile per un buon Trasformatore:	100
Ottimizzazione dell' Avvolgimento per migliori prestazioni.....	101
Esempio Pratico per Avvolgimenti con poche spire (in un solo strato):.....	102
Esempio Pratico per Avvolgimenti con medio numero di spire:	102
Esempio Pratico per Avvolgimenti con molte spire:.....	102
Trasformatori di Uscita con Avvolgimenti Secondari Multipli	103
Tabella Configurazioni Avvolgimenti Secondari	104
Configurazione N.....	105

Configurazione A.....	106
Configurazione B.....	107
Configurazione C.....	108
Configurazione D.....	109
Configurazione E (solo per Single-Ended).....	110
Configurazione F (solo per Push-Pull).....	111
Configurazione G.....	112
Configurazione H.....	113
Dimensionamento di un Trasformatore di Uscita Single.Ended.....	114
Elementi da prefissare.....	114
Calcolo dei Parametri di Base.....	114
Diametro dei Conduttori.....	114
Formato Lamierino.....	115
Sezione del Nucleo.....	115
Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro.....	115
Numero Spire.....	116
Spessore del Traferro.....	116
Induttanza del Primario.....	116
Lunghezza filo avvolgimento e peso del rame.....	116
Resistenza degli avvolgimenti.....	116
Perdite nel Rame.....	117
Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento.....	117
Controllo Ingombri.....	117
Dimensionamento di un Trasformatore di Uscita Push-Pull.....	119
Elementi da prefissare.....	119
Calcolo dei Parametri di Base.....	119
Diametro dei Conduttori.....	119
Formato Lamierino.....	120
Sezione del Nucleo.....	120
Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro.....	120
Numero Spire.....	121
Induttanza del Primario.....	121
Lunghezza filo avvolgimento e peso del rame.....	121
Resistenza degli avvolgimenti.....	121
Perdite nel Rame.....	122
Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento.....	122
Controllo Ingombri.....	122
Dimensionamento di un Trasformatore di Uscita Push-Pull configurazione D.....	124
Elementi da prefissare.....	124
Calcolo dei Parametri di Base.....	124
Diametro dei Conduttori.....	125
Formato Lamierino.....	125
Sezione del Nucleo.....	125
Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro.....	125
Numero Spire.....	126
Avvolgimenti Parziali.....	126
Altri Parametri degli Avvolgimenti Parziali.....	127
Induttanza del Primario.....	128
Lunghezza filo avvolgimento e peso del rame.....	128
Resistenza degli avvolgimenti.....	128
Perdite nel Rame.....	128
Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento.....	129

Controllo Ingombri	129
Tabella Lamierino Tipo EI Standard (MO) Monofase	131
Tabella Lamierino Tipo EI DILDA (MO) Monofase.....	131
Tabella Lamierino Tipo EI Allungato (MA) Monofase.....	132
Tabella Lamierino Tipo UI Monofase a 2 Colonne.....	132
Tabella Lamierino Tipo EI Quadro (TQ) Trifase.....	133
Tabella Lamierino Tipo EI Standard Trifase.....	133
Tabella Lamierino Tipo EI Allungato Trifase.....	134
Rocchetti per Avvolgimenti dei Trasformatori.....	135
Tabella dei Rocchetti Plastici più comuni per Trasformatori con nucleo a Mantello.....	136
Tabella dei Rocchetti Plastici più comuni per Trasformatori con nuclei C a un rocchetto.....	139
Tabella dei Rocchetti Plastici più comuni per Trasformatori con nuclei C a due rocchetti	139
Tabella dei Rocchetti Plastici più comuni per Trasformatori con nucleo Trifase	140
Tabella Filo Rame Smaltato per Avvolgimenti di Trasformatori	143
Grafico Coefficiente di Riempimento Kf	144

Introduzione

Dopo aver letto questa guida chiunque sarà in grado dimensionarsi ed auto-costruirsi qualsiasi tipo di trasformatore con le caratteristiche richieste dai vari circuiti elettrici in cui sarà impiegato. Avendo a disposizione dei vecchi trasformatori inutilizzati o bruciati avrete la possibilità di riutilizzarli superando così le eventuali difficoltà che potete incontrare nel tentativo di reperirli in commercio. Questa guida vi aiuterà a superare gli scogli che incontrerete nella progettazione e nella costruzione di trasformatori, quindi alla fine sarà facile determinare il numero delle spire, il diametro del filo, le dimensioni del nucleo ferromagnetico, la potenza impiegata, le condizioni di lavoro e l'ingombro degli avvolgimenti per verificare se saranno contenuti nelle finestre dei lamierini.

Che cosa è un trasformatore

Il trasformatore è una macchina elettrica che trasferisce da un circuito elettrico ad un altro circuito anch'esso elettrico energia elettrica sotto forma di corrente alternata. Lo scopo principale dei trasformatori è di modificare i parametri che definiscono la potenza. La potenza elettrica si esprime come il prodotto dei due fattori tensione e corrente (considerando $\cos\varphi = 1$) e viene misurata in Volt-ampere (VA). In generale, data una potenza, se si aumenta la tensione diminuisce la corrente, e viceversa. Il trasformatore ha la funzione di mutare il valore di questi due parametri consentendo quindi di adattarli alle necessità del trasporto, della distribuzione, della utilizzazione dell'energia elettrica, come pure di alimentare macchine o apparecchi elettrici previsti per una tensione diversa da quella di rete.

Il trasformatore non può assolutamente funzionare in corrente continua, infatti, esso si basa sui fenomeni dell'induzione elettromagnetica e avendo gli avvolgimenti fissi, è necessario che vi sia una variazione di flusso per indurre una 'forza elettromotrice indotta' (f.e.m.) negli avvolgimenti. Per questo il trasformatore è una macchina funzionante esclusivamente in corrente alternata.

Le tensioni, le correnti, il numero di spire, l'impedenza, ecc... del primario e del secondario sono in stretto rapporto fra loro tale che:

$$K = \frac{V1}{V2} = \frac{I2}{I1} = \frac{N1}{N2} = \sqrt{\frac{Z1}{Z2}}$$

Questo coefficiente K è un numero che si definisce "Rapporto di Trasformazione", ed è sempre valido per qualsiasi tipo di trasformatore.

Induzione Magnetica

Il corrispondente della corrente nel caso magnetico è il *flusso*, che si potrebbe definire come il *magnetismo* che *passa* attraverso un certo circuito. Il flusso si può piuttosto pensare che stia rappresentando l'entità della deformazione prodotta all'interno di un corpo sottoposto al campo magnetico, ossia la percentuale di atomi che per effetto del magnetismo hanno dovuto orientare le orbite dei loro elettroni nel senso delle linee di forza. Il *flusso magnetico* si misura in weber (Wb) ed il flusso che attraversa una sezione unitaria del campo, viene chiamata *induzione magnetica* B che si misura in weber/metro quadrato (Wb/m^2), ma si può misurare anche in Tesla (T) oppure su vecchi libri in Gauss (Gs) secondo la relazione che segue:

$$1\text{Wb/m}^2 = 1\text{Tesla} = 10000\text{Gauss}$$

- Questo parametro dipende dal rendimento, dalla corrente a vuoto desiderata e dalle condizioni di raffreddamento del nucleo. Come dato di primo orientamento potremo dire che in genere ogni tipo di lamierino ha un suo 'range' di induzione alla quale può funzionare che dipende dal tipo di materiale (ferro, ferro-silicio, grani orientati ecc.).
- Normalmente i più usati sono: lamierini normali che permettono un'induzione da $B=0.6 \text{ Wb/m}^2$ ad un massimo di $B=1.4 \text{ Wb/m}^2$; lamierini al silicio che permettono un'induzione da $B=0.6 \text{ Wb/m}^2$ ad un massimo di $B=1.8 \text{ Wb/m}^2$. In genere nei calcoli se non si conoscono bene le caratteristiche del materiale magnetico, si assume un valore d'induzione pari a $B=1 \text{ Wb/m}^2$.

- Il valore massimo dell'induzione a cui si fanno lavorare i trasformatori, con potenza totale secondaria fino a 50 Watt è di $B=1,4 \text{ Wb/m}^2$, che va diminuita sino a $B=1 \text{ Wb/m}^2$ per trasformatori di 300 Watt.
- Quando occorre ridurre il campo disperso attorno ad un trasformatore, come negli oscilloscopi o nei preamplificatori, oltre ai normali accorgimenti costruttivi, come lamiera di rame intorno a tutto il trasformatore, schermatura fornita da calotte in ferro ad alta permeabilità, orientamento fisico del trasformatore nel luogo in cui viene installato, si consiglia una bassa induzione, ad esempio $B=0,7 \text{ Wb/m}^2$.
- La corrente assorbita a vuoto da un trasformatore è detta corrente di magnetizzazione, tale corrente deve essere di ampiezza limitata per non avere un riscaldamento eccessivo dell'avvolgimento primario: al massimo può avere un valore di un quarto della corrente totale assorbita a pieno carico. Se risulta di un valore maggiore è necessario aumentare la sezione del ferro o il numero delle spire degli avvolgimenti, per far lavorare il ferro con una minore induzione.
- Per ottenere un trasformatore di dimensioni ridotte si fa lavorare il ferro con la massima densità di flusso possibile (induzione molto elevata): a queste condizioni corrisponde una corrente di magnetizzazione che può avere una intensità quasi uguale a quella richiesta dal primario del trasformatore per il carico impostogli, con conseguente riscaldamento e vibrazioni eccessive. Questa condizione può essere accettabile se il trasformatore è destinato a lavorare per tempi brevi o in condizione di ventilazione forzata e gli avvolgimenti sono realizzati con isolamento adeguato sia per i conduttori sia fra gli strati, di materiali adatti a lavorare a temperature elevate (esempio saldatrice elettrica).

Attenzione quindi alla scelta dell'*induzione magnetica*, perché il suo valore definisce *il tipo di lavoro* del trasformatore :

- Se si sceglie un Induzione Bassa si ottiene un trasformatore con alto numero di spire, con una bassa forza elettromotrice indotta (f.e.m.i.) in una spira, con una bassa corrente di magnetizzazione, quindi idoneo ad un servizio continuo.
- Se si sceglie un Induzione Alta si ottiene un trasformatore con basso numero di spire, con una alta forza elettromotrice indotta (f.e.m.i.) in una spira, con una alta corrente di magnetizzazione, quindi idoneo ad un servizio limitato.

Bisogna anche tenere conto che le perdite nel ferro (aumento di calore dei lamierini) aumentano approssimativamente con il quadrato dell'induzione.

La scelta del valore di induzione magnetica dipende quindi dal rendimento, dalla corrente a vuoto desiderata e dalle condizioni di raffreddamento del nucleo ferromagnetico. In pratica si definisce $B=0,7 \approx 0,9 \text{ Wb/m}^2$ per trasformatori con potenza da $10 \approx 100 \text{ VA}$ oppure per tutti i trasformatori con funzionamento continuo. Mentre si può assumere valori di $B=0,9 \approx 1,2 \text{ Wb/m}^2$ per trasformatori con potenza superiore ai 100 VA .

Frekuensi

Rappresenta l'andamento della tensione e corrente alternata nel tempo. La tensione di rete che tutti abbiamo in casa ha una frequenza di 50Hz, in america 60Hz. Questo numero indica quante volte in un secondo la tensione o la corrente riproducono una forma d'onda completa.

Coefficiente di Dimensionamento Kd

Nel determinare la sezione del nucleo ferromagnetico (S_{fe}) si moltiplica la radice della potenza per un *coefficiente Kd* che può essere scelto a piacere fra i valori:

- da 1 a 1,6 utilizzando un lamierino a mantello.
- da 0,7 a 1,2 utilizzando un lamierino a 2 colonne.

Questo parametro permette di scegliere se si vuole abbondare nel rame (valore di Kd basso) oppure se si vuole abbondare nel ferro (valore di Kd alto).

- Se si sceglie un coefficiente Kd Basso si ottiene un trasformatore di dimensioni ridotte, con alto numero di spire, con una bassa f.e.m.i. in una spira, con una bassa corrente di magnetizzazione. Se si associa anche una bassa induzione si ottiene un trasformatore idoneo ad un servizio continuo.

- Se si sceglie un coefficiente K_d Alto si ottiene un trasformatore di grosse dimensioni, con basso numero di spire, con una alta f.e.m.i. in una spira, con una alta corrente di magnetizzazione. Se si associa anche una alta induzione si ottiene un trasformatore idoneo ad un servizio limitato. Scegliendo un coefficiente K_d prossimo ad 1,3 possiamo notare che lo spessore del pacco di lamierini (S_p) sarà un valore prossimo al valore della colonna centrale (C), questo ovviamente sempre nel limite del possibile, così da ottenere un nucleo ferromagnetico ottimale a forma quadrata. La ragione è alquanto semplice se si pensa che a parità di superficie il quadrato è la forma geometrica che ha minor perimetro. Le spire per tanto risulteranno più corte e quindi minori perdite per effetto joule e anche le linee di forza del flusso magnetico saranno più omogenee

Lamierino Ferromagnetico

Volendo costruire un trasformatore è necessario, come prima cosa, stabilire quanti watt si possono prelevare dal trasformatore in nostro possesso da ricostruire, ovvero bisognerà conoscere tutte le dimensioni del lamierino, in particolare le quote della colonna centrale (C); della finestra ($E - F$); e lo spessore del pacco (S_p).

I lamierini adoperati nelle costruzioni dei trasformatori hanno normalmente forma di E ed I affacciati. Le varie parti del lamierino sono dimensionate in modo da eliminare ogni perdita di materiale durante la tranciatura. Tali lamierini sono stati unificati dal Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI-UNEL).

Identificare il lamierino misurando le quote in millimetri (mm) con un righello o calibro e facendo riferimento alle tabelle di fine pagina. Verificare se rientra nei formati unificati, oppure se si tratta di un lamierino diverso considerato FUORI STANDARD.

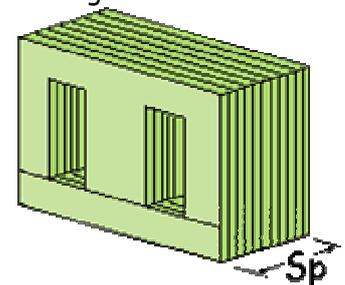
Un parametro caratteristico del lamierino ferromagnetico è la cifra di perdita ws definita in W/kg che rappresenta la bontà della lega con la quale è realizzato per cercare di ridurre le perdite nel ferro. Di solito il valore di cifra di perdita del lamierino rientra in un campo da 1,5 a 4 W/kg.

Coefficiente di Stipamento K_s

La sezione del nucleo ferromagnetico S_{fe} si dice netta perché non è complessiva dell'isolamento del lamierino, parametro definito dal coefficiente di stipamento K_s . Questo coefficiente può assumere valori fra 1.05 e 1.15 tutto dipende dal tipo di isolamento del lamierino, dal tipo di spessore del lamierino (0,35-0.5 mm), e dalla cura con cui l'operatore esegue il montaggio dei lamierini nel rocchetto. Per il coefficiente di stipamento K_s si assume il valore fisso di $K_s=1.11$.

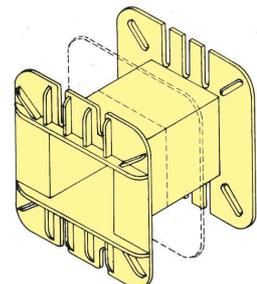
Spessore del pacco lamellare e Superficie del pacco lamellare

Lo spessore del nucleo ferromagnetico (S_p) determina la quantità di lamierini da infilare nel rocchetto. Se si desiderano delle misure personalizzate il rocchetto può essere costruito artigianalmente con del cartoncino speciale, oppure può essere del tipo a formato standard in plastica (ha delle misure standard indicate in rilievo su una facciata del rocchetto: esempio 40x50 vuole dire che la colonna $C=40$ mm ed $S_p=50$ mm). Identificare lo spessore (S_p) misurando con un righello o calibro il pacco di lamierini in nostro possesso. Di solito il valore dello spessore del pacco deve essere mantenuto entro i limiti da 0,5 a 3 volte la larghezza della colonna centrale (C) questo per una buona utilizzazione del materiale.



Infatti nel limite del possibile, il valore ideale dello spessore del pacco di lamierini (S_p) dovrebbe essere uguale al valore della colonna centrale (C), così da ottenere una sezione di forma quadrata.

Di solito quando si calcola un trasformatore si parte conoscendo i valori di tensione e corrente per poi calcolare la potenza, dalla quale si definisce la Superficie del Ferro (S_{fe}) in cm^2 del nucleo centrale del pacco lamellare. Questa superficie è data dalla larghezza (C) del lamierino scelto moltiplicato lo spessore del pacco lamellare (S_p). Possiamo intuire che a parità di superficie



si può diminuire (C) ed aumentare (Sp) avendo un lamierino con finestre più piccole, oppure viceversa, si può aumentare (C) ed diminuire (Sp) avendo un lamierino con finestre più grandi.

Purtroppo difficilmente si trova un rocchetto plastico delle dimensioni che cerchiamo, per cui o ce lo costruiamo con del cartoncino, oppure dobbiamo reperire sul mercato un rocchetto plastico di dimensioni standard avente le dimensioni (CxSp) che più si avvicinano al valore calcolato di (Sfe).

Sicuramente il rocchetto che abbiamo trovato stravolge il nostro trasformatore, perché utilizzerà uno spessore pacco e un lamierino con dimensioni diverse. Tutto ciò non è un problema, dobbiamo solo ricalcolare tutto il trasformatore in funzione del nuovo pacco lamellare.

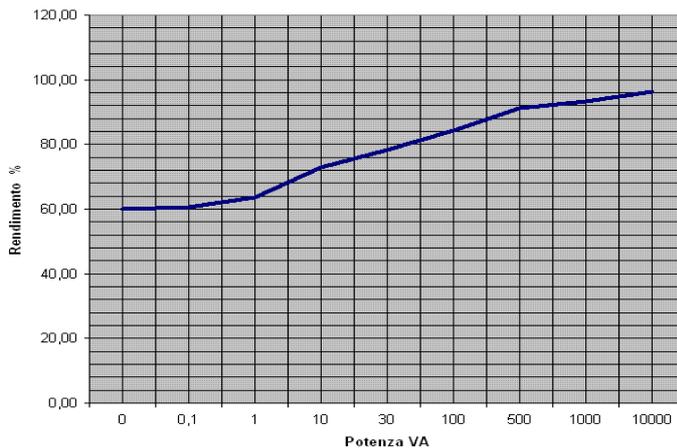
Rendimento e Caduta di Tensione %

Il trasformatore è la macchina elettrica che ha il maggior rendimento in quanto non avendo parti in movimento si può fare carico delle sole perdite nel rame e delle perdite nel ferro. Nel calcolo del trasformatore è opportuno tenere conto del rendimento per farci capire che tutta la potenza assorbita dal primario non viene trasferita tutta al secondario. Il rendimento come anche la caduta di tensione che si viene a creare da vuoto a carico dipendono dalla potenza del trasformatore. Nella tabella sono espressi alcuni valori indicativi dell'andamento del rendimento η e della caduta di tensione $v\%$ in forma percentuale.

Potenza VA	Rendimento η %	C.d.T v %
da 10 a 30	65÷80	20÷10
da 30 a 100	80÷85	10 ÷ 5
da 100 a 500	85÷90	5 ÷ 3
da 500 a 1000	90÷94	3 ÷ 2

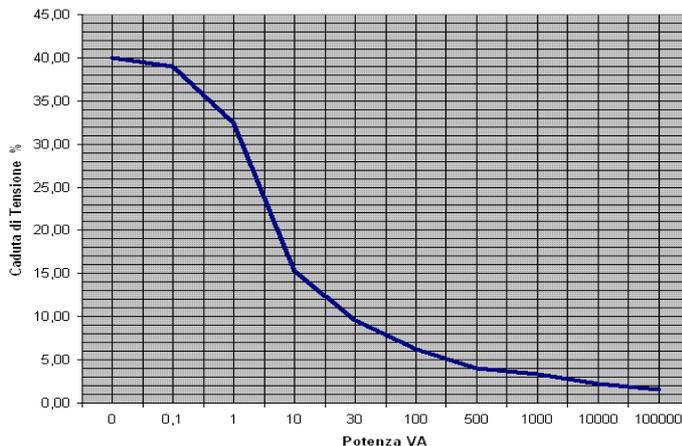
Rendimento % del trasformatore in funzione della Potenza

$$\eta = 60 + \left(\frac{\log_e (P_2 + 1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (P_2 + 1000)} \right) (\%)$$



Caduta di Tensione % del trasformatore in funzione della Potenza

$$v\% = \frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{P_2}{2} + 2,72 \right) \right)^{1,35}} (\%)$$



Densità di Corrente

La densità di corrente (J) ammissibile nei conduttori dipende della superficie di irradiazione del calore del trasformatore. Per piccoli trasformatori, che sono quelli delle normali apparecchiature, la superficie di raffreddamento è grande rispetto alla potenza erogata dai secondari, quindi si adopereranno densità di corrente nettamente superiori a quelle adottate per grandi trasformatori.

Per potenze da 75 a 150 VA si può adottare una densità di corrente di $J = 3 \text{ A/mm}^2$ di sezione. Questa densità può essere aumentata sino a $J = 4 \text{ A/mm}^2$ per trasformatori da 20 VA.

Il valore della densità di corrente si sceglie in relazione alla possibilità di raffreddamento del trasformatore ed al tipo di servizio.

In linea di massima si può considerare una densità di corrente da $J = 2 \text{ A/mm}^2$ a $J = 4 \text{ A/mm}^2$. Si sceglie una densità bassa per servizi continui, mentre una densità alta per servizi limitati.

E' consigliabile usare densità minori (da 2 a 3 A/mm^2) per conduttori di diametro (1,5 a 2,5mm) i quali a parità di densità scaldano di più, e anche per i conduttori più sottili (0,15 a 0,30mm) perché, se essi non sono ben calibrati, piccole variazioni del valore assoluto nel diametro portano a grandi variazioni percentuali della sezione e quindi della densità. Questi valori di densità vanno rispettati, per assicurarsi che:

le perdite per effetto Joule non risultino alte, con un conseguente eccessivo aumento della temperatura e un aumento della caduta di tensione sugli avvolgimenti.

che lo spazio occupato dagli avvolgimenti e dagli isolanti non risulti piccolo rispetto alla sezione della finestra, infatti è buona norma riempire con l'avvolgimento tutto lo spazio a disposizione nella finestra del lamierino.

Ingombro dell'Avvolgimento

Dal momento in cui si conoscono le dimensioni del lamierino, il diametro dei conduttori ed il numero di spire si può determinare la dimensione dell'avvolgimento per controllare se esso potrà essere contenuto nella finestra $E \times F$ del lamierino (Area Finestra), o per meglio dire nello spazio a disposizione fornito dal rocchetto $H \times M$ (vedi tabelle misure lamierini e rocchetti). Infatti moltiplicando $H \times M$ si ottiene la superficie in mm^2 che rappresenta lo spazio disponibile ad accogliere l'avvolgimento (Area Rocchetto).

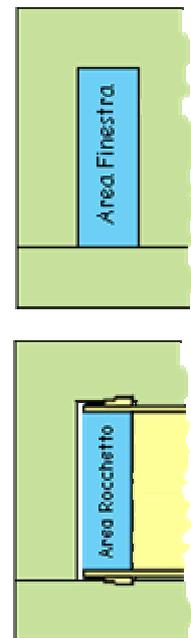
A questo punto ci resta da calcolare lo spazio lordo totale occupato dall'avvolgimento di rame, dagli strati isolanti interposti fra gli strati e fra gli avvolgimenti e in più bisogna tenere conto di eventuali spazi vuoti creati involontariamente nell'esecuzione dell'avvolgimento.

Lo scopo è quello di ottenere un valore di spazio occupato minore di quello indicato dallo spazio disponibile così come verifica degli ingombri che tali avvolgimenti saranno contenuti dal rocchetto e quindi senza presentare poi difficoltà nell'inserire i lamierini ferromagnetici.

Se il valore dello spazio occupato è maggiore dello spazio disponibile non è possibile procedere, questo perché l'ingombro degli avvolgimenti è maggiore dello spazio a disposizione. A questo punto possiamo ricominciare il calcolo da capo utilizzando un lamierino con finestre più grandi, oppure variare qualche parametro in modo da diminuire il numero delle spire o anche la sezione del filo, facendo molta attenzione ai parametri che si modificano perché potrebbero compromettere il corretto funzionamento del trasformatore.

Ogni spira di filo di rame avvolta occuperà uno spazio pari all'area di un quadrato il cui lato è rappresentato del diametro, questo per tenere conto degli spazi vuoti che si formano fra spira e spira. Infatti non è possibile che le spire del secondo strato occupino il vano formato tra spira e spira del primo strato per la diversa inclinazione delle spire stesse.

Corrente in A	Densità A/mm^2	Diametro in mm
da 0,01 a 0,1	da 1,5 a 2,5	da 0,10 a 0,25
da 0,1 a 1	da 2 a 4	da 0,25 a 0,55
da 1 a 10	da 4 a 3	da 0,55 a 2,5
da 10 in su	da 3 a 2	da 2,5 in su



Ogni strato di carta isolante interposta fra i vari strati degli avvolgimenti occuperà uno spazio che non dobbiamo sottovalutare. Per cui un giro di isolante occuperà uno spazio pari all'area ricavata moltiplicando il suo spessore per la misura di H del rocchetto.

Inoltre è opportuno considerare che la finestra del lamierino risulti il più possibile riempita dagli avvolgimenti, onde ridurre così i flussi dispersi.

La scelta del tipo di lamierino è di fondamentale importanza, infatti se l'avvolgimento è troppo ingombrante si deve scegliere un lamierino con finestre più grandi, ma se l'avvolgimento non riempie nemmeno metà dello spazio offerto dalla finestra si deve scegliere un lamierino di dimensioni minori.

Coefficiente di Ingombro K_i

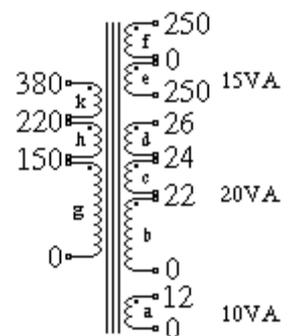
È un coefficiente di ingombro che non compromette il funzionamento del trasformatore. Praticamente l'ingombro del rame sommato all'ingombro degli isolanti viene moltiplicato per tale coefficiente K_i , in modo da sopperire ad altri eventuali spazi vuoti. Questo coefficiente viene dedotto dalla pratica, in base al grado di isolamento del filo, al numero degli avvolgimenti, e all'abilità del bobinatore.

Per il coefficiente di ingombro K_i si assume di solito il valore di $K_i=10\%$.

Avvolgimenti Collegati in Serie oppure Isolati fra loro

Per realizzare un trasformatore in modo da poterlo utilizzare con diverse tensioni di alimentazione (es. 380V, 220V, 150V) è necessario costruire tre avvolgimenti primari, che poi saranno collegati in serie. Per alimentare questo trasformatore si collegano i fili fra 0-150V oppure 0-220V oppure 0-380V a seconda delle nostre esigenze. Attenzione, tenere sempre presente che non è possibile alimentare il trasformatore con due o più tensioni contemporaneamente. In questo caso si dice che gli avvolgimenti sono in serie con prese di regolazione di tensione. Infatti gli avvolgimenti vengono avvolti per differenza spire, l'avvolgimento 380 è dato dalla somma degli avvolgimenti 'g+h+k', situazione identica nel secondario, l'avvolgimento 26 è dato dalla somma degli avvolgimenti 'b+c+d'.

Per gli avvolgimenti secondari le soluzioni di collegamenti sono molteplici, infatti gli avvolgimenti secondari sono destinati ad alimentare dei carichi. Per ciò può sorgere la necessità di avere ad esempio: un secondario con presa centrale al quale si può collegare un raddrizzatore a due diodi; oppure un secondario con prese di regolazione di tensione; oppure un secondario tradizionale isolato.



Il secondario con presa centrale è composto di due avvolgimenti isolati che poi vengono collegati in serie tenendo conto che la fine di un avvolgimento va collegata all'inizio dell'altro avvolgimento (vedi pallino nell'avvolgimento in figura), questo punto funge da presa centrale. Se questi due secondari sono destinati a due diodi raddrizzatori capiamo che questi avvolgimenti sono interessati alternativamente uno per mezza semionda e l'altro per l'altra mezza semionda. Quindi per questi secondari destinati ad un raddrizzatore a due diodi si considera la potenza di un solo avvolgimento, ma come numero spire ne avvolgiamo due identici.

Nei secondari collegati in serie con prese di regolazione di tensione, ognuno di questi avvolgimenti va calcolato per la potenza in cui viene impiegato (di solito tutti questi avvolgimenti hanno la stessa potenza), ma nel calcolo della potenza totale del trasformatore va preso solo il valore di potenza di un singolo avvolgimento.

Per tutti gli altri secondari isolati la potenza va considerata per intero.

La potenza totale del trasformatore in figura è data dalla somma delle potenze dei singoli avvolgimenti secondari ($P_{tot}=10+20+15=45VA$).

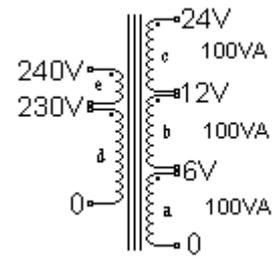
Avvolgimenti Collegati in Serie con più carichi collegati contemporaneamente

Nella progettazione può sorgere l'esigenza di dover realizzare trasformatori con avvolgimenti secondari multipresa, cioè che oltre ad avere la funzione di regolazione di tensione alimentano anche un proprio carico distinto. Nell'esempio in figura il trasformatore è dotato di due avvolgimenti primari di regolazione tensione di alimentazione e di tre avvolgimenti secondari collegati in serie.

Se consideriamo le prese 6V, 12V, 24V come prese di regolazione della tensione di uscita dove collegare poi un solo carico distinto questo trasformatore verrà dimensionato per una potenza di 100VA.

Se consideriamo le prese 6V, 12V, come prese di regolazione della tensione di uscita dove collegare poi ad ogni uscita un proprio carico distinto (in totale due carichi contemporaneamente) questo trasformatore verrà dimensionato per una potenza di 100+100=200VA.

Se consideriamo le prese 6V, 12V, 24V come prese di regolazione della tensione di uscita dove collegare poi ad ogni uscita un proprio carico distinto (in totale tre carichi contemporaneamente) questo trasformatore verrà dimensionato per una potenza di 100+100+100=300VA.



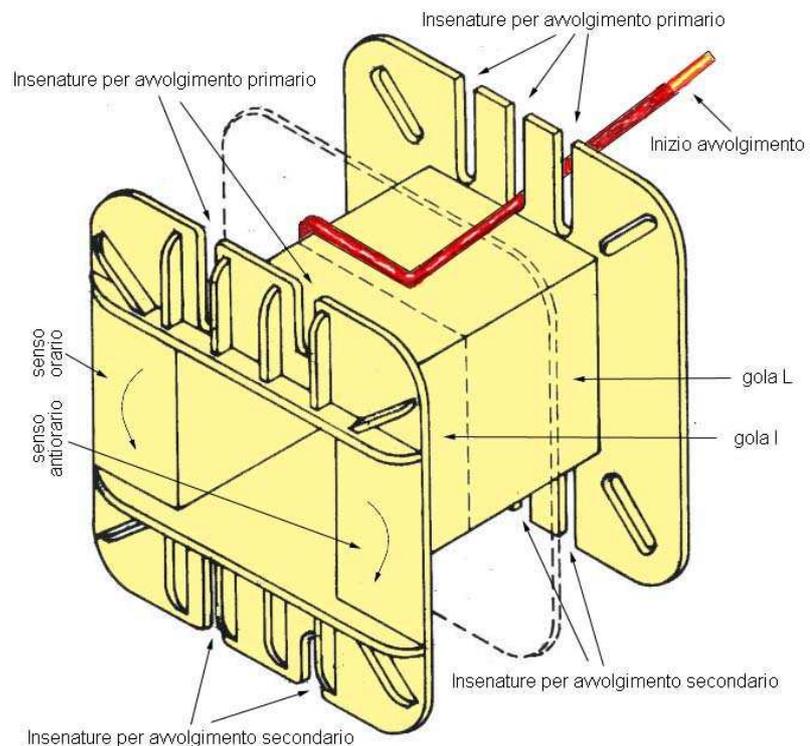
In questo caso bisogna considerare il fatto che tutti i tre carichi fanno capo al morsetto '0' del trasformatore, per cui l'avvolgimento 'a' oltre alla sua corrente si deve far carico anche della corrente degli altri avvolgimenti 'b' e avvolgimento 'c'. Anche l'avvolgimento 'b' oltre alla sua corrente si deve far carico anche della corrente dell' avvolgimento 'c'. Tutto questo comporta una notevole riduzione del numero di spire degli avvolgimenti secondari (essendo collegati in serie) ma contribuisce ad un aumento della sezione del filo di rame smaltato di alcuni avvolgimenti, infatti il diametro filo è calcolato in funzione della corrente che lo attraversa.

Come Avvolgere il Trasformatore

Una volta conosciuto il numero di spire necessarie per gli avvolgimenti e il diametro dei fili da utilizzare, si procede alla costruzione pratica del trasformatore.

Se il nucleo di lamierini possiede un rocchetto in cartoncino o in plastica, non esistono problemi; se il rocchetto non esiste, bisogna costruirlo in cartoncino, tenendo conto che a costruzione ultimata, i lamierini possano entrare senza difficoltà nel rocchetto.

Per quanto riguarda l'ordine dell' avvolgimento, non vi sono regole precise: quindi è possibile avvolgere subito i vari avvolgimenti primari e successivamente il secondario, o viceversa. Di solito si avvolgono prima gli avvolgimenti primari perché essi, richiedono del filo di rame di piccola sezione, ed è più facile ottenere al termine un avvolgimento omogeneo e compatto che può fare da base di appoggio agli avvolgimenti secondari. Questa condizione non si verificherebbe se avvolgiamo prima i secondari, che di solito impiegano fili di sezione elevata. Possiamo anche aggiungere che è più facile modificare gli avvolgimenti secondari in caso che necessita al secondario una tensione diversa, senza intaccare le molte spire primarie.



Quando si inizia la realizzazione dell'avvolgimento proteggiamo il filo con un pezzo di tubino in plastica o sterlingato della lunghezza di circa 15cm, va fissato con un po' di nastro adesivo in carta al rocchetto e portato fuori. Questo rappresenta l'inizio dell'avvolgimento.

Cominciamo ad avvolgere partendo da sinistra verso destra per il primo strato, per poi ritornare con il secondo strato da destra verso sinistra, fino a terminare il numero di spire richieste. Le spire

dovranno risultare adiacenti fra loro, il filo dovrà essere sufficientemente teso in modo da sagomare le spire al rocchetto, al termine del primo strato, si provvederà ad applicare un giro di nastro di carta, poi un altro strato di spire e così via di seguito fino ad esaurire in numero totale delle spire.

Alla fine di ogni avvolgimento proteggiamo ancora il filo con un tubino in plastica o sterlingato come ad inizio avvolgimento, successivamente applicheremo due giri di nastro di carta

Se utilizziamo un filo che ha per isolamento un doppio smalto non è necessario isolare strato per strato con nastro di carta ma sarà sufficiente applicare due giri di carta fra avvolgimenti primari e secondari. In questo caso si cerca di disporre il filo di rame in maniera uniforme in modo che non risulti disposto a cono sul rocchetto.

Tenere presente che il nastro di carta che serve per isolare strato da strato aumenta l'ingombro dell'avvolgimento, per cui è molto importante usare carta assai sottile, in modo da evitare che al termine dell'avvolgimento, non ci sia più lo spazio sufficiente per i successivi avvolgimenti.

Gli avvolgimenti secondari si avvolgono nello stesso senso con cui abbiamo avvolto gli avvolgimenti primari, proseguendo la costruzione secondo la procedura appena descritta. Nell'impiego di fili con sezione maggiore è richiesta una maggiore cura alla sagomatura delle spire attorno al rocchetto, per evitare che si creino spazi vuoti.

Quando abbiamo finito di avvolgere tutti gli avvolgimenti sia primari che secondari si applicano tre o quattro giri di nastro di carta o nastro apposito per costruzione di trasformatori, non usare lo scotch di plastica per usi casalinghi perché la temperatura di funzionamento del trasformatore lo scioglierebbe.

Mentre avvolgiamo ogni tanto è bene controllare se il lamierino si riesce ad infilare nel rocchetto. I lamierini verranno inseriti nel rocchetto in modo sfalsato, uno in un verso, uno nell'altro, in modo da eliminare un eventuale traferro. Cercare di infilare più lamierini possibili per poi avere un nucleo di ferro ben serrato e compatto servendoci di un martello di plastica e facendo attenzione di non danneggiare lo smalto o tagliare le spire nell'infilare i lamierini, infine si deve serrare tutto il pacco di lamierini con calotte o bulloni serrapacco onde evitare che i lamierini vibrano.

Avvolgimenti in Bifilare, Trifilare, Quadrifilare, ecc...

Con il temine avvolgimento in bifilare, trifilare, quadrifilare, ecc... consideriamo di avvolgere contemporaneamente 2, 3, 4, o più fili di rame smaltato paralleli tutti contemporaneamente. Lo scopo di questo metodo di avvolgere il trasformatore è quello di creare un filo di rame smaltato simile ad una piattina di rame di sezione rettangolare. Ipotizziamo che dal lamierino ferromagnetico fuoriesca una nube di campo magnetico che l'avvolgimento deve captare e trattenere come una rete da pesca. Se l'avvolgimento è di poche spire e realizzato con filo sottile si capisce subito che la rete ha le maglie larghe e trattiene poco. Se le stesse spire sono realizzate da un filo tipo piattina la rete avrà le maglie più strette quindi trattiene e reagisce meglio al campo magnetico.

Se dal calcolo del trasformatore ci viene proposto di realizzare un avvolgimento con del filo di diametro $\phi_1 = 1,08\text{mm}$ avente sezione $S_f = 0,7854\text{mm}^2$, possiamo realizzare lo stesso numero di spire avvolgendo 2 fili contemporaneamente in Bifilare utilizzando del filo di diametro $\phi_1 = 0,76\text{mm}$ avente sezione $S_f = 0,3848\text{mm}^2$. Infatti questi due fili in totale hanno circa la stessa sezione del filo calcolato, per cui la densità di corrente rimane circa la stessa, ma abbiamo creato un conduttore di sezione rettangolare che oltre a migliorare la resa riesce meglio a coprire lo strato di avvolgimento da fiancata a fiancata laterale del rocchetto.

Oppure possiamo realizzare lo stesso numero di spire avvolgendo 3 fili contemporaneamente in Trifilare utilizzando del filo di diametro $\phi_1 = 0,66\text{mm}$ avente sezione $S_f = 0,2827\text{mm}^2$. Anche in questo caso tre fili in totale hanno circa la stessa sezione del filo calcolato, per cui la densità di corrente rimane circa la stessa, ma abbiamo creato un conduttore di sezione rettangolare (tre fili affiancati).

Avendo a disposizione più spazio nella finestra del rocchetto è possibile anche utilizzare del filo di sezione maggiore rispetto a quella calcolata con il vantaggio di riempire meglio tutto il rocchetto e di realizzare un avvolgimento con una minore resistenza.

Identificazione di un trasformatore

Per verificare o collaudare il trasformatore costruito, oppure per identificare un trasformatore recuperato da un vecchio finale distrutto, in modo da capire se può essere riutilizzato per i nostri scopi bisogna seguire questo procedimento dove occorre un normale tester ed un variac:

Analizziamo lo stato costruttivo del trasformatore:

Se tutti i lamierini a forma di E sono inseriti nel rocchetto dallo stesso verso e i lamierini a forma di I sono appoggiati alle E con interposto un cartoncino che funge da spessore creando un traferro sicuramente potrebbe essere:

- una Induttanza, che sicuramente sarà anche caratterizzata da un solo e unico avvolgimento.
- un trasformatore di uscita per amplificatore valvolare SE (Single-Ended), che sarà caratterizzato da un avvolgimento primario fatto di molte spire con filo sottile ed uno o più avvolgimenti secondari fatti di poche spire con filo di diametro maggiore.

Mentre se i lamierini E I sono inseriti nel rocchetto in modo alternato sicuramente potrebbe essere:

- un trasformatore di alimentazione.
- un trasformatore di uscita per amplificatore valvolare PP (Push-Pull), che sarà caratterizzato da un avvolgimento primario con presa centrale fatto di molte spire con filo sottile ed uno o più avvolgimenti secondari fatti di poche spire con filo di diametro maggiore

Per semplificare questa procedura consiglio di farsi uno schizzo del trasformatore disegnando gli avvolgimenti sui quali annotarsi tutti i valori misurati.

Misurare con un ohmmetro la resistenza fra i terminali per individuare la continuità degli avvolgimenti e il loro valore ohmico. Se si tratta di un comune trasformatore abbassatore al primario corrisponderanno resistenze dell'ordine di centinaia di ohm; mentre al secondario corrisponderanno resistenze dell'ordine di qualche ohm o quasi in cortocircuito.

Misurare con un righello le dimensioni del nucleo ferromagnetico (misura della colonna C e dello spessore del pacco lamellare Sp). La misura della sezione del nucleo centrale Sfe si ottiene moltiplicando le due misure rilevate con il calibro misurando il valore della colonna "C" e dello spessore del pacco "Sp".

Supponiamo che il trasformatore in esame abbia i lamierini E I inseriti nel rocchetto in modo alternato e di misurare C=5,0 cm e Sp=5,0 cm

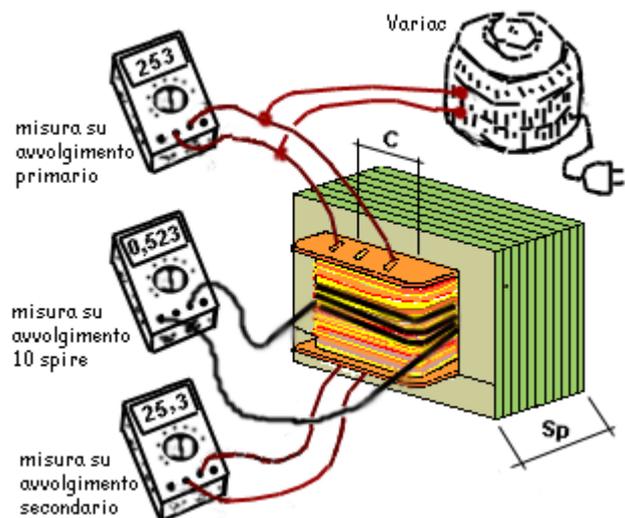
$$S_{fe} = \frac{C \cdot Sp}{1,11} (cm^2)$$

$$\frac{5,0 \cdot 5,0}{1,11} = 22,52 cm^2$$

E' di fondamentale importanza nominare il valore di Induzione Magnetica B alla quale lavorerà il trasformatore in esame. Infatti se l' induzione magnetica risulta elevata si rischia di saturare il trasformatore, che causa un cattivo trasferimento di potenza fra primario e secondario provocando surriscaldamenti e distorsioni.

Perciò diciamo che si può ritenere accettabile il funzionamento del trasformatore quando i valori di induzione magnetica B espressa in Wb/m^2 sono compresi :

- per trasformatori di alimentazione circa fra $0,9 Wb/m^2$ e $1,9 Wb/m^2$
- per trasformatori di alim. Trifasi circa fra $1,5 Wb/m^2$ e $2,5 Wb/m^2$



- per trasformatori di uscita SE circa fra $0,3 \text{ Wb/m}^2$ e $0,7 \text{ Wb/m}^2$
- per trasformatori di uscita PP circa fra $0,6 \text{ Wb/m}^2$ e $1,2 \text{ Wb/m}^2$

Un altro parametro di fondamentale importanza da nominare è il valore di frequenza alla quale lavorerà il trasformatore in esame.

- per trasformatori di alimentazione di tipo europeo $f = 50 \text{ Hz}$
- per trasformatori di uscita sia SE che PP si considera la frequenza minima riproducibile "fmin" che è il parametro che ci sta ad indicare la frequenza più bassa che il trasformatore riesce a trasferire al secondario. Questo parametro può essere scelto su larga scala, dipende dalle nostre esigenze. Tenere presente che le vecchie radio a valvole avevano trasformatori calcolati con fmin di circa 100...200Hz. Mentre gli amplificatori valvolari Hi-Fi dell'epoca avevano trasformatori calcolati con fmin di circa 30...100Hz. Di solito si sceglie il valore di 50 Hz.

Con questi valori possiamo calcolare il valore della forza elettromotrice indotta in una spira "e".

Supponiamo di far lavorare il trasformatore ad un induzione magnetica $B = 1,0 \text{ Wb/m}^2$ ed a una frequenza di 50 Hz.

$$e = B \cdot 4,44 \cdot f \cdot Sfe \cdot 10^{-4} \quad (V) \qquad 1 \cdot 4,44 \cdot 50 \cdot 22,52 \cdot 0,0001 = 0,5 \text{ V}$$

Ora bisogna avvolgere 10 spire attorno al rocchetto, sopra l'avvolgimento esistente senza smontare i lamierini, questo è possibile utilizzando un filo da elettricista molto sottile (tipo doppino telefonico).

Collegare l'avvolgimento primario, quello identificato con la resistenza maggiore, ai morsetti di un Variac il quale sarà collegato alla rete (220 Vca) e regolare con la manopola una tensione tale da avere sull'avvolgimento di 10 spire una tensione uguale alla "e" calcolata moltiplicata per 10, (misurare tale tensione alternata con un voltmetro in ac).

$$V_{10} = e \cdot 10 \quad (V) \qquad 0,5 \cdot 10 = 5 \text{ V}$$

Supponiamo che per leggere una $V_{10} = 5 \text{ V}$ dobbiamo alimentare l'avvolgimento primario a $V_1 = 220 \text{ V}$.

Collegare ai terminali dell'avvolgimento secondario una lampada da 25W oppure una resistenza idonea a far circolare un po' di corrente (che manifesti una debole accensione della lampada), e leggere con un voltmetro il valore della tensione alternata ai capi dell'avvolgimento secondario prima a vuoto (senza resistenza), poi a carico (con resistenza).

Eeguire la media delle due letture effettuate sull' avvolgimento secondario (da vuoto a carico); il rapporto risultante fra la tensione primaria e la tensione secondaria media ci indicherà il rapporto di trasformazione K.

$$\text{Tensione secondaria a vuoto } V_{2_0} = 154 \text{ Volt} \qquad \text{Tensione secondaria a carico } V_{2_c} = 149 \text{ Volt}$$

Calcolo della tensione secondaria media V_2 :

$$V_2 = \frac{(V_{2_0} + V_{2_c})}{2} \qquad \frac{(154 + 149)}{2} = 151,5 \text{ V}$$

Il rapporto di trasformazione K sarà dato dal rapporto fra la tensione primaria V_1 diviso tensione secondaria V_2

$$K = \frac{V_1}{V_2} \qquad \frac{220}{151,5} = 1,452$$

Consideriamo sempre l'avvolgimento primario, quello identificato con la resistenza maggiore. Ora dobbiamo determinare quale sarà la massima corrente che può sopportare l'avvolgimento senza danneggiarsi.

Lo scopo è quello di individuare al sezione in mm² del filo di rame nudo per poi risalire alla corrente.

Per cui misurare con un calibro o meglio un micrometro il diametro del filo di rame smaltato. Controlliamo con una lente di ingrandimento lo spessore dello smalto isolante. Se è possibile bruciare con un accendino per un tratto di 2cm la parte terminale di un avvolgimento con lo scopo di eliminare lo strato smaltato dell'isolante facilitando così la misura netta del rame nudo.

Supponiamo di misurare un Diametro Filo Nudo di 0,8mm, calcoliamo la Sezione.

$$S_r = \frac{\phi_r^2 \cdot \pi}{4} \quad (mm^2) \qquad \frac{0,8^2 \cdot \pi}{4} = 0,5 \text{ mm}^2$$

ipotizziamo una densità di corrente $J = 3 \text{ A/mm}^2$ calcoliamo la corrente massima dell'avvolgimento.

$$I = S_r \cdot J \quad (A) \qquad 0,5 \cdot 3 = 1,50 \text{ A}$$

Conoscendo ora un valore indicativo della corrente possiamo calcolare la potenza del trasformatore:

$$P = V \cdot I \quad (VA) \qquad 220 \cdot 1,5 = 330 \text{ VA}$$

Quindi calcoliamo approssimativamente il valore dell'impedenza avvolgimento primario:

$$Z_a = \frac{P}{I^2} \quad (\Omega) \qquad \frac{330}{1,5^2} = 146 \Omega$$

Di conseguenza calcoliamo anche l'impedenza dell'avvolgimento secondario:

$$Z_c = \frac{Z_a}{K^2} \quad (\Omega) \qquad \frac{146}{1,452^2} = 69 \Omega$$

Dall'analisi dei valori trovati possiamo dire che siamo in presenza di un trasformatore di alimentazione con le seguenti caratteristiche 220 V / 150 V 330 VA.

Per meglio capire si vuole evidenziare che i dati chiave per l'identificazione di un trasformatore sono:

- la sezione centrale del nucleo ferromagnetico $S_{fe} \text{ (cm}^2\text{)}$
- l'Induzione Magnetica $B \text{ (Wb/m}^2\text{)}$
- la frequenza $f \text{ (Hz)}$
- la densità di corrente $J \text{ (A/mm}^2\text{)}$

Infatti modificando anche di poco questi valori comporta una identificazione diversa del trasformatore.

Per cui è di fondamentale importanza scegliere con accuratezza:

- il valore di induzione B in relazione alle dimensioni del nucleo ferromagnetico, alla disposizione dei lamierini, al tipo di uso al quale è destinato, ecc.... Per comodità di solito si procede con l'identificazione del trasformatore considerando questi dati di partenza:

per trasformatori di alimentazione 1 Wb/m^2

per trasformatori di alim. Trifasi $1,8 \text{ Wb/m}^2$

per trasformatori di uscita SE $0,5 \text{ Wb/m}^2$

per trasformatori di uscita PP $1 \text{ Wb}/\text{m}^2$

- il valore di frequenza, questo è facile per i trasformatori di alimentazione corrisponde alla frequenza di rete 50 Hz, mentre per i trasformatori di uscita è un valore che va scelto in relazione alle dimensioni del nucleo ferromagnetico, alla disposizione dei lamierini, al tipo di uso al quale è destinato, ecc.... Per comodità di solito si procede con l'identificazione del trasformatore considerando una frequenza minima di 50 Hz.
- il valore di densità di corrente J che stabilisce la quantità di corrente che deve circolare nel filo smaltato e quindi nell'avvolgimento. Per comodità di solito si procede con l'identificazione del trasformatore considerando una densità di corrente $J = 3 \text{ A}/\text{mm}^2$.

Dopo aver terminato tutte le prove e i calcoli se tali valori non ci soddisfano, oppure non riusciamo a dare un senso ai valori trovati conviene ripetere più volte questa procedura di identificazione cambiando di volta in volta i valori di B f J (Induzione Magnetica, Frequenza e Densità di Corrente) al fine di ottenere una serie di dati che ci aiuteranno ad valutare più correttamente l'utilizzo possibile del trasformatore in esame.

Lo stesso procedimento è applicabile anche sui trasformatori trifasi. Si procede analizzando solo la colonna centrale (essendo gli avvolgimenti sulle altre due colonne identici). Di seguito cerchiamo di capire il tipo di collegamento: Stella, Triangolo, ecc....

Infine, considerando le tensioni di fase (quelle misurate sul singolo avvolgimento della colonna centrale) e con alcuni semplici calcoli rileviamo tutte le altre caratteristiche del trasformatore trifase (vedi capitolo trasformatori trifasi).

Esempio di Identificazione di un Trasformatore

Supponiamo che il trasformatore in esame abbia i lamierini a forma di E inseriti nel rocchetto dallo stesso verso e i lamierini a forma di I sono appoggiati alle E con interposto un cartoncino che funge da spessore creando un traferro. Inoltre notiamo che dal rocchetto escono diversi fili, quindi è dotato di diversi avvolgimenti. Sicuramente siamo in possesso di un trasformatore di uscita per amplificatore valvolare SE (Single-Ended)

Misuriamo la colonna centrale $C=2,8 \text{ cm}$ e $Sp=2,8 \text{ cm}$

$$S_{fe} = \frac{C \cdot Sp}{1,11} \text{ (cm}^2\text{)} \qquad \frac{2,8 \cdot 2,8}{1,11} = 7,063 \text{ cm}^2$$

Supponiamo di far lavorare il trasformatore ad un induzione magnetica $B = 0,5 \text{ Wb}/\text{m}^2$ ed a una frequenza di 50 Hz.

$$e = B \cdot 4,44 \cdot f \cdot S_{fe} \cdot 10^{-4} \text{ (V)} \qquad 0,5 \cdot 4,44 \cdot 50 \cdot 7,063 \cdot 0,0001 = 0,0784 \text{ V}$$

Adesso bisogna avvolgere 10 spire attorno al rocchetto sopra l'avvolgimento già esistente.

Collegare il Variac al primario e regolare ad una tensione tale da avere sull'avvolgimento di 10 spire una tensione uguale alla "e" calcolata moltiplicata per 10.

$$V_{10} = e \cdot 10 \text{ (V)} \qquad 0,0784 \cdot 10 = 0,784 \text{ V}$$

Supponiamo che per leggere una $V_{10} = 0,784 \text{ V}$ dobbiamo alimentare l'avvolgimento primario a $V_1=250\text{V}$.

Tensione secondaria a vuoto $V_{2_0} = 8,78 \text{ Volt}$ Tensione secondaria a carico $V_{2_c} = 7,62 \text{ Volt}$

Calcolo della tensione secondaria media V_2 :

$$V_2 = \frac{(V_{2_0} + V_{2_c})}{2} = \frac{(8,78 + 7,62)}{2} = 8,2 \text{ V}$$

Il rapporto di trasformazione K

$$K = \frac{V_1}{V_2} = \frac{250}{8,2} = 30,488$$

Consideriamo l'avvolgimento primario, quello identificato con la resistenza maggiore. Supponiamo di misurare un Diametro Filo Nudo di 0,14mm, calcoliamo la Sezione.

$$S_r = \frac{\phi_r^2 \cdot \pi}{4} \text{ (mm)} = \frac{0,14^2 \cdot \pi}{4} = 0,01538 \text{ mm}^2$$

ipotizziamo una densità di corrente $J = 2,6 \text{ A/mm}^2$

$$I = S_r \cdot J \text{ (A)} = 0,01538 \cdot 2,6 = 0,040 \text{ A}$$

Conoscendo ora un valore indicativo della corrente possiamo calcolare la potenza del trasformatore:

$$P = V \cdot I \text{ (VA)} = 250 \cdot 0,040 = 10 \text{ VA}$$

Quindi calcoliamo approssimativamente il valore dell'impedenza avvolgimento primario:

$$Z_a = \frac{P}{I^2} \text{ (\Omega)} = \frac{10}{0,040^2} = 6250 \text{ \Omega}$$

Di conseguenza calcoliamo anche l'impedenza dell'avvolgimento secondario:

$$Z_c = \frac{Z_a}{K^2} \text{ (\Omega)} = \frac{6250}{30,488^2} = 6,8 \text{ \Omega}$$

Dall'analisi dei valori trovati possiamo dire che siamo in presenza di un trasformatore di uscita per SE con le seguenti caratteristiche $6250 \text{ \Omega} / 6,8 \text{ \Omega} \quad 10 \text{ VA}$.

Inoltre, volendo possiamo anche calcolare il numero spire dell'avvolgimento primario e secondario:

$$N_1 = \frac{V_1}{e} \text{ (spire)} = \frac{250}{0,0784} = 3188 \text{ spire}$$

$$N_2 = \frac{V_{2_0}}{e} \text{ (spire)} = \frac{8,78}{0,0784} = 112 \text{ spire}$$

Raddrizzatori per Trasformatore Monofase

Quando si ha la necessità di ottenere una tensione continua si applica al secondario del trasformatore un opportuno circuito raddrizzatore. Questi circuiti sfruttano le caratteristiche dei diodi rettificatori che permettono il passaggio di corrente solo in un senso. In passato si utilizzavano diodi rettificatori metallici (ad ossido di rame e al selenio), i cui limiti massimi sono: tensioni di esercizio 200Vac con correnti di 300mA, caduta di tensione sul raddrizzatore di 8Vcc. Per potenze superiori si utilizzavano le valvole raddrizzatrici: i cui limiti massimi sono: tensioni di esercizio 800Vac con correnti di 300mA. Inoltre il diodo a vuoto per funzionare richiede un avvolgimento dedicato per l'alimentazione del suo filamento.

La caduta di tensione sul raddrizzatore è variabile in funzione della corrente assorbita, in pratica si può dire che la tensione continua fornita è di ugual valore della tensione alternata di ingresso. Al giorno d'oggi si utilizzano principalmente i diodi al silicio disponibili sul mercato con caratteristiche di tensione e corrente di vari valori, si possono trovare a seconda delle proprie esigenze, la caduta di tensione sui diodi corrisponde a circa qualche volt. La differenza sostanziale fra diverse tecnologie costruttive di diodi rettificatori comporta una diversità nella resistenza interna. Un diodo con elevata resistenza interna evidenzia maggiormente la caduta di tensione da vuoto a carico.

All'uscita del raddrizzatore la forma d'onda è molto grossolana non adatta ad alimentare circuiti elettronici. Per cui inserendo a valle del raddrizzatore un filtro livellatore costituito da una cella Resistenza - Condensatore oppure Induttanza - Condensatore si riducono le ondulazioni sfruttando l'energia accumulata dal condensatore. Come si può intuire la tensione in uscita dopo il filtro sarà circa uguale al valore di cresta della semionda. Il valore dell'ondulazione residua è denominato Ripple.

La tensione continua prelevata in uscita dai raddrizzatori non è stabilizzata per cui le variazioni della corrente assorbita dal carico si ripercuotono con delle variazioni di detta tensione. Come già affermato la principale causa di questo abbassamento di tensione è dovuta alla resistenza interna del diodo rettificatore che provoca una caduta di tensione proporzionale alla corrente assorbita.

Ai fini della pratica se realizziamo un raddrizzatore con diodi al silicio più filtro di livellamento ipotizziamo di ottenere una tensione continua a carico di circa 1,35 volte il valore della tensione alternata: esempio, 150Vac, dopo averla raddrizzata si ottiene una tensione continua di $150 \times 1,35 = 203Vcc$. Se realizziamo un raddrizzatore con diodi a vuoto più filtro di livellamento ipotizziamo di ottenere una tensione continua a carico di circa 1,2 volte il valore della tensione alternata: esempio 150Vac, dopo averla raddrizzata si ottiene una tensione continua di $150 \times 1,2 = 180Vcc$.

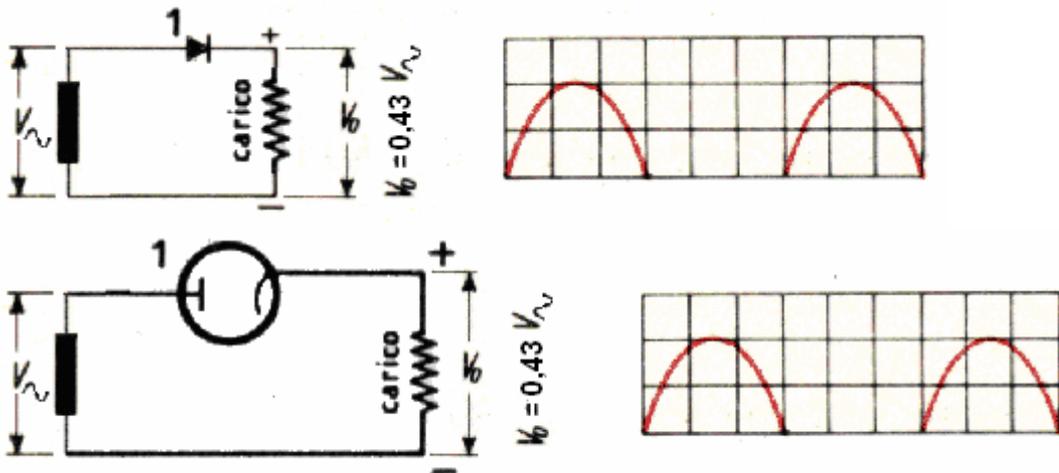
I circuiti raddrizzatori possono essere configurati in quattro modi diversi:

- a Semionda
- a Doppia Semionda
- a Ponte di Graetz
- a Duplicatore di Tensione

Analizziamo ogni singola configurazione utilizzando per comodità il tipo con diodo al silicio e quello con diodo a vuoto.

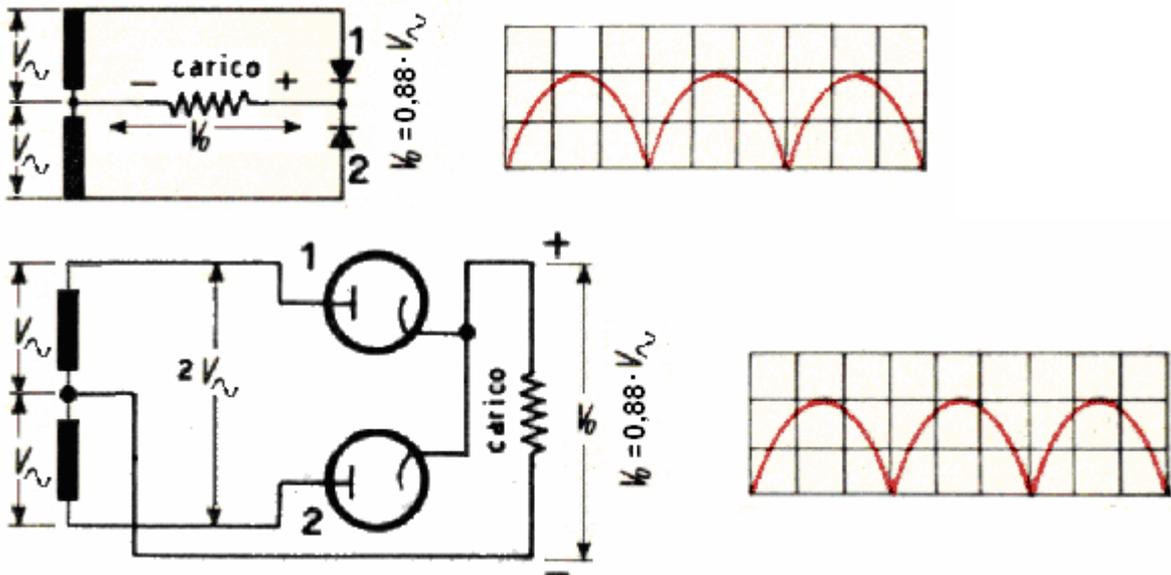
Riassumendo possiamo dire che applicando il filtro di livellamento costituito da uno o più condensatori collegati fra + e - si va ad aumentare la tensione di uscita notevolmente. Teoricamente la tensione raddrizzata si porta al valore di picco $V_o = V_{ac} \cdot \sqrt{2}$ ma praticamente considerando le cadute di tensione è meglio valutare la tensione continua raddrizzata e filtrata con un valore di circa $V_o = V_{ac} \cdot 1,37$ (Ponte di Graetz con diodi al silicio a vuoto senza carico)

Raddrizzatore Monofase a Semionda: Il diodo 1 permette il passaggio della sola semionda positiva (mezza onda). Questa configurazione è utilizzata solo per bassissime potenze con abbinato un opportuno filtro di livellamento.



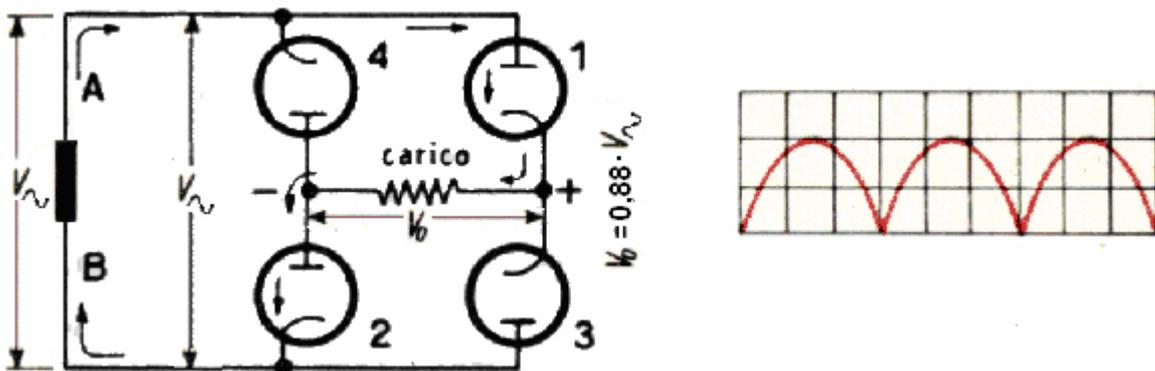
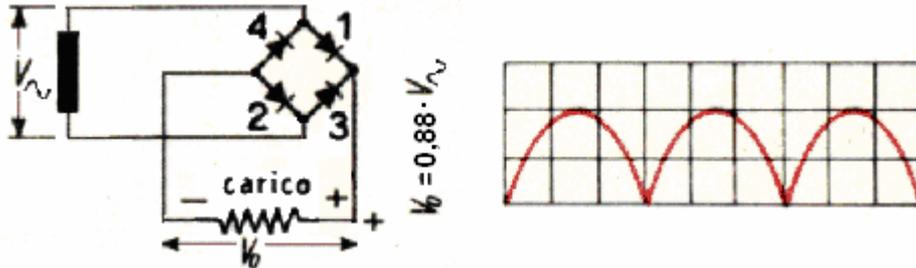
- Tensione di picco massima: $V_p = V_{ac} \cdot 1,37$
- Tensione reale a vuoto: $V_o = V_{ac} \cdot 0,45$
- Tensione reale a carico, circa: $V_o = V_{ac} \cdot 0,43$ (dipende dalla caduta di tensione sul diodo)

Raddrizzatore Monofase a Doppia Semionda: I diodi permettono il passaggio della semionda positiva e negativa (onda intera) Il diodo 1 permette il passaggio della sola semionda positiva, mentre il diodo 2 permette il passaggio della sola semionda negativa. Questa configurazione è la più utilizzata quando si dispone di un doppio avvolgimento sul trasformatore che permette di utilizzare solo due diodi. Utilizzabile per qualsiasi potenza con abbinato un opportuno filtro di livellamento.



- Tensione di picco massima: $V_p = V_{ac} \cdot 1,37$
- Tensione reale a vuoto: $V_o = V_{ac} \cdot 0,9$
- Tensione reale a carico, circa: $V_o = V_{ac} \cdot 0,88$ (dipende dalla caduta di tensione sul diodo)

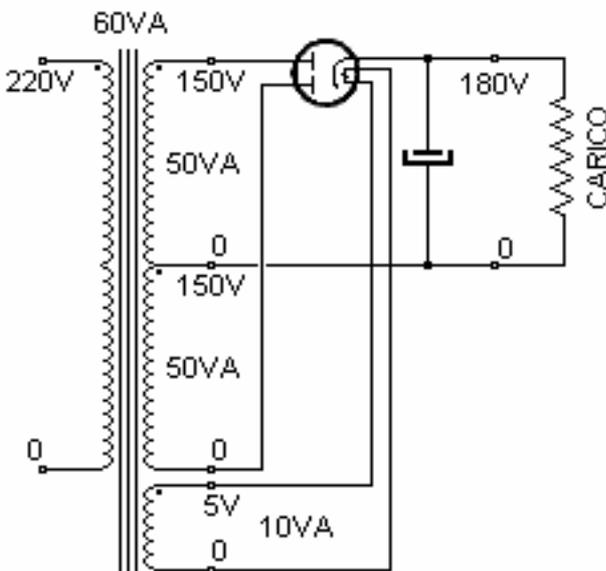
Raddrizzatore Monofase a Ponte di Graetz: I diodi permettono il passaggio della semionda positiva e negativa (onda intera). I diodi 1 e 2 permettono il passaggio della sola semionda positiva, mentre i diodi 3 e 4 permettono il passaggio della sola semionda negativa. Questa configurazione con diodi al silicio è la più utilizzata, mentre la configurazione con diodi a vuoto è scarsamente utilizzata perché utilizza quattro diodi a vuoto che richiedono tre avvolgimenti dedicati per i filamenti delle valvole. Utilizzabile per qualsiasi potenza con abbinato un opportuno filtro di livellamento.



- Tensione di picco massima: $V_p = V_{ac} \cdot 1,37$
- Tensione reale a vuoto: $V_o = V_{ac} \cdot 0,9$
- Tensione reale a carico, circa: $V_o = V_{ac} \cdot 0,88$ (dipende dalla caduta di tensione sul diodo)

Premessa sul Raddrizzatore Monofase a Doppia Semionda a due Diodi.

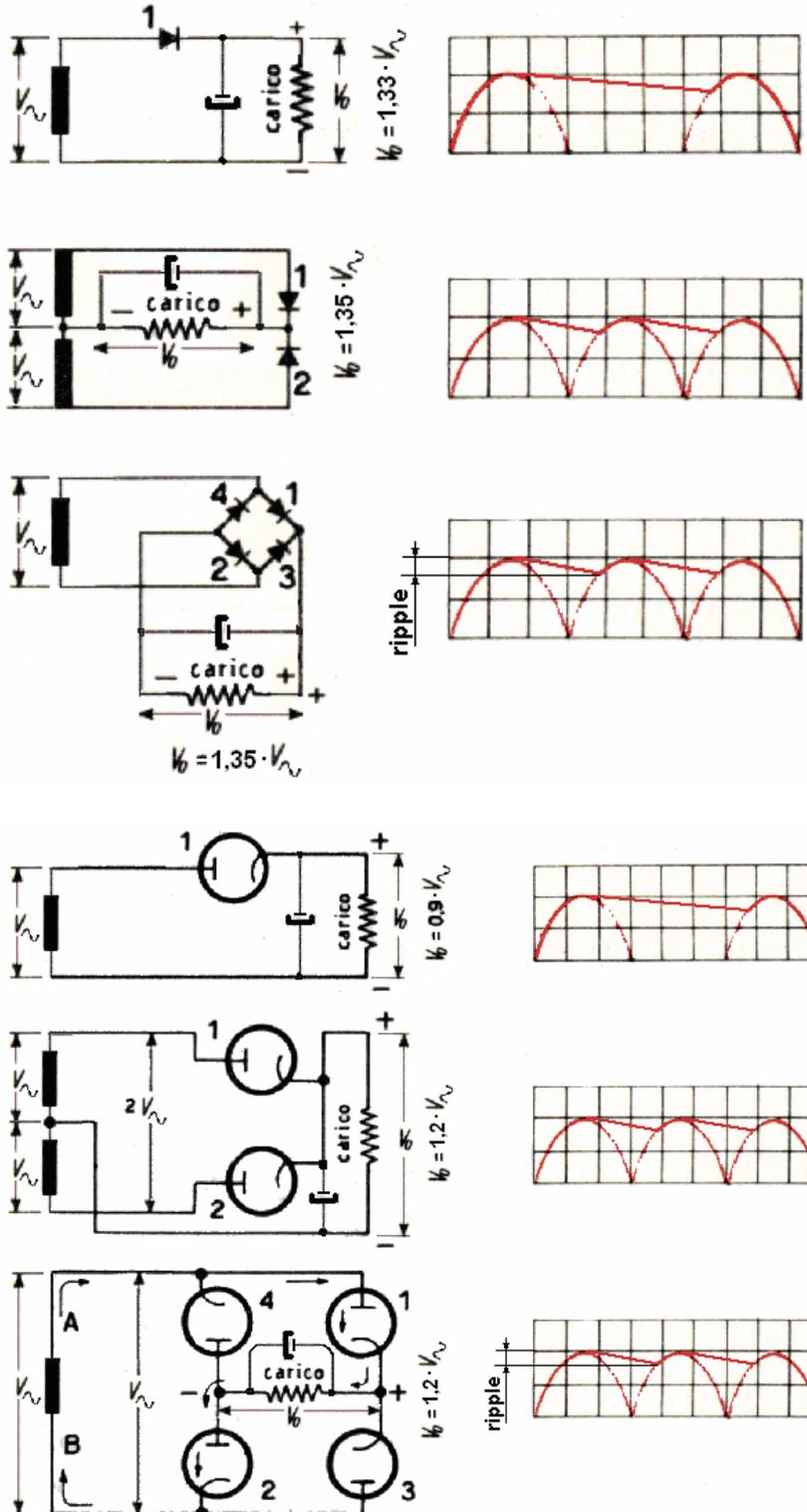
Questa configurazione è la più utilizzata quando si utilizza un raddrizzatore a vuoto biplacca. Da notare e tenere presente nel calcolo del trasformatore che il secondario che alimenta gli anodi deve essere calcolato doppio come numero di spire, con presa centrale 0-150V e 0-150V, considerando la potenza di un solo avvolgimento 50VA, e non come spesso accade 50+50=100VA.



Questo perché il raddrizzamento delle due semionde avviene alternativamente nei due tratti di avvolgimenti separati dalla presa centrale. Per meglio chiarire ogni avvolgimento 150V viene utilizzato a piena potenza 50VA solo per mezza semionda.

Nel calcolo del trasformatore si considera come se fosse un singolo avvolgimento da 150V 50VA, solo che dal lato pratico vanno avvolti due di questi avvolgimenti identici come numero di spire e sezione filo rame. Occorre perciò valutare bene l'ingombro avvolgimento che risulterà il doppio.

Raddrizzatore Monofase con Filtro di Livellamento: Inserendo a valle del raddrizzatore un filtro livellatore costituito da un Condensatore si riducono le ondulazioni sfruttando l'energia accumulata dalla capacità. Come si può intuire la tensione in uscita dopo il filtro sarà circa uguale al valore di cresta della semionda.

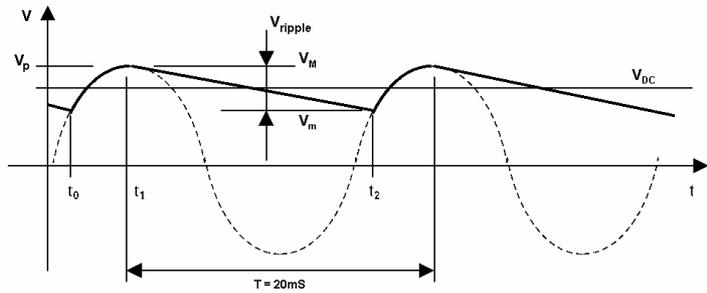
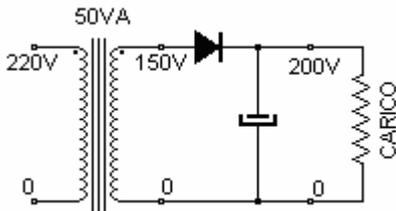


Il Ripple: rappresenta l'ondulazione residua che si viene a creare fra le due semionde che caricano il condensatore. Infatti in questo tratto è il condensatore che con la sua carica immagazzinata alimenta il carico scaricandosi. Di solito è tollerabile un ripple dal 2% al 8% del valore della tensione raddrizzata, ma comunque è bene che sia il minimo possibile.

La tensione continua media è circa a metà della tensione di ripple: $V_O = V_M - \frac{V_{Ripple}}{2}$ (V)

Raddrizzatore monofase a Semionda, Esempio con Diodi al Silicio

Questa configurazione è utilizzata solo per bassissime potenze, praticamente quando serve dare un riferimento di tensione ad un circuito che assorbe correnti di circa 2 - 300mA.



Tensione di picco massima:

$$V_p = V_{ac} \cdot 1,37$$

Tensione reale a vuoto:

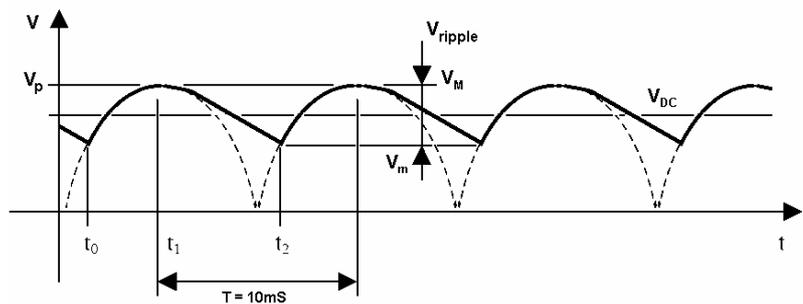
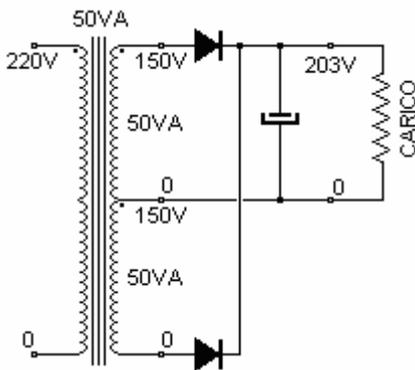
$$V_o = V_{ac} \cdot 1,37$$

Tensione reale a carico, circa:

$$V_o = V_{ac} \cdot 1,33 \text{ (dipende dalla caduta di tensione sul diodo e dal valore della capacità del condensatore)}$$

Raddrizzatore monofase a Doppia Semionda, Esempio con Diodi al Silicio

Questa configurazione è la più utilizzata quando si dispone di un doppio avvolgimento sul trasformatore per utilizzare solo due diodi raddrizzatori.



Tensione di picco massima:

$$V_p = V_{ac} \cdot 1,37$$

Tensione reale a vuoto:

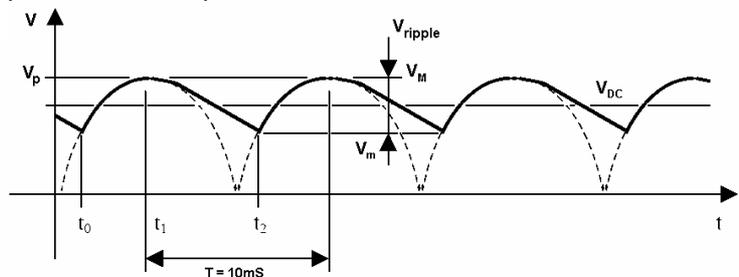
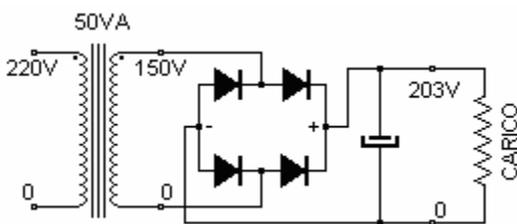
$$V_o = V_{ac} \cdot 1,37$$

Tensione reale a carico, circa:

$$V_o = V_{ac} \cdot 1,35 \text{ (dipende dalla caduta di tensione sul diodo e dal valore della capacità del condensatore)}$$

Raddrizzatore monofase a Ponte di Graetz, Esempio con Diodi al Silicio

Questa configurazione indiscutibilmente la più comune e la più utilizzata.



Tensione di picco massima:

$$V_p = V_{ac} \cdot 1,37$$

Tensione reale a vuoto:

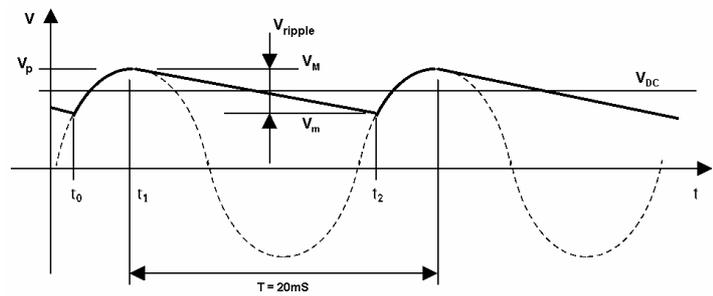
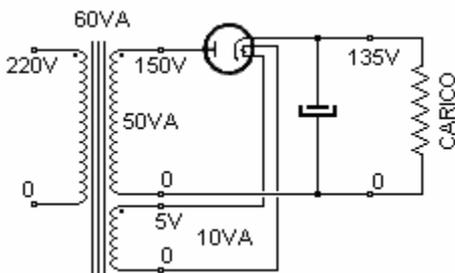
$$V_o = V_{ac} \cdot 1,37$$

Tensione reale a carico, circa:

$$V_o = V_{ac} \cdot 1,35 \text{ (dipende dalla caduta di tensione sul diodo e dal valore della capacità del condensatore)}$$

Raddrizzatore monofase a Semionda, Esempio con Diodi a Vuoto

Questa configurazione è utilizzata solo per bassissime potenze, praticamente quando serve dare un riferimento di tensione ad un circuito che assorbe correnti di circa 2 - 100mA.



Tensione di picco massima:

$$V_p = V_{ac} \cdot 1,37$$

Tensione reale a vuoto:

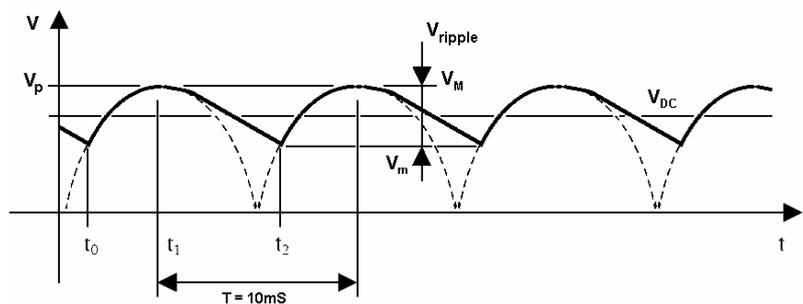
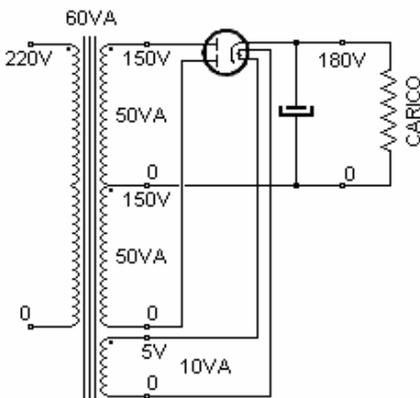
$$V_o = V_{ac} \cdot 1,37$$

Tensione reale a carico, circa:

$$V_o = V_{ac} \cdot 0,9 \text{ (dipende dalla caduta di tensione sul diodo e dal valore della capacità del condensatore)}$$

Raddrizzatore monofase a Doppia Semionda, Esempio con Diodi a Vuoto

Questa configurazione è la più utilizzata quando si dispone di un doppio avvolgimento sul trasformatore per utilizzare solo due diodi raddrizzatori di solito contenuti all'interno della stessa valvola raddrizzatrice.



Tensione di picco massima:

$$V_p = V_{ac} \cdot 1,37$$

Tensione reale a vuoto:

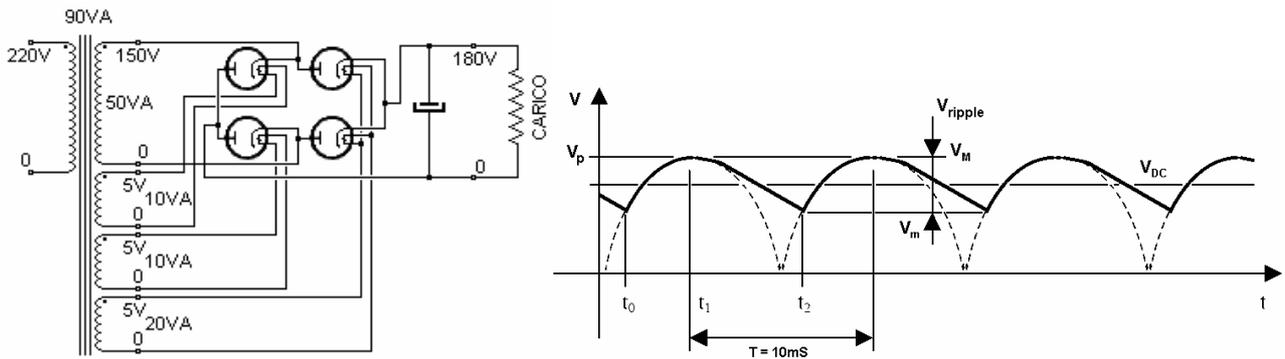
$$V_o = V_{ac} \cdot 1,37$$

Tensione reale a carico, circa:

$$V_o = V_{ac} \cdot 1,2 \text{ (dipende dalla caduta di tensione sul diodo e dal valore della capacità del condensatore)}$$

Raddrizzatore monofase a Ponte di Graetz, Esempio con Diodi a Vuoto

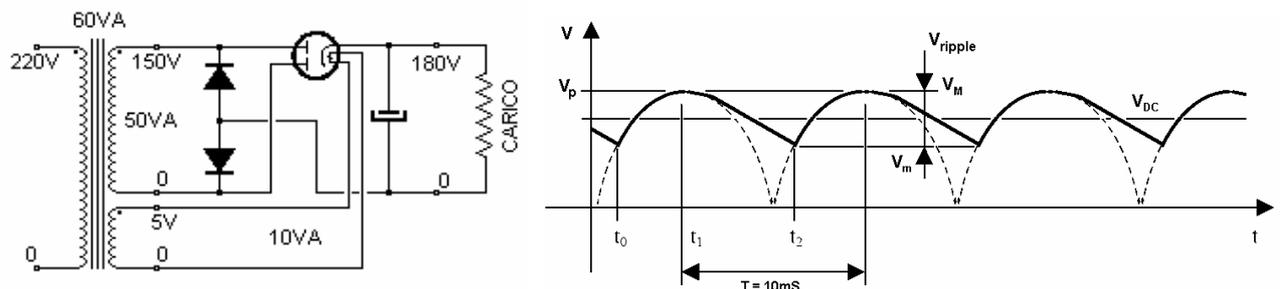
Questa configurazione è scarsamente utilizzata perché richiede un trasformatore di potenza maggiore e tre avvolgimenti dedicati solo per i filamenti delle valvole raddrizzatrici.



- Tensione di picco massima: $V_p = V_{ac} \cdot 1,37$
- Tensione reale a vuoto: $V_o = V_{ac} \cdot 1,37$
- Tensione reale a carico, circa: $V_o = V_{ac} \cdot 1,2$ (dipende dalla caduta di tensione sul diodo e dal valore della capacità del condensatore)

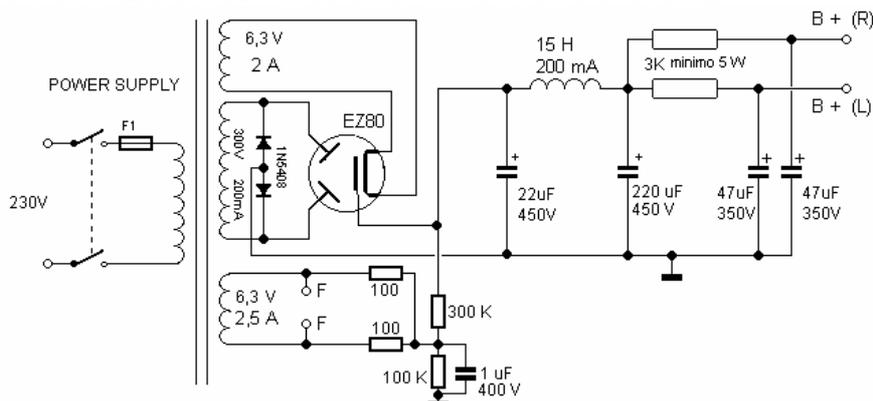
Raddrizzatore monofase a Ponte di Graetz Ibrido, Esempio con Diodi al Silicio e Diodi a Vuoto

Questa configurazione è molto utilizzata quando si dispone di un avvolgimento alta tensione e un avvolgimento dedicato solo per il filamento del diodo a vuoto.



- Tensione di picco massima: $V_p = V_{ac} \cdot 1,37$
- Tensione reale a vuoto: $V_o = V_{ac} \cdot 1,37$
- Tensione reale a carico, circa: $V_o = V_{ac} \cdot 1,2$ (dipende dalla caduta di tensione sul diodo e dal valore della capacità del condensatore)

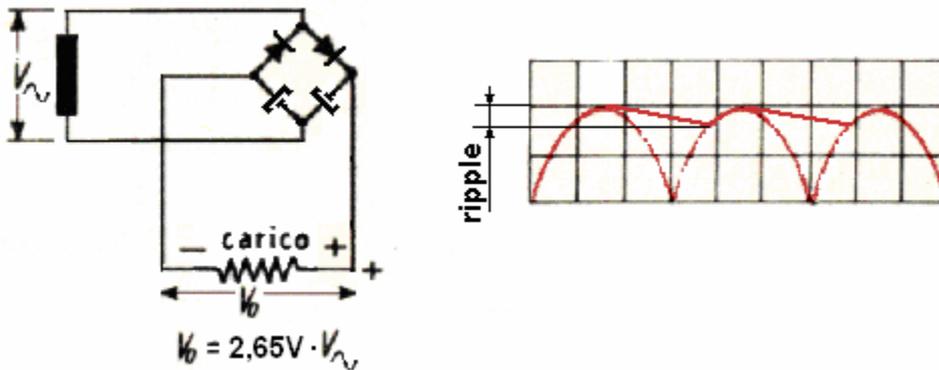
Esempio pratico di Raddrizzatore Ibrido ad onda intera a Ponte di Graetz.



Raddrizzatore monofase a Duplicatore di Tensione, Esempio con Diodi al Silicio

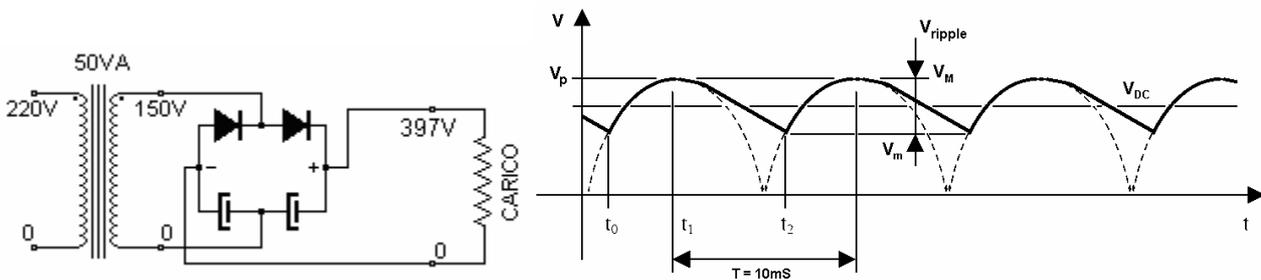
Questa configurazione si utilizza quando si vuole raddoppiare la tensione continua di uscita rispetto all'utilizzo di un raddrizzatore tradizionale.

Si tratta praticamente di un doppio raddrizzatore a semplice semionda.



Di solito si utilizza per l'alimentazione del circuito anodico ad alta tensione delle elettroniche valvolari, che assorbono correnti di circa 2 - 800mA.

La bontà della tensione di uscita dipende tantissimo dal valore di capacità dei condensatori. Infatti, la tensione di uscita varia notevolmente da vuoto a carico (aumento notevole del fattore di Ripple).



- Tensione di picco massima: $V_p = V_{ac} \cdot 2,74$
- Tensione reale a vuoto: $V_o = V_{ac} \cdot 2,74$
- Tensione reale a carico, circa: $V_o = V_{ac} \cdot 2,65$ (dipende dalla caduta di tensione sui diodi e dal valore della capacità dei condensatori)

In tali condizioni vedremo lavorare alternativamente i diodi D1 e D2. Il diodo D1 carica durante la semionda positiva il condensatore C1 mentre il diodo D2 carica durante la semionda negativa il condensatore C2.

Ogni condensatore è sottoposto alla tensione massima $V_p = V_{ac} \cdot 1,37$ così il carico vedrà la tensione $V_o = V_{ac} \cdot 1,37 \cdot 2 = V_{ac} \cdot 2,74$.

Quindi quando si utilizza la configurazione a duplicatore di tensione i diodi lavorano a singola semionda $T = 20mS$ e la capacità che ogni diodo vede è quella del suo rispettivo condensatore C1 o C2.

In uscita le due semionde raddrizzate alternativamente si sovrappongono, per cui la forma d'onda di uscita risulta essere uguale a quella del raddrizzatore a doppia semionda $T = 10mS$

Da notare che la tensione applicata sui singoli condensatori corrisponde alla metà della tensione di uscita.

Dimensionamento del Filtro di Livellamento a Condensatore

Per migliorare la qualità della forma d'onda in uscita del raddrizzatore a diodi bisogna inserire un condensatore di livellamento. Il dimensionamento di questa capacità è legato al valore della corrente erogata sul carico e della tensione di ripple che vogliamo ritenere accettabile. E' evidente che un minimo di tensione di ripple esiste sempre altrimenti per eliminarla completamente occorrerebbe un condensatore di capacità infinita.

Di solito per le alimentazioni dei circuiti anodici valvolari ad alta tensione che erogano correnti di circa 2 - 800mA è accettabile una tensione di ripple dal $\Delta V\% = 2\% - 8\%$ circa. Mentre se si tratta di un alimentatore bassa tensione che deve erogare correnti più alte ci si accontenta di una tensione di ripple dal $\Delta V\% = 5\% - 20\%$ circa. Quindi, possiamo dire che il valore della tensione di ripple che si vuole ritenere accettabile dipende dalle esigenze di servizio.

Di seguito presentiamo un metodo non rigoroso ma semplice e veloce per ottenere tutte le informazioni che servono.

I dati iniziali necessari al dimensionamento sono:

- Valore efficace della tensione alternata $V_{eff} = 230V$
- Potenza massima prelevata ai capi del condensatore $P_L = 500W$
- Ondulazione massima accettabile, in percentuale, sul condensatore $\Delta V\% = 20\%$

Si vuole ricavare:

- Capacità di livellamento C

Per ottenere i risultati in modo pratico e veloce occorre fare alcune approssimazioni. Consideriamo la forma d'onda tipica della tensione ai capi del condensatore di livellamento nelle condizioni di carico.

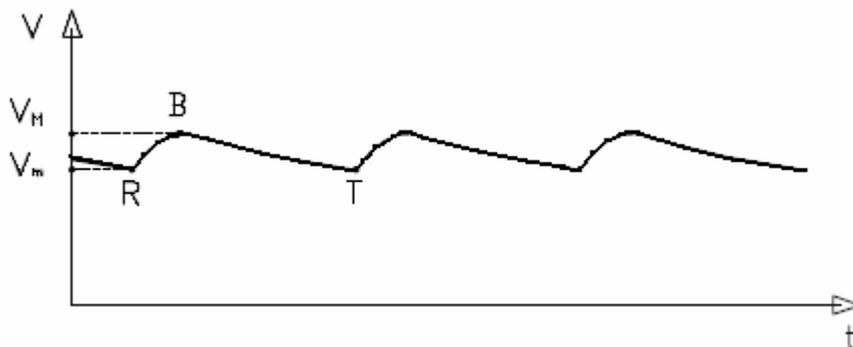


Figura 1

La forma d'onda è costituita da un tratto di cosinusoide R-B ed un tratto di esponenziale B-T, a cui corrisponderà una tensione massima V_M ed una tensione minima V_m .

La tensione massima si ricava applicando la relazione che intercorre tra il valore efficace ed il valore di picco di una forma d'onda sinusoidale, cioè:

$$V_M = V_{eff} \cdot \sqrt{2} \quad (V) \qquad 230 \cdot 1,4142 = 325 V \qquad (1)$$

Tale tensione corrisponde alla massima tensione a cui è sottoposto il condensatore a meno della caduta di tensione sui diodi che è di circa 1V per ogni diodo attraversato dalla corrente di carica, in questo caso è trascurabile.

Per cui ricaviamo la tensione minima sul condensatore togliendo da questa l'ondulazione massima percentuale accettabile (dato di progetto):

$$V_m = V_M \cdot \left(1 - \frac{\Delta V\%}{100}\right) \quad (V) \qquad 325 \cdot \left(1 - \frac{20}{100}\right) = 325 \cdot 0,8 = 260 V \quad (2)$$

Dalla (1), dalla (2) e con la potenza assorbita dal condensatore (dato di progetto), ricaviamo:

La corrente massima sul carico $I_{LM} = \frac{P_L}{V_m} \quad (A) \qquad \frac{500}{260} = 1,92 A \quad (3)$

Resistenza minima di carico $R_{Lm} = \frac{V_m^2}{P_L} \quad (\Omega) \qquad \frac{260^2}{500} = 135,2 \Omega \quad (4)$

Per completezza calcoliamo anche la corrente minima sul carico I_{Lm} :

$$I_{Lm} = \frac{P_L}{V_M} \quad (A) \qquad \frac{500}{325} = 1,54 A \quad (5)$$

Ora facciamo alcune approssimazioni. Il tratto di esponenziale B-T di Fig.1 lo approssimiamo con la retta tangente all'esponenziale nel punto B e lo prolunghiamo fino ad incontrare la perpendicolare in T. Nella Figura 2 tale tratto è rappresentato dal segmento B-E. Poi consideriamo che l'ondulazione massima $V_M - V_m$ sia uguale al segmento D-E. Infine il prolungamento della tangente nel punto B intercetterà l'asse dei tempi nel punto F di Fig.2, così il tratto A-F rappresenta la costante di scarica del complesso resistenza di carico e condensatore di livellamento (6).

costante di scarica $A - F = \tau = R_L \cdot C \quad (6)$

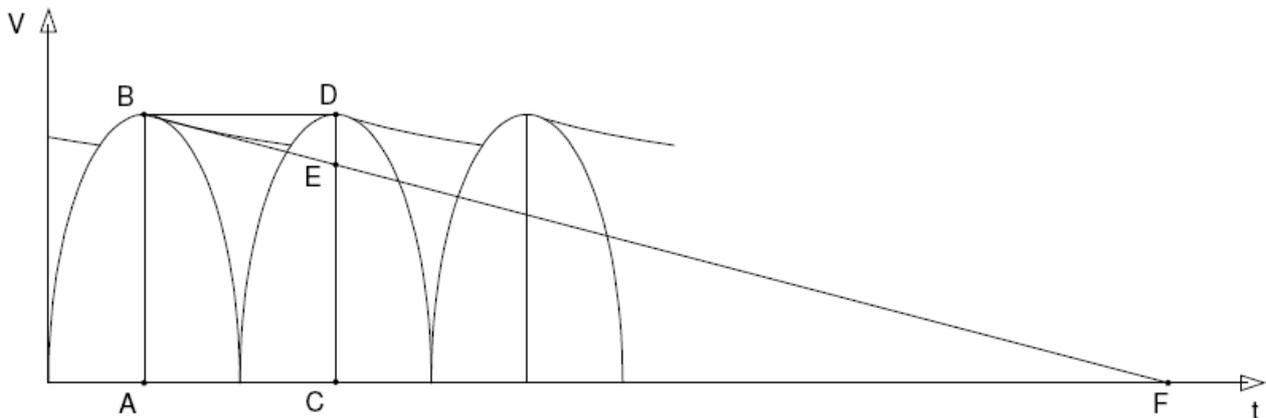


Figura 2

Nella nostra approssimazione abbiamo di fronte due triangoli rettangoli simili: il triangolo BDE ed il triangolo ABF dei quali conosciamo tutti i cateti salvo il cateto A-F. Infatti:

$$A - B = V_M = 325 V \quad (7)$$

$$B - D = A - C = \text{al periodo } T \text{ della forma d'onda raddrizzata, nel nostro caso } 10\text{mS} \quad (8)$$

Se fosse un raddrizzatore a semplice semionda 20mS

$$D - E = V_M - V_m = 325 - 260 = 65 V \quad (9)$$

Applicando la nota regola dei triangoli simili, otterremo che:

$$A - B : D - E = A - F : B - D \quad (10)$$

Dalla (11) è facile ricavare il lato A-F, infatti:

$$A - F = \frac{(A - B) \cdot (B - D)}{(D - E)} \quad (11)$$

Se poi alla (11) sostituiamo i rispettivi valori (6), (7), (8), (9) e consideriamo cautelativamente nella (6) come R_L la resistenza di carico minima R_{Lm} otterremo la capacità di livellamento:

$$C = \frac{V_M \cdot T}{(V_M - V_m) \cdot R_{Lm}} \quad (F) \quad \frac{325 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{65 \cdot 135,2} = 370 \mu F \quad (12)$$

Il primo risultato ottenuto è quindi la capacità di livellamento C che sarà scelta del valore commerciale più grande e vicino a quello ottenuto. Nel caso si usi un solo condensatore si sceglierà $C = 400 \mu F$. Inoltre deve avere la tensione di lavoro superiore alla tensione massima V_M e deve avere un basso valore ESR (resistenza serie) per essere in grado di sostenere le forti correnti di carica.

Dimensionamento dei Diodi del Raddrizzatore

A seguito del calcolo della capacità del condensatore di livellamento nel realizzare un circuito raddrizzatore è importante valutare le tensioni e le correnti in gioco in modo da dimensionare correttamente la scelta del diodo.

Di seguito presentiamo un metodo non rigoroso ma semplice e veloce per ottenere le informazioni che servono.

I dati iniziali necessari al dimensionamento sono:

- Valore della tensione massima $V_M = 325V$
- Valore della tensione minima $V_m = 260V$
- Valore della capacità del condensatore di livellamento $C = 400 \mu F$

Si vuole ricavare:

- Corrente nominale nei diodi I_d
- Corrente massima nei diodi I_{dM}

Per ottenere i risultati in modo pratico e veloce occorre fare alcune approssimazioni. Consideriamo la forma d'onda tipica della tensione ai capi del condensatore di livellamento nelle condizioni di carico.

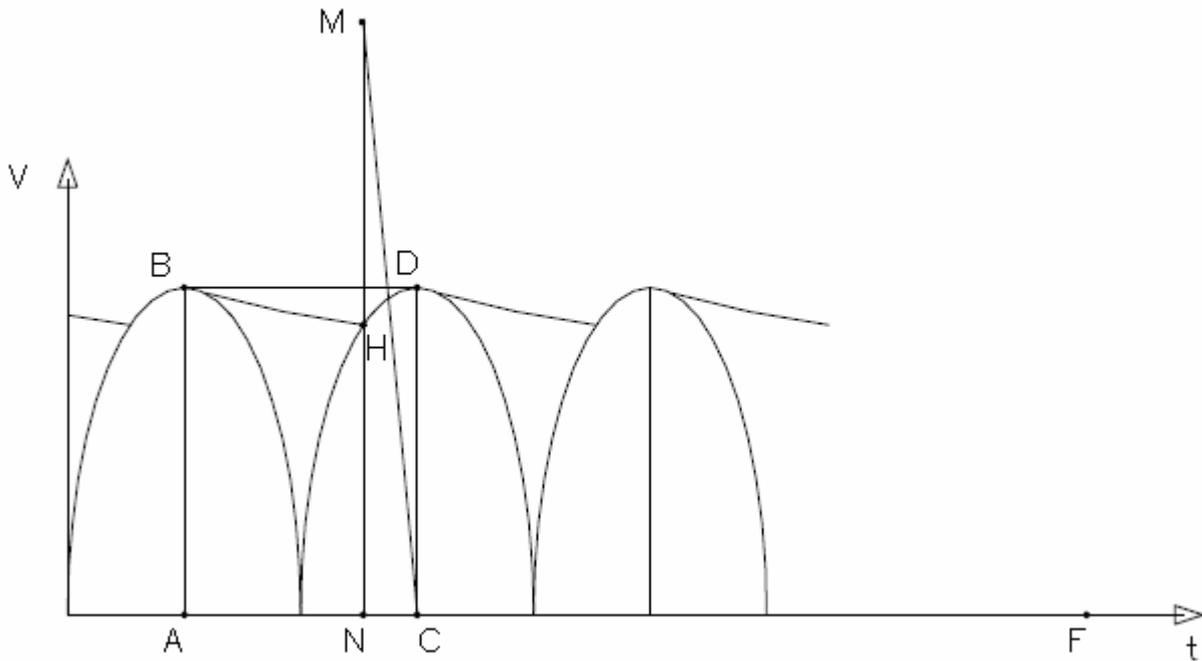


Figura 3

In figura 3, nel periodo di scarica t_{off} rappresentato nel tratto A-N, il condensatore di livellamento C perde la sua carica a causa della corrente prelevata dal carico, che decresce al calare della tensione ai suoi capi. Anche in questo caso la forma d'onda è di tipo esponenziale ed è tracciata in figura con il tratto B-H.

La tensione nel punto B è $V_M = 325V$, mentre nel punto H abbiamo convenuto che fosse $V_m = 260V$.

La variazione di tensione è $V_M - V_m = 65V$, per cui la carica persa dal condensatore è:

$$Q_{off} = C \cdot (V_M - V_m) \quad (C) \qquad 400 \cdot 10^{-6} \cdot 65 = 26 \text{ mC} \qquad (14)$$

La stessa quantità di carica deve essere guadagnata nel tempo di conduzione dei diodi t_{on} che è rappresentato dal tratto N-C.

Il tratto N-C si ricava trovando l'angolo di conduzione e cioè l'angolo il cui la cosinusoide diventa uguale alla tensione minima V_m espresso dal punto H in figura 3.

$$\varphi_{on} = \arccos \cdot \left(\frac{V_m}{V_M} \right) \quad (^\circ) \qquad \arccos \cdot \left(\frac{260}{325} \right) = 36,87^\circ \quad (15)$$

(arccos = inverso del coseno di un numero che equivale al valore dell'angolo in gradi)

Conoscendo il valore dell'angolo, per ottenere il tempo si fa una proporzione

$$180^\circ : \varphi_{on} = T : t_{on} \qquad 180^\circ : 36,87 = 10mS : t_{on} \quad (16)$$

Dalla proporzione ricaviamo il fattore t_{on} :

$$t_{on} = \frac{\varphi_{on} \cdot T}{180} \quad (S) \qquad \frac{36,87 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{180} = 2,04 mS \quad (17)$$

Bilanciando la carica avremo che nel periodo di t_{on} i diodi dovranno erogare la carica rappresentata dall'area sottesa al triangolo NMC che approssima la forma d'onda reale. Per cui la quantità di carica ceduta sarà rappresentata dall'area del triangolo NMC e cioè:

$$Q_{on} = \frac{I_{dM} \cdot t_{on}}{2} \quad (C) \quad (18)$$

Da questa formula si ricava facilmente I_{dM} perché $Q_{on} = Q_{off}$ calcolato in precedenza. Per cui si ha:

$$I_{dM} = \frac{2 \cdot Q_{on}}{t_{on}} = \frac{2 \cdot Q_{off}}{t_{on}} = \frac{2 \cdot C \cdot (V_M - V_m)}{t_{on}} \quad (A) \qquad \frac{2 \cdot 400 \cdot 10^{-6} \cdot 65}{2,04 \cdot 10^{-3}} = 25,49 A \quad (19)$$

La corrente I_{dM} risulta essere quella di picco a cui è sottoposto il diodo ogni periodo T, nel foglio dati dei costruttori di diodi è detta I_{FRM} e si prende in considerazione il valore a 100°C.

Non è però sicuramente quella massima a cui è sottoposto il diodo!

Infatti all'accensione i diodi devono caricare l'intero condensatore di livellamento C e portarlo alla tensione massima. Se ipotizziamo: che l'operazione avvenga durante il primo semiperiodo T/2 e che la forma d'onda sia ancora quella triangolare, potremo calcolare il valore della corrente massima iniziale I_{dMi} nei diodi con la formula (19) del bilancio di carica.

La carica richiesta all'accensione sarà Q_i :

$$Q_i = C \cdot V_M \quad (C) \qquad 400 \cdot 10^{-6} \cdot 325 = 130 mC \quad (20)$$

così la (19) diviene:

$$I_{dMi} = \frac{2 \cdot Q_i}{T} = \frac{4 \cdot Q_i}{T} = \frac{4 \cdot C \cdot V_M}{T} \quad (A) \qquad \frac{4 \cdot 400 \cdot 10^{-6} \cdot 325}{5 \cdot 10^{-3}} = 104 A \quad (21)$$

Il valore di corrente è decisamente rilevante, ma si verifica solo all'accensione e spesso è entro i limiti previsti dal costruttore. Diciamo anche che tale corrente nel foglio dati dei costruttori di diodi è detta I_{FSM} e si tiene in considerazione il valore a 25°C.

Quindi i diodi devono essere scelti:

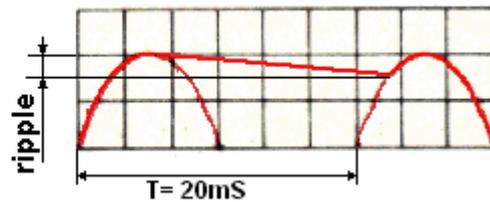
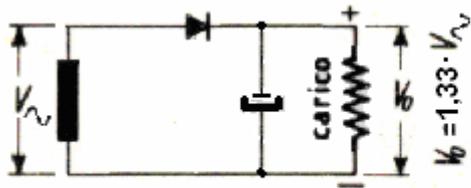
- in grado di sopportare una tensione inversa ripetitiva di almeno $V_{RR} = 400 V$
- in grado di sopportare una corrente media di $I_{LM} = 1,92 A$
- in grado di sopportare una corrente ripetitiva massima di $I_{dM} = 25,49 A$
- in grado di sopportare una corrente di picco non ripetitiva di $I_{dMi} = 104 A$

Per completezza è opportuno controllare il calore generato dai diodi durante il loro funzionamento tramite i grafici forniti dai costruttori e curarne la dissipazione.

Raddrizzatore a Semionda con Filtro di Livellamento a Condensatore, Esempio di Calcolo

Conoscendo la tensione alternata V_{ac} fornita dal trasformatore, calcoliamo quale sarà la tensione continua V_o in uscita sul carico. Calcoliamo il valore della Capacità del condensatore di filtro, le caratteristiche del Diodo Raddrizzatore ed infine la Potenza che dovrà avere il secondario del trasformatore che alimenterà questo circuito.

Per migliorare la qualità della forma d'onda in uscita del raddrizzatore a semplice semionda bisogna valutare la Tensione di ripple che si vuole ritenere accettabile. Prendiamo come esempio dimostrativo un raddrizzatore per l'alimentazione del circuito anodico valvolare ad alta tensione e definiamo accettabile una tensione di ripple di circa $\Delta V\% = 5\%$.



Tensione alternata $V=150Vac$.
Potenza sul carico $P=50VA$.

Tensione massima sul carico:	$V_M = 1,37 \cdot V$ (V)	$1,37 \cdot 150 = 205,5 V$
Tensione minima sul carico	$V_m = V_M \cdot \left(1 - \frac{\Delta V\%}{100}\right)$ (V)	$205,5 \cdot \left(1 - \frac{5}{100}\right) = 195,2 V$
Tensione di ripple	$V_{Ripple} = V_M - V_m$ (V)	$205,5 - 195,2 = 10,3 V$
Tensione media sul carico:	$V_O = V_M - \frac{V_{Ripple}}{2}$ (V)	$205,5 - \frac{10,3}{2} = 200 V$ circa
Corrente massima sul carico:	$I_{LM} = \frac{P}{V_m}$ (A)	$\frac{50}{195,2} = 0,256 A$
Resistenza minima del carico:	$R_{Lm} = \frac{V_m^2}{P_L}$ (Ω)	$\frac{195,2^2}{50} = 762 \Omega$
Capacità Condensatore	$C = \frac{V_M \cdot T}{(V_M - V_m) \cdot R_{Lm}}$ (F)	$\frac{205,5 \cdot 20 \cdot 10^{-3}}{(205,5 - 195,2) \cdot 762} = 523 \mu F$

La capacità del condensatore di livellamento verrà scelta del valore commerciale più vicino a quello calcolato. In questo caso si sceglierà un condensatore con capacità $500 \mu F$ e con tensione di lavoro più grande e vicino a quello alla quale è sottoposto $250 V$.

Adesso facendo alcuni semplici calcoli cerchiamo di valutare quali caratteristiche deve avere il diodo:

$$\varphi_{on} = \arccos \cdot \left(\frac{V_m}{V_M} \right) \quad (^\circ) \qquad \arccos \cdot \left(\frac{195,2}{205,5} \right) = 18,22^\circ$$

$$t_{on} = \frac{\varphi_{on} \cdot T}{180} \quad (S) \qquad \frac{18,22 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{180} = 1,01 \text{ mS}$$

La corrente I_{dM} di picco a cui è sottoposto il diodo ogni periodo T

$$I_{dM} = \frac{2 \cdot C \cdot (V_M - V_m)}{t_{on}} \quad (A) \qquad \frac{2 \cdot 500 \cdot 10^{-6} \cdot 10,3}{1,01 \cdot 10^{-3}} = 10 \text{ A}$$

La corrente massima iniziale I_{dMi} nei diodi sarà:

$$I_{dMi} = \frac{4 \cdot C \cdot V_M}{T} \quad (A) \qquad \frac{4 \cdot 500 \cdot 10^{-6} \cdot 205,5}{5 \cdot 10^{-3}} = 82 \text{ A}$$

Quindi il diodo deve essere scelto:

- in grado di sopportare una tensione inversa ripetitiva di almeno $V_{RR} = 250 \text{ V}$
- in grado di sopportare una corrente media di $I_m = \frac{P}{V} = \frac{50}{150} = 0,333 \text{ A}$
- in grado di sopportare una corrente ripetitiva massima di $I_{dM} = 10 \text{ A}$
- in grado di sopportare una corrente di picco non ripetitiva di $I_{dMi} = 82 \text{ A}$

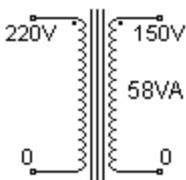
Per completezza è opportuno controllare il calore generato dai diodi durante il loro funzionamento tramite i grafici forniti dai costruttori e curarne la dissipazione.

Tutto questo ci fa capire perché il valore della tensione continua di uscita V_O può assumere valori che vanno dalla tensione minima V_m alla tensione massima V_M , dipende dal valore della capacità del condensatore e dalla caduta di tensione sul diodo, ma potrebbe subire anche un ulteriore abbassamento di tensione se il trasformatore di alimentazione non è correttamente dimensionato (cioè quando si verifica un notevole assorbimento di corrente ne consegue un notevole abbassamento di tensione).

La potenza del trasformatore che alimenta questo circuito raddrizzatore deve essere più grande e vicina a quella calcolata considerando la tensione massima raddrizzata e la corrente massima erogata:

$$P_{Trasfo} = V_M \cdot I_{LM} \quad (VA) \qquad 205,5 \cdot 0,256 = 52,6 \text{ VA}$$

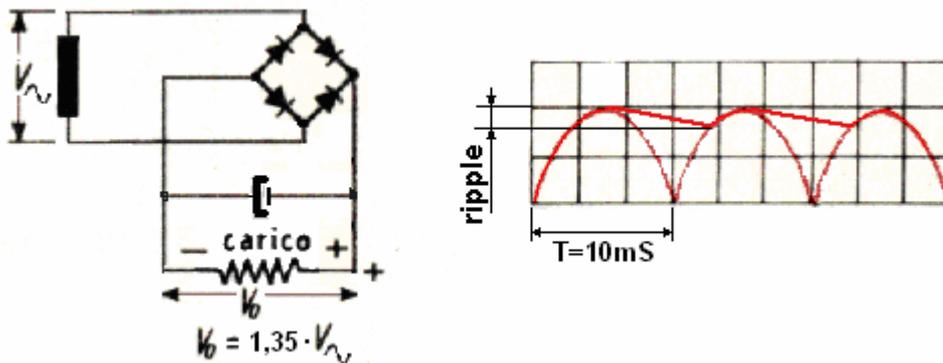
Per cui nel trasformatore che alimenta questo raddrizzatore dimensioniamo un avvolgimento secondario con tensione 150V e con potenza di circa 58VA.



Raddrizzatore a Doppia Semionda con Filtro di Livellamento a Condensatore, Esempio di Calcolo

Conoscendo la tensione alternata V_{ac} fornita dal trasformatore, calcoliamo quale sarà la tensione continua V_o in uscita sul carico. Calcoliamo il valore della Capacità del condensatore di filtro, le caratteristiche del Diodo Raddrizzatore ed infine la Potenza che dovrà avere il secondario del trasformatore che alimenterà questo circuito.

Per migliorare la qualità della forma d'onda in uscita del raddrizzatore doppia semionda bisogna valutare la Tensione di ripple che si vuole ritenere accettabile. Prendiamo come esempio dimostrativo un raddrizzatore per l'alimentazione del circuito anodico valvolare ad alta tensione e definiamo accettabile una tensione di ripple di circa $\Delta V\% = 5\%$.



Tensione alternata $V=150Vac$.
Potenza sul carico $P=50VA$.

Tensione massima sul carico:	$V_M = 1,37 \cdot V \quad (V)$	$1,37 \cdot 150 = 205,5 V$
Tensione minima sul carico	$V_m = V_M \cdot \left(1 - \frac{\Delta V\%}{100}\right) \quad (V)$	$205,5 \cdot \left(1 - \frac{5}{100}\right) = 195,2 V$
Tensione di ripple	$V_{Ripple} = V_M - V_m \quad (V)$	$205,5 - 195,2 = 10,3 V$
Tensione media sul carico:	$V_O = V_M - \frac{V_{Ripple}}{2} \quad (V)$	$205,5 - \frac{10,3}{2} = 200 V \text{ circa}$
Corrente massima sul carico:	$I_{LM} = \frac{P}{V_m} \quad (A)$	$\frac{50}{195,2} = 0,256 A$
Resistenza minima del carico:	$R_{Lm} = \frac{V_m^2}{P_L} \quad (\Omega)$	$\frac{195,2^2}{50} = 762 \Omega$
Capacità Condensatore	$C = \frac{V_M \cdot T}{(V_M - V_m) \cdot R_{Lm}} \quad (F)$	$\frac{205,5 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{(205,5 - 195,2) \cdot 762} = 262 \mu F$

La capacità del condensatore di livellamento verrà scelta del valore commerciale più vicino a quello calcolato. In questo caso si sceglierà un condensatore con capacità $250 \mu F$ e con tensione di lavoro più grande e vicino a quello alla quale è sottoposto $250 V$.

Adesso facendo alcuni semplici calcoli cerchiamo di valutare quali caratteristiche deve avere il diodo:

$$\varphi_{on} = \arccos \cdot \left(\frac{V_m}{V_M} \right) \quad (^\circ) \qquad \arccos \cdot \left(\frac{195,2}{205,5} \right) = 18,22^\circ$$

$$t_{on} = \frac{\varphi_{on} \cdot T}{180} \quad (S) \qquad \frac{18,22 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{180} = 1,01 \text{ mS}$$

La corrente I_{dM} di picco a cui è sottoposto il diodo ogni periodo T

$$I_{dM} = \frac{2 \cdot C \cdot (V_M - V_m)}{t_{on}} \quad (A) \qquad \frac{2 \cdot 250 \cdot 10^{-6} \cdot 10,3}{1,01 \cdot 10^{-3}} = 5 \text{ A}$$

La corrente massima iniziale I_{dMi} nei diodi sarà:

$$I_{dMi} = \frac{4 \cdot C \cdot V_M}{T} \quad (A) \qquad \frac{4 \cdot 250 \cdot 10^{-6} \cdot 205,5}{5 \cdot 10^{-3}} = 41 \text{ A}$$

Quindi i diodi devono essere scelti:

- in grado di sopportare una tensione inversa ripetitiva di almeno $V_{RR} = 250 \text{ V}$
- in grado di sopportare una corrente media di $I_m = \frac{P}{V} = \frac{50}{150} = 0,333 \text{ A}$
- in grado di sopportare una corrente ripetitiva massima di $I_{dM} = 5 \text{ A}$
- in grado di sopportare una corrente di picco non ripetitiva di $I_{dMi} = 41 \text{ A}$

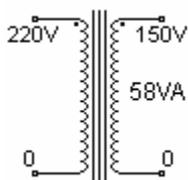
Per completezza è opportuno controllare il calore generato dai diodi durante il loro funzionamento tramite i grafici forniti dai costruttori e curarne la dissipazione.

Tutto questo ci fa capire perché il valore della tensione continua di uscita V_O può assumere valori che vanno dalla tensione minima V_m alla tensione massima V_M , dipende dal valore della capacità del condensatore e dalla caduta di tensione sul diodo, ma potrebbe subire anche un ulteriore abbassamento di tensione se il trasformatore di alimentazione non è correttamente dimensionato (cioè quando si verifica un notevole assorbimento di corrente ne consegue un notevole abbassamento di tensione).

La potenza del trasformatore che alimenta questo circuito raddrizzatore deve essere più grande e vicina a quella calcolata considerando la tensione massima raddrizzata e la corrente massima erogata:

$$P_{Trasfo} = V_M \cdot I_{LM} \quad (VA) \qquad 205,5 \cdot 0,256 = 52,6 \text{ VA}$$

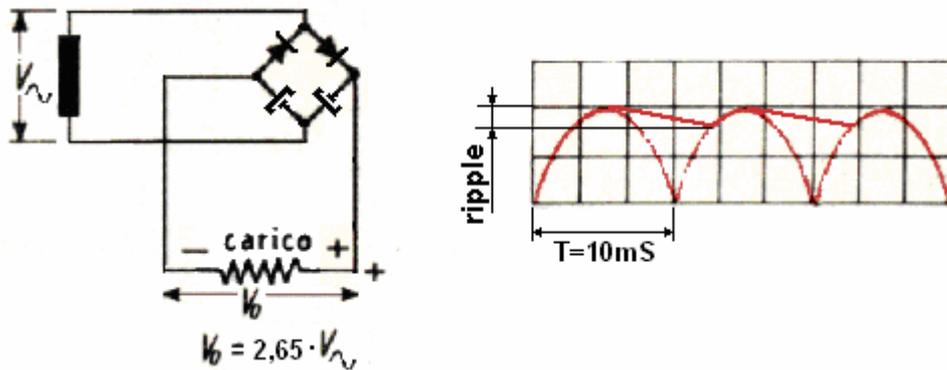
Per cui nel trasformatore che alimenta questo raddrizzatore dimensioniamo un avvolgimento secondario con tensione 150V e con potenza di circa 58VA.



Raddrizzatore a Duplicatore di Tensione, calcolo dei Condensatori, Esempio di Calcolo

Conoscendo la tensione alternata V_{ac} fornita dal trasformatore, calcoliamo quale sarà la tensione continua V_o in uscita sul carico. Calcoliamo il valore della Capacità del condensatore, le caratteristiche del Diodo Raddrizzatore ed infine la Potenza che dovrà avere il secondario del trasformatore che alimenterà questo circuito.

Il filtro di livellamento è già inglobato nella configurazione a duplicatore di tensione. Praticamente di si tratta di un doppio raddrizzatore a semplice semionda. Prendiamo come esempio dimostrativo un raddrizzatore per l'alimentazione del circuito anodico valvolare ad alta tensione e definiamo accettabile una tensione di ripple di circa $\Delta V\% = 5\%$.



Tensione alternata $V=150Vac$.
Potenza sul carico $P=50VA$.

Tensione massima sul carico:	$V_M = 2,74 \cdot V$ (V)	$2,74 \cdot 150 = 411V$
Tensione minima sul carico	$V_m = V_M \cdot \left(1 - \frac{\Delta V\%}{100}\right)$ (V)	$411 \cdot \left(1 - \frac{5}{100}\right) = 390V$
Tensione di ripple	$V_{Ripple} = V_M - V_m$ (V)	$411 - 390 = 21V$
Tensione media sul carico:	$V_O = V_M - \frac{V_{Ripple}}{2}$ (V)	$411 - \frac{21}{2} = 400V$ circa
Corrente massima sul carico:	$I_{LM} = \frac{P}{V_m}$ (A)	$\frac{50}{390} = 0,128A$
Resistenza minima del carico:	$R_{Lm} = \frac{V_m^2}{P_L}$ (Ω)	$\frac{390^2}{50} = 3042\Omega$
Capacità Condensatore	$C = \frac{V_M \cdot T}{(V_M - V_m) \cdot R_{Lm}}$ (F)	$\frac{411 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{(411 - 390) \cdot 3042} = 64\mu F$

Il carico vede ai suoi capi due condensatori in serie, per cui il valore della capacità del singolo condensatore sarà:
 $C = 2 \cdot 64 = 128\mu F$

La capacità del condensatore di livellamento verrà scelta del valore commerciale più vicino a quello calcolato. In questo caso di sceglierà un condensatore con capacità $100\mu F$ e con tensione di lavoro più grande e vicino a quello alla quale è sottoposto $250V$.

Infatti è da notare che la tensione applicata sui singoli condensatori corrisponde alla metà della tensione di uscita.

Il singolo diodo è interessato solo per la semionda il cui valore massimo corrisponde a metà della tensione di uscita:

$$V_M = \frac{V_M}{2} = \frac{411}{2} = 205,5 V$$

$$V_m = \frac{V_m}{2} = \frac{390}{2} = 195 V$$

Adesso facendo alcuni semplici calcoli cerchiamo di valutare quali caratteristiche deve avere il diodo:

$$\varphi_{on} = \arccos\left(\frac{V_m}{V_M}\right) \quad (^\circ)$$

$$\arccos\left(\frac{195}{205,5}\right) = 18,39^\circ$$

$$t_{on} = \frac{\varphi_{on} \cdot T}{180} \quad (S)$$

$$\frac{18,39 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{180} = 1,02 \text{ mS}$$

La corrente I_{dM} di picco a cui è sottoposto il diodo ogni periodo T

$$I_{dM} = \frac{2 \cdot C \cdot (V_M - V_m)}{t_{on}} \quad (A)$$

$$\frac{2 \cdot 100 \cdot 10^{-6} \cdot (205,5 - 195)}{1,02 \cdot 10^{-3}} = 2 A$$

La corrente massima iniziale I_{dMi} nei diodi sarà:

$$I_{dMi} = \frac{4 \cdot C \cdot V_M}{\frac{T}{2}} \quad (A)$$

$$\frac{4 \cdot 100 \cdot 10^{-6} \cdot 205,5}{5 \cdot 10^{-3}} = 16 A$$

Quindi i diodi devono essere scelti:

- in grado di sopportare una tensione inversa ripetitiva di almeno $V_{RR} = 250 V$
- in grado di sopportare una corrente media di $I_m = \frac{P}{V} = \frac{50}{150} = 0,333 A$
- in grado di sopportare una corrente ripetitiva massima di $I_{dM} = 2 A$
- in grado di sopportare una corrente di picco non ripetitiva di $I_{dMi} = 16 A$

Per completezza è opportuno controllare il calore generato dai diodi durante il loro funzionamento tramite i grafici forniti dai costruttori e curarne la dissipazione.

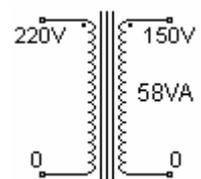
Tutto questo ci fa capire perché il valore della tensione continua di uscita V_O può assumere valori che vanno dalla tensione minima V_m alla tensione massima V_M , dipende dal valore della capacità del condensatore e dalla caduta di tensione sul diodo, ma potrebbe subire anche un ulteriore abbassamento di tensione se il trasformatore di alimentazione non è correttamente dimensionato (cioè quando si verifica un notevole assorbimento di corrente ne consegue un notevole abbassamento di tensione).

La potenza del trasformatore che alimenta questo circuito raddrizzatore deve essere più grande e vicina a quella calcolata considerando la tensione massima raddrizzata e la corrente massima erogata:

$$P_{Trasfo} = V_M \cdot I_{LM} \quad (VA)$$

$$411 \cdot 0,128 = 52,6 VA$$

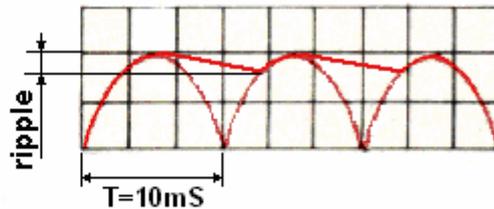
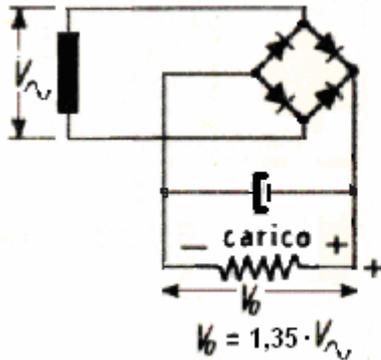
Per cui nel trasformatore che alimenta questo raddrizzatore dimensioniamo un avvolgimento secondario con tensione 150V e con potenza di circa 58VA.



Esempio di calcolo inverso per raddrizzatore a Doppia Semionda con Filtro di Livellamento a Condensatore

Per non ripetere la stessa filastrocca in riferimento ad ogni configurazione di raddrizzatore rappresentiamo solo questa con Ponte di Graetz.

Conoscendo la tensione alternata V_{ac} fornita dal trasformatore, calcoliamo quale sarà il valore del Ripple% e il valore della tensione continua V_o in uscita sul carico.

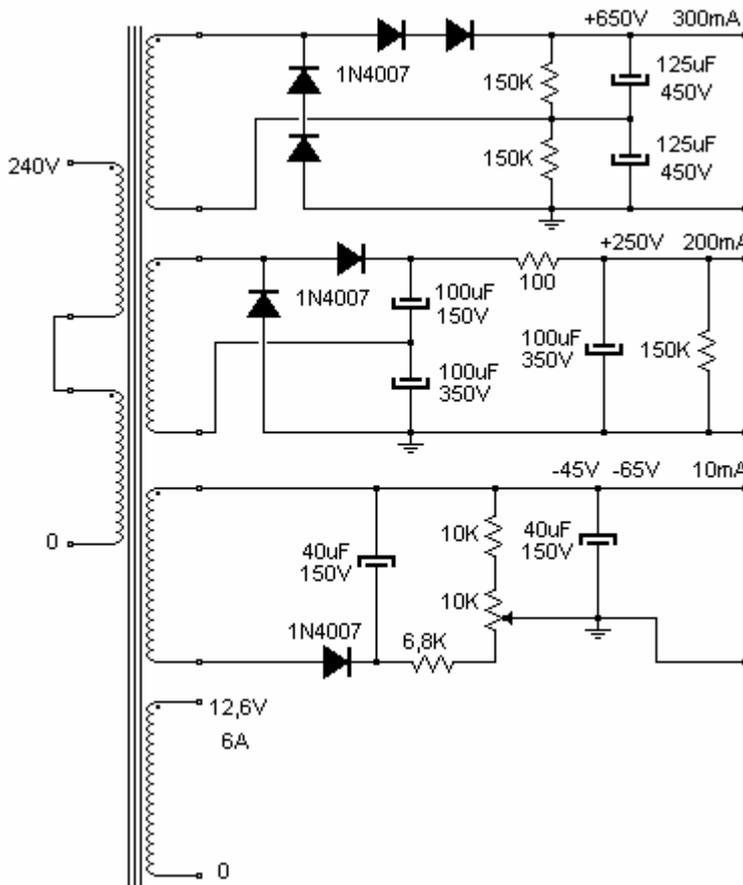


Tensione alternata $V=150Vac$.
 Resistenza di carico $R_{Lm} = 762 \Omega$
 Condensatore da $C = 262 \mu F$

Tensione massima sul carico:	$V_M = 1,37 \cdot V \quad (V)$	$1,37 \cdot 150 = 205,5 V$
Tensione di Ripple:	$V_{Ripple} = \frac{V_M \cdot T}{C \cdot R_{Lm}} \quad (V)$	$\frac{205,5 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{262 \cdot 10^{-6} \cdot 762} = 10,3 V$
Tensione minima sul carico:	$V_m = V_M - V_{Ripple} \quad (V)$	$205,5 - 10,3 = 195,2 V$
Tensione di Ripple %	$\Delta V \% = \left(1 - \frac{V_m}{V_M}\right) \cdot 100 \quad (\%)$	$\left(1 - \frac{195,2}{205,5}\right) \cdot 100 = 5 \%$
Corrente massima sul carico:	$I_{LM} = \frac{V_m}{R_{Lm}} \quad (A)$	$\frac{195,2}{762} = 0,256 A$
Tensione media sul carico:	$V_O = V_M - \frac{V_{Ripple}}{2} \quad (V)$	$205,5 - \frac{10,3}{2} = 200 V \text{ circa}$

Simulazione pratica della tensione continua sul carico

Quando si vuole trovare la giusta tensione dell'avvolgimento secondario del trasformatore nel caso in cui alimenta un circuito raddrizzatore complesso questo metodo pratico ci risolve molti problemi evitando totalmente una certa mole di calcoli. Si tratta di una simulazione reale del carico perciò si può



utilizzare anche per conferma prima di realizzare il trasformatore con abbinato un raddrizzatore.

Nell'esempio pratico che viene proposto si vuole trovare la giusta tensione alternata degli avvolgimenti secondari del trasformatore in figura partendo dalla conosciuta tensione continua che desideriamo sul carico.

Le prove di laboratorio vengono eseguite utilizzando:

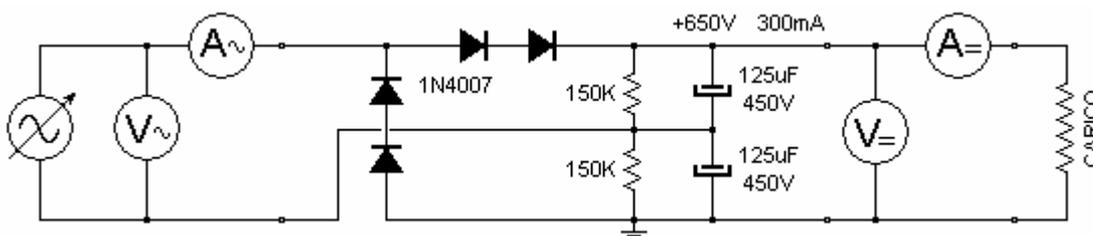
- un Variac (trasformatore variabile)
- un Voltmetro per la misura della tensione alternata $V \sim$
- un Amperometro per la misura della corrente alternata $A \sim$
- un Voltmetro per la misura della tensione continua $V =$
- un Amperometro per la misura della corrente continua $A =$
- un carico resistivo di idoneo valore ohmico e di potenza adeguata R_L .

Con questo circuito è possibile fare le dovute prove su tutti i circuiti raddrizzatori al fine di trovare la giusta tensione $V =$ e corrente $A =$ sul carico, agendo sulla sorgente di tensione alternata regolabile Variac.

Dopodiché si legge la tensione $V \sim$ e la corrente $A \sim$ che ci permetteranno di calcolare adeguatamente l'avvolgimento secondario del trasformatore

Studio pratico del circuito alimentazione Alta Tensione 650Vcc (a Duplicatore di Tensione)

Realizzare in laboratorio il circuito raddrizzatore completo con diodi, condensatori, resistenze e carico.



$$\text{Resistenza di Carico } R = \frac{V}{I} = \frac{650}{0,3} = 2166 \Omega \quad \text{Potenza } P = R \cdot I^2 = 2166 \cdot 0,3^2 = 195 W$$

per cui utilizziamo come carico una resistenza da 2200Ω 200W.

Partendo da 0V ruotiamo la manopola del Variac aumentando la tensione fino a leggere la tensione continua di uscita $V =$ del valore richiesto, circa 650V = , controlliamo che la corrente continua $A =$ sia quella richiesta, circa 300mA.

Di seguito leggiamo la tensione alternata $V \sim = 240V \sim$ e la relativa corrente $A \sim = 0,9A \sim$

Potenza sul carico $P = V \cdot I \quad (W) \qquad 650 \cdot 0,3 = 195 W$

Corrente sul Trasformatore $I = \frac{P}{V} \quad (A) \qquad \frac{195}{240} = 0,812 A$

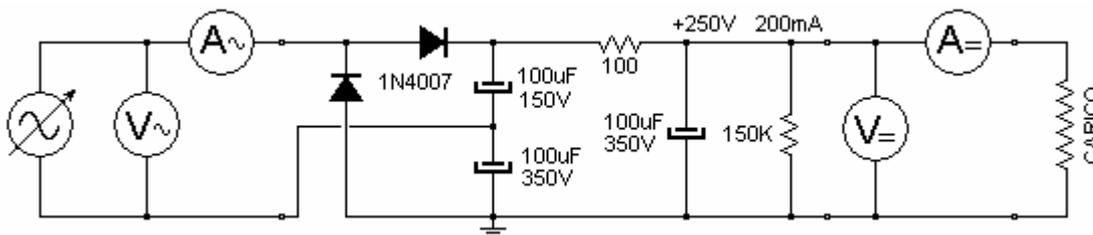
Nel calcolo dell'avvolgimento secondario del trasformatore è sempre buona norma aumentare un po' la corrente che dovrà fornire con lo scopo di evitare futuri sovraccarichi con la conseguenza di abbassamenti di tensione.

Quindi la tensione e la corrente alternata dell'avvolgimento secondario del trasformatore sarà:

$240V \sim \quad 1A \qquad P_T = V \cdot I = 240 \cdot 1 = 240 VA$

Studio pratico del circuito alimentazione Alta Tensione 250Vcc (a Duplicatore di Tensione)

Realizzare in laboratorio il circuito raddrizzatore completo con diodi, condensatori, resistenze e carico.



Resistenza di Carico $R = \frac{V}{I} \quad \frac{250}{0,2} = 1250 \Omega$ Potenza $P = R \cdot I^2 \quad 1250 \cdot 0,2^2 = 50 W$

per cui utilizziamo come carico una resistenza da 1200Ω 50W.

Partendo da 0V ruotiamo la manopola del Variac aumentando la tensione fino a leggere la tensione continua di uscita $V =$ del valore richiesto, circa 250V = , controlliamo che la corrente continua sia quella richiesta, circa 200mA.

Di seguito leggiamo la tensione alternata $V \sim = 95V \sim$ e la relativa corrente $A \sim = 0,55A \sim$

Potenza sul carico $P = V \cdot I \quad (W) \qquad 250 \cdot 0,2 = 50 W$

Corrente sul Trasformatore $I = \frac{P}{V} \quad (A) \qquad \frac{50}{95} = 0,526 A$

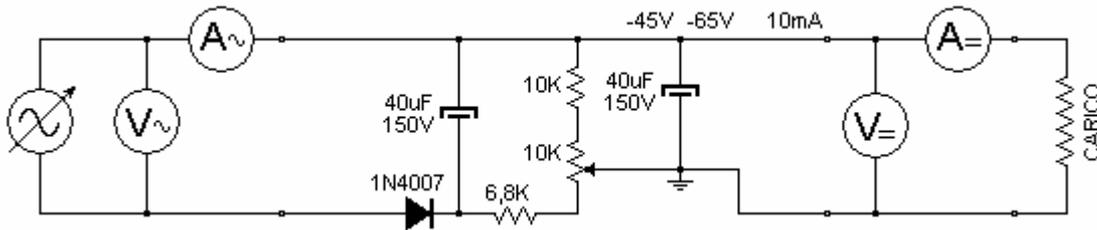
Nel calcolo dell'avvolgimento secondario del trasformatore è sempre buona norma aumentare un po' la corrente che dovrà fornire con lo scopo di evitare futuri sovraccarichi con la conseguenza di abbassamenti di tensione.

Quindi la tensione e la corrente alternata dell'avvolgimento secondario del trasformatore sarà:

$95V \sim \quad 0,6A \qquad P_T = V \cdot I = 95 \cdot 0,6 = 57 VA$ che possiamo arrotondare a 60 VA

Studio pratico del circuito alimentazione BIAS -45 ÷ -65Vcc (a semplice semionda)

Realizzare in laboratorio il circuito raddrizzatore completo con diodi, condensatori, resistenze e carico.



Quindi con la tensione continua maggiore si ha:

$$\text{Resistenza di Carico} \quad R = \frac{V}{I} = \frac{65}{0,01} = 6500 \Omega \quad \text{Potenza} \quad P = R \cdot I^2 = 6500 \cdot 0,01^2 = 0,65 \text{ W}$$

per cui utilizziamo come carico una resistenza da 6800Ω 1W.

Ruotiamo il potenziometro 10K in modo da avere la tensione massima; Partendo da 0Volt ruotiamo la manopola del Variac aumentando la tensione fino a leggere la tensione continua di uscita $V =$ di un valore un po' superiore di quella richiesta, circa $70V =$; Adesso leggiamo la tensione alternata $V \sim = 110V \sim$ e la relativa corrente $A \sim = 0,01A \sim$

$$\text{Potenza sul carico} \quad P = V \cdot I \quad (\text{W}) \quad 70 \cdot 0,01 = 0,7 \text{ W}$$

$$\text{Corrente sul Trasformatore} \quad I = \frac{P}{V} \quad (\text{A}) \quad \frac{0,7}{110} = 0,006 \text{ A}$$

Nel calcolo dell'avvolgimento secondario del trasformatore è sempre buona norma aumentare un po' la corrente che dovrà fornire con lo scopo di evitare futuri sovraccarichi con la conseguenza di abbassamenti di tensione. Quando si è di fronte a circuiti con correnti molto basse di solito conviene non scendere sotto 100mA.

Quindi la tensione e la corrente alternata dell'avvolgimento secondario del trasformatore sarà:

$$110V \sim \quad 0,1 \text{ A} \quad P_T = V \cdot I = 110 \cdot 0,1 = 11 \text{ VA} \quad \text{che possiamo arrotondare a } 20 \text{ VA}$$

Studio pratico del circuito alimentazione 12,6Vac

Questo circuito non alimenta nessun particolare circuito complesso. Per cui non sono necessarie prove di simulazione di carico.

Nel calcolo dell'avvolgimento secondario del trasformatore è sempre buona norma aumentare un po' la corrente che dovrà fornire con lo scopo di evitare futuri sovraccarichi con la conseguenza di abbassamenti di tensione.

Quindi la tensione e la corrente alternata dell'avvolgimento secondario del trasformatore sarà:

$$12,6V \sim \quad 6 \text{ A} \quad P_T = V \cdot I = 12,6 \cdot 6 = 75,6 \text{ VA} \quad \text{che possiamo arrotondare a } 80 \text{ VA}$$

Riassumendo, si può dire che, in totale si dovrà realizzare un trasformatore da 400VA.

Dimensionamento di un Trasformatore Monofase

Il dimensionamento di una qualsiasi macchina elettrica richiede non solo una profonda conoscenza di tutti i problemi ad essa connessi, ma anche notevole esperienza. Quest'ultima si acquisisce dopo una lunga pratica di ufficio tecnico ed in particolare da un costante esame critico delle costruzioni precedenti. E' per questo motivo che ogni azienda conserva accuratamente tutti i dati relativi alle proprie costruzioni e che giustamente considera come inestimabile patrimonio di una attività svolta in un lungo arco di tempo. In questa descrizione ci si limita a fornire qualche indicazione sul dimensionamento dei trasformatori di piccola potenza, monofasi e trifasi in aria, al fine di inquadrare il problema nei suoi termini generali.

Elementi da prefissare

Conoscendo i seguenti dati di partenza è possibile calcolare un trasformatore in aria:

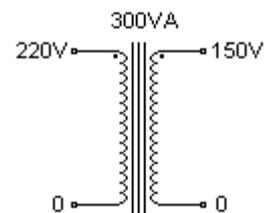
$P_2 = 300$ potenza al secondario in voltampere VA.

$f = 50$ frequenza alla quale dovrà funzionare il trasformatore in Hz.

$V_1 = 220$ tensione alimentazione dell'avvolgimento primario in V.

$V_2 = 150$ tensione che dovrà fornire l'avvolgimento secondario a pieno carico in V.

$B = 1$ Induzione Magnetica in Wb/m² alla quale si vuole far funzionare il trasformatore.



Formato Lamierino

Tramite questa formula pratica si può trovare la superficie totale del Lamierino più adatto:

$$A \times B = 80 \cdot \sqrt{\frac{P_2}{B \cdot f}} \quad (cm^2) \qquad A \times B = 80 \cdot \sqrt{\frac{300}{1 \cdot 50}} = 195,9 \, cm^2$$

Dal valore di $A \times B$ ottenuto, utilizzando le formule specifiche del lamierino da noi scelto (vedi tabelle lamierini) si ricava la misura della colonna centrale C , di seguito tutte le altre quote del lamierino.

Dalla Tabella Lamierini scelgo questo lamierino con le seguenti misure:

$A \times B (cm^2)$	$A (mm)$	$B (mm)$	$C (mm)$	$D (mm)$	$E (mm)$	$F (mm)$	$G (mm)$	Tipo	$Gf (Kg/1cm)$
187,5	125	150	50	25	75	25	25	EI150	1,149

Sezione del Nucleo

Il valore della Sezione Nucleo Ferromagnetico si calcola in funzione del coefficiente di dimensionamento K_d e della potenza secondaria.

$$S_{fe} = K_d \cdot \sqrt{P_2} \quad (cm^2) \qquad S_{fe} = 1,3 \cdot \sqrt{300} = 22,5 \, cm^2$$

Dalla Sezione del Nucleo Ferromagnetico e dalla dimensione C del lamierino si ricava lo Spessore del pacco di lamierini, tenendo in considerazione anche il coefficiente di stipamento lamierini K_s .

$$S_p = \frac{S_{fe}}{C} \cdot K_s \quad (cm) \qquad S_p = \frac{22,5}{5} \cdot 1,11 = 5 \, cm$$

Conoscendo le misure del lamierino e dello spessore pacco è necessario trovare un rocchetto di idonee dimensioni. Da un catalogo scelgo un rocchetto in plastica con le seguenti misure:

$Cr=51mm$	$Spr=51mm$	$M=23mm$	$H=72mm$
-----------	------------	----------	----------

Lo spazio disponibile che offre questo rocchetto per ospitare gli avvolgimenti è dato da:

$$S_{disp} = H \cdot M \quad (mm^2) \qquad S_{disp} = 72 \cdot 23 = 1656 \, mm^2$$

Scelto il tipo di lamierino, scelto lo spessore del nucleo ferromagnetico scelto il rocchetto adatto alle nostre esigenze, è opportuno aggiornare i calcoli:

$$S_{fe} = \frac{Sp \cdot C}{K_s} \quad (cm^2)$$

$$S_{fe} = \frac{5 \cdot 5}{1,11} = 22,5 \text{ cm}^2$$

Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro

Conoscendo lo spessore del singolo lamierino $sl=0,5mm$, e lo spessore del pacco lamellare Sp :

$$N_L = \frac{Sp}{K_s \cdot sl} \quad (\text{lamierini})$$

$$N_L = \frac{5}{1,11 \cdot 0,05} = 90 \text{ lamierini}$$

Considerando il peso di un centimetro di spessore di pacco lamellare Gf calcolo il peso totale del pacco lamellare:

$$Gl = Gf \cdot Sp \quad (Kg)$$

$$Gl = 1,149 \cdot 5 = 5,745 \text{ Kg}$$

Conoscendo la cifra di perdita specifica del lamierino $ws = 3W/Kg$ si possono valutare le perdite nel ferro pf del nucleo ferromagnetico:

$$pf = B^2 \cdot ws \cdot Gl \quad (\text{watt})$$

$$pf = 1^2 \cdot 3 \cdot 5,743 = 17,23 \text{ watt}$$

Numero Spire

La valutazione del numero delle spire dell'avvolgimento primario e secondario si effettua in relazione ai volt per spira:

$$e = 4,44 \cdot f \cdot S_{fe} \cdot B \cdot 10^{-4} \quad (V)$$

$$e = 4,44 \cdot 50 \cdot 22,5 \cdot 1 \cdot 10^{-4} = 0,4995V$$

Al secondario si verifica una caduta di tensione % in relazione alla potenza del trasformatore:

$$v\% = \frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{P_2}{2} + 2,72\right)\right)^{1,35}} \quad (\%)$$

$$\frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{300}{2} + 2,72\right)\right)^{1,35}} = 4,5 \quad (\%)$$

Si può pertanto scrivere la relazione relativa alla tensione secondaria a vuoto:

$$V_{20} = \left(1 + \frac{v\%}{100}\right) \cdot V_2 \quad (V)$$

$$V_{20} = \left(1 + \frac{4,5}{100}\right) \cdot 150 = 156,8V$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento primario:

$$N_1 = \frac{V_1}{e} \quad (\text{spire})$$

$$N_1 = \frac{220}{0,4995} = 440 \text{ spire}$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento secondario, considerando la tensione secondaria a vuoto:

$$N_2 = \frac{V_{20}}{e} \quad (\text{spire})$$

$$N_2 = \frac{156,8}{0,4995} = 314 \text{ spire}$$

Corrente primario e secondario

Il trasformatore in relazione alla potenza assume un certo valore indicativo di rendimento:

$$\eta = 60 + \left(\frac{\log_e (P_2 + 1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (P_2 + 1000)}\right) \quad (\%)$$

$$60 + \left(\frac{\log_e (300 + 1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (300 + 1000)}\right) = 89,3 \quad (\%)$$

Calcolo la corrente assorbita dal primario

$$I_1 = \frac{P_2}{\eta \cdot V_1} \quad (A)$$

$$I_1 = \frac{300}{0,893 \cdot 220} = 1,527 \text{ A}$$

Calcolo la massima corrente che può fornire il secondario

$$I_2 = \frac{P_2}{V_2} \quad (A)$$

$$I_2 = \frac{300}{150} = 2 \text{ A}$$

Diametro dei Conduttori

Dalla corrente e dalla densità di corrente si trova il diametro del filo di rame nudo, poi dalla tabella filo rame si sceglie il valore più prossimo.

$$\phi_r = 2 \cdot \sqrt{\frac{I}{J \cdot \pi}} \quad (mm) \quad \phi_{r_1} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1,527}{2,5 \cdot \pi}} = 0,88 \quad (mm) \quad \phi_{r_2} = 2 \cdot \sqrt{\frac{2}{2,5 \cdot \pi}} = 1 \quad (mm)$$

Dalla tabella Filo Rame scelgo questi fili con le seguenti misure:

Diametro Filo Nudo ϕ_N (mm)	Diametro Filo Isolato ϕ_I (mm)	Sezione filo rame nudo S_f (mm ²)	n° di Spire in 1 cm di spazio N_{spcm}	Coefficien. di Riempimento K_f	Resistenza di 1m di filo R_f (Ω)	Peso di 1m di filo di rame P_f (gr/m)
0,8	0,87	0,5027	10,33	1,11	0,0350	4,4736
1	1,08	0,7854	8,33	1,11	0,0224	6,9900

Lunghezza Filo Avvolgimento e Peso del Rame

La lunghezza della spira media attorno al rocchetto è:

$$l_{spm} = 2 \cdot (Cr + M) + 2 \cdot (Spr + M) \quad (mm) \quad l_{spm} = 2 \cdot (51 + 23) + 2 \cdot (51 + 23) = 296 \quad mm$$

La lunghezza totale del filo dell'avvolgimento in relazione al numero di spire:

$$l_{avv} = l_{spm} \cdot N \cdot 10^{-3} \quad (m) \quad l_{avv1} = 296 \cdot 440 \cdot 10^{-3} = 130 \quad m$$

$$l_{avv2} = 296 \cdot 314 \cdot 10^{-3} = 93 \quad m$$

Considerando il peso di un metro di filo di rame P_f calcolo il peso rame totale degli avvolgimenti:

$$Gr = P_f \cdot l_{avv} \cdot 10^{-3} \quad (Kg)$$

$$Gr_1 = 4,4736 \cdot 130 \cdot 10^{-3} = 0,5815 \quad Kg$$

$$Gr_2 = 6,990 \cdot 93 \cdot 10^{-3} = 0,650 \quad Kg$$

Resistenza degli avvolgimenti

Considerando la resistenza di un metro di filo di rame R_f calcolo la resistenza totale degli avvolgimenti:

$$R = R_f \cdot l_{avv} \quad (\Omega)$$

$$R_1 = 0,0350 \cdot 130 = 4,55 \quad \Omega$$

$$R_2 = 0,0224 \cdot 93 = 2,08 \quad \Omega$$

Perdite nel Rame

Determiniamo il nuovo valore di densità di corrente in relazione al filo utilizzato, poi conoscendo il peso del rame avvolgimento calcoliamo la potenza persa nel rame.

$$J = \frac{A}{S_f} \quad (A/mm^2)$$

$$J_1 = \frac{1,527}{0,5027} = 3 \quad A/mm^2$$

$$J_2 = \frac{2}{0,7854} = 2,5 \quad A/mm^2$$

In relazione ai conduttori scelti la densità di corrente rientra nei limiti stabiliti, per cui si procede con il calcolo della potenza persa nel rame:

$$pr = 2,4 \cdot J^2 \cdot Gr \quad (watt)$$

$$pr_1 = 2,4 \cdot 3^2 \cdot 0,581 = 12,5 \quad watt$$

$$pr_2 = 2,4 \cdot 2,5^2 \cdot 0,65 = 9,7 \quad watt$$

Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento

La tabella filo rame fornisce anche il numero delle spire che possono essere contenute assialmente in un centimetro N_{spcm} .

In base all'altezza H della finestra del rocchetto si può stabilire quante spire stanno in uno strato:

$$S_{Str} = H \cdot N_{spcm} \quad (spire \cdot strato)$$

$$S_{Str1} = 7,2 \cdot 10,33 = 74,3 \quad spire \cdot strato$$

$$S_{Str2} = 7,2 \cdot 8,33 = 59,9 \quad spire \cdot strato$$

Considerando le spire totali si possono calcolare anche il numero degli strati necessari

$$N_{Str} = \frac{N}{S_{Str}} \quad (strati)$$

$$N_{Str1} = \frac{440}{74,3} = 5,92 \quad strati$$

$$N_{Str2} = \frac{314}{59,9} = 5,2 \quad strati$$

Controllo Ingombri

Calcoliamo l'Ingombro Rame considerando il diametro filo rame isolato come se fosse di sezione quadrata in modo da tenere conto anche degli spazi d'aria fra spira e spira, che moltiplichiamo per il numero di spire e per il coefficiente di riempimento K_f che tiene conto di una certa tolleranza nell'esecuzione dell'avvolgimento.

$$Ing_R = \phi_i^2 \cdot N \cdot K_f \quad (mm^2) \qquad Ing_{R1} = 0,87^2 \cdot 440 \cdot 1,11 = 370 mm^2$$

$$Ing_{R2} = 1,08^2 \cdot 314 \cdot 1,11 = 406 mm^2$$

Totale Ingombro Rame

$$Ing_{Rtot} = \sum Ing_{Rx} \quad (mm^2) \qquad Ing_{Rtot} = 370 + 406 = 776 mm^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Strati. Supponendo di interporre fra ogni strato di spire un cartoncino isolante di spessore $I_{st}=0,2mm$,

$$Ing_{IST} = I_{ST} \cdot H \cdot \text{int}(N_{Str}) \quad (mm^2) \qquad Ing_{IST1} = 0,2 \cdot 72 \cdot (5) = 72 mm^2$$

$$Ing_{IST2} = 0,2 \cdot 72 \cdot (5) = 72 mm^2$$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Strati:

$$Ing_{ISTtot} = \sum Ing_{ISTx} \quad (mm^2) \qquad Ing_{ISTtot} = 72 + 72 = 144 mm^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti. Terminata la costruzione alla fine di tutti gli avvolgimenti e fra un avvolgimento e l'altro supponiamo di inserire un cartoncino isolante di spessore $I_{av}=0,5mm$.

$$Ing_{IAV} = I_{AV} \cdot H \quad (mm^2) \qquad Ing_{IAV} = 0,5 \cdot 72 = 36 mm^2$$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti:

Essendo $n^\circ AVV$ il numero di avvolgimenti primari e secondari che compongono il trasformatore.

$$Ing_{IAVtot} = Ing_{IAV} \cdot n^\circ AVV \quad (mm^2) \qquad Ing_{IAVtot} = 36 \cdot 2 = 72 mm^2$$

Calcoliamo l'ingombro totale maggiorandolo di un coefficiente di ingombro percentuale $K_i=10\%$ che tiene conto delle imperfezioni nella realizzazione dell'avvolgimento e degli eventuali spazi d'aria.

$$Ing_{TOT} = Ing_{Rtot} + Ing_{ISTtot} + Ing_{IAVtot} \cdot \left(1 + \frac{K_i\%}{100}\right) \quad (mm^2)$$

$$Ing_{TOT} = 776 + 144 + 72 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) = 1091 mm^2$$

Il valore dell'ingombro totale è minore dello spazio offerto dal rocchetto, quindi gli avvolgimenti saranno contenuti nel rocchetto comodamente.

Verifica controllo, rendimento e caduta di tensione

Verifica del Rendimento % considerando le eventuali perdite calcolate:

$$\eta\% = \frac{P}{P + pf + pr} \cdot 100 \quad (\%)$$

$$\eta = \frac{300}{300 + 17,23 + 12,5 + 9,7} \cdot 100 = 88\%$$

Calcolo della caduta di tensione secondaria considerando le eventuali perdite calcolate:

$$v2 = \frac{pr_1 \cdot N_2}{I_1 \cdot N_1} + \frac{pr_2}{I_2} \quad (V)$$

$$v2 = \frac{12,5 \cdot 314}{1,527 \cdot 440} + \frac{9,7}{2} = 10,7 V$$

Calcolo della tensione secondaria a carico:

$$V_c = V_{20} - v2 \quad (V)$$

$$V_c = 156,8 - 10,7 = 146 V$$

Verifica della Caduta di Tensione %:

$$v\% = \frac{V_2 - V_c}{V_c} \cdot 100 \quad (\%)$$

$$v\% = \frac{150 - 146}{146} \cdot 100 = 2,7\%$$

Concludendo possiamo dire che il rendimento e la caduta di tensione % si discostano di poco rispetto ai valori calcolati in precedenza.

Comunque lo scopo di queste ultime verifiche è quello di capire se il dimensionamento del trasformatore è corretto, ed eventualmente se ne è il caso, correggere alcuni parametri in modo da rientrare con un rendimento e una c.d.t.% pressappoco nei valori previsti.

Dimensionamento di un AutoTrasformatore Monofase

Sono trasformatori nei quali primario e secondario sono riuniti in un solo avvolgimento, del quale una parte rimane comune al primario ed al secondario. La porzione di avvolgimento che appartiene soltanto al primario (o soltanto al secondario) è denominata parte serie (N_s), mentre quella in comune si dice parte derivazione (N_d). L'autotrasformatore può essere abbassatore o elevatore a differenza se dalla tensione di alimentazione presa come riferimento si ricava in uscita una tensione più bassa o più alta. Possiamo anche affermare che l'autotrasformatore è un trasformatore realizzato da un unico avvolgimento che si può considerare come la risultante della sovrapposizione dell'avvolgimento primario all'avvolgimento secondario.

Per gli autotrasformatori si considerano due potenze:

- Potenza passante P_2 Questa potenza riguarda l'impiego dell'autotrasformatore rappresenta la potenza nominale dell'autotrasformatore. Tale potenza è data come per i trasformatori dal prodotto della tensione per la corrente.
- Potenza propria P_p Questa potenza riguarda il costruttore ed è in base a tale potenza che si dimensiona il nucleo ferromagnetico del trasformatore. Rappresenta la potenza che avrebbe un trasformatore ad avvolgimenti separati avente uguali dimensioni dell'autotrasformatore. Tale potenza è data dal prodotto della potenza passante per il fattore di riduzione

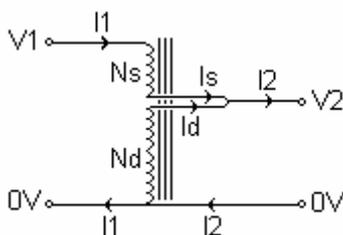
Fattore di Riduzione K_r

Il rapporto che c'è fra la potenza passante P_2 e la potenza propria P_p definisce il "fattore di riduzione" (K_r), il quale rappresenta la dimensione che avrà l'autotrasformatore.

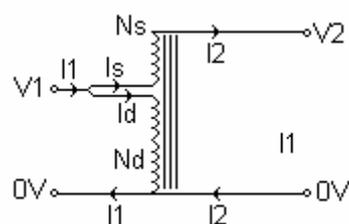
Il "fattore di riduzione" è un numero compreso da 0 a 1, questo dipende dalla differenza fra le due tensioni, quella primaria e quella secondaria a vuoto e viceversa dipende se l'autotrasformatore è abbassatore o elevatore. Se i valori delle due tensioni sono assai prossimi fra loro K_r assumerà un valore prossimo a zero. Ne consegue che tanto più piccolo è il fattore di riduzione tanto più alta sarà la potenza passante P_2 rispetto alla potenza propria P_p .

È chiaro che se la differenza fra le tensioni è minima si otterrà un K_r basso e di conseguenza una potenza propria P_p molto bassa dalla quale si ricava un nucleo ferromagnetico piccolissimo fatto di lamierini inesistenti e con avvolgimenti che non potranno essere contenuti all'interno delle finestre lamierino. Quindi materialmente e praticamente irrealizzabile.

Di norma autotrasformatori con potenza propria P_p inferiore ai 10VA non si realizzano. Come non conviene realizzare autotrasformatori quando il rapporto fra le tensioni di ingresso V_1 e di uscita V_2 è superiore a tre.



Autotrasformatore Abbassatore



Autotrasformatore Elevatore

Le correnti che interessano il calcolo dell'autotrasformatore sono la corrente che attraversa la sola parte di avvolgimento in serie I_s e la corrente che circolerà nel tratto di avvolgimento che rimane in comune al primario e secondario definita corrente di derivazione I_d che è data dalla differenza fra la corrente maggiore meno la corrente minore.

- Nel caso di Autotrasformatore Abbassatore:
 La corrente in serie I_s corrisponde alla corrente del primario I_1 .
 La tensione dell'avvolgimento N_s sarà $V_s = V_1 - V_2$.
 La corrente di derivazione è uguale alla differenza fra le correnti $I_d = I_2 - I_1$.
 La tensione dell'avvolgimento N_d sarà uguale alla V_2 .
- Nel caso di Autotrasformatore Elevatore:
 La corrente in serie I_s corrisponde alla corrente del secondario I_2 .
 La tensione dell'avvolgimento N_s sarà uguale alla V_2 .
 La corrente di derivazione è uguale alla differenza fra le correnti $I_d = I_1 - I_2$.
 La tensione dell'avvolgimento N_d sarà $V_d = V_2 - V_1$.

Il numero spire degli avvolgimenti che interessano il calcolo dell'autotrasformatore sono l'avvolgimento che appartiene solo al primario (o secondario se elevatore) che viene denominata l'avvolgimento serie N_s e l'avvolgimento che rimane in comune sia al primario che al secondario è definito avvolgimento di derivazione N_d .

- Nel caso di Autotrasformatore Abbassatore:
 L'avvolgimento in serie sarà composto da $N_s = N_1 - N_2$ spire
 L'avvolgimento di derivazione sarà composto da $N_d = N_2$ spire
- Nel caso di Autotrasformatore Elevatore:
 L'avvolgimento in serie sarà composto da $N_s = N_2 - N_1$ spire
 L'avvolgimento di derivazione sarà composto da $N_d = N_1$ spire

Ricordiamo che trascurando le perdite le amperspire dell'avvolgimento primario sono sempre uguali alle amperspire dell'avvolgimento secondario, sapendo che $A_{sp} = N \cdot I$ per cui:

nel globale si può scrivere che $N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2$ (A_{sp}).

ma anche per le singole parti di avvolgimento si può scrivere che $N_s \cdot I_s = N_d \cdot I_d$ (A_{sp}).

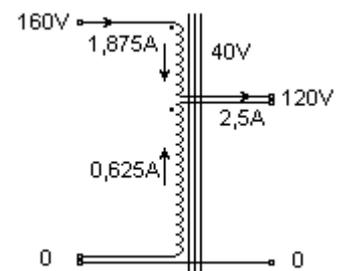
Considerazioni teoriche sull'Autotrasformatore

Per capire meglio l'autotrasformatore facciamo un esempio pratico (trascurando le eventuali perdite) in cui mettiamo in evidenza i principi basilari da tenere in considerazione per la costruzione di un autotrasformatore.

Progettiamo un Autotrasformatore abbassatore 160V / 120V 300VA.

La corrente assorbita dalla linea e la corrente secondaria risultano:

$$I = \frac{P}{V} \qquad I_1 = \frac{300}{160} = 1,875 \text{ A} \qquad I_2 = \frac{300}{120} = 2,5 \text{ A}$$



Verifichiamo che la potenza assorbita dalla linea deve essere uguale alla potenza resa al secondario, la quale rappresenta la Potenza Passante P_2 :

$$V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2 \qquad 160 \cdot 1,875 = 120 \cdot 2,5 = 300VA$$

La potenza nell'avvolgimento serie N_s deve essere uguale alla potenza nell'avvolgimento in derivazione N_d , la quale rappresenta la potenza interna dell'autotrasformatore detta Potenza Propria P_p :

$$(V_1 - V_2) \cdot I_1 = V_2 \cdot (I_2 - I_1) \qquad 40 \cdot 1,875 = 120 \cdot 0,625 = 75VA$$

Il rapporto fra le tensioni ci fornisce il Coefficiente di Riduzione K_r dal quale si ricava la Potenza Propria dell'autotrasformatore:

$$K_r = \frac{V_H - V_L}{V_H} \qquad \frac{160 - 120}{160} = 0,25$$

$$P_p = K_r \cdot P_2 \qquad 0,25 \cdot 300 = 75VA$$

Si può affermare che l'autotrasformatore da 300VA con rapporto 160V/120V equivale ad un trasformatore della potenza di 75VA con rapporto 120V/40V con gli avvolgimenti collegati in serie. Di solito l'autotrasformatore si definisce in base alla sua potenza passante P_2 e non in base alla potenza propria P_p . Infatti la Potenza Propria P_p riguarda solo il costruttore e sarebbe complessa da definire quando l'autotrasformatore avesse più prese (come descritto nel capitolo successivo).

Tramite questa formula pratica si può trovare la superficie totale del Lamierino più adatto:

$$A \times B = 80 \cdot \sqrt{\frac{P_p}{B \cdot f}} \quad (cm^2) \qquad A \times B = 80 \cdot \sqrt{\frac{75}{1 \cdot 50}} = 97,98 cm^2$$

Dal valore di $A \times B$ ottenuto, utilizzando le formule specifiche del lamierino da noi scelto (vedi tabelle lamierini) si ricava la misura della colonna centrale C , di seguito tutte le altre quote del lamierino.

Dalla Tabella Lamierini scelgo questo lamierino con le seguenti misure:

AxB(cm ²)	A(mm)	B(mm)	C(mm)	D(mm)	E(mm)	F(mm)	G(mm)	Tipo	Gf(Kg/1cm)
97,2	90	108	36	18	54	18	18	EI108	0,595

Il valore della Sezione Nucleo Ferromagnetico si calcola in funzione del coefficiente di dimensionamento K_d e della potenza propria.

$$S_{fe} = K_d \cdot \sqrt{P_p} \quad (cm^2) \qquad S_{fe} = 1,3 \cdot \sqrt{75} = 11,258 cm^2$$

Dalla Sezione del Nucleo Ferromagnetico e dalla dimensione C del lamierino si ricava lo Spessore del pacco di lamierini, tenendo in considerazione anche il coefficiente di stipamento lamierini K_s .

$$S_p = \frac{S_{fe}}{C} \cdot K_s \quad (cm) \qquad S_p = \frac{11,258}{3,6} \cdot 1,11 = 3,47 cm$$

Conoscendo le misure del lamierino e dello spessore pacco è necessario trovare un rocchetto di idonee dimensioni. Da un catalogo scelgo un rocchetto in plastica con le seguenti misure:

Cr=37mm	Spr=37mm	M=16mm	H=51mm
---------	----------	--------	--------

Scelto il tipo di lamierino, scelto lo spessore del nucleo ferromagnetico scelto il rocchetto adatto alle nostre esigenze, è opportuno aggiornare i calcoli:

$$S_{fe} = \frac{S_p \cdot C}{K_s} \quad (cm^2) \qquad S_{fe} = \frac{3,6 \cdot 3,6}{1,11} = 11,67 cm^2$$

La valutazione del numero delle spire dell'avvolgimento primario e secondario si effettua in relazione ai volt per spira:

$$e = 4,44 \cdot f \cdot S_{fe} \cdot B \cdot 10^{-4} \quad (V) \qquad e = 4,44 \cdot 50 \cdot 11,67 \cdot 1 \cdot 10^{-4} = 0,259 V$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento primario

$$N_1 = \frac{V_1}{e} \quad (spire) \qquad N_1 = \frac{160}{0,259} = 618 spire$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento secondario, considerando la tensione secondaria a vuoto

$$N_2 = \frac{V_{20}}{e} \quad (spire) \qquad N_2 = \frac{120}{0,259} = 463 spire$$

Essendo un Autotrasformatore Abbassatore calcoliamo N_s e N_d :

$$N_s = N_1 - N_2 \qquad N_s = 618 - 463 = 155 spire$$

$$N_d = N_2 \qquad N_d = 463 spire$$

Verifica che il valore degli Amperspira primario agli Amperspira secondario:

$$N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2 \quad (Asp) \qquad 618 \cdot 1,875 = 463 \cdot 2,5 = 1158 Asp$$

Verifica che il valore degli Amperspira sia uguale in tutti gli avvolgimenti:

$$N_s \cdot I_s = N_d \cdot I_d \quad (Asp) \qquad 155 \cdot 1,875 = 463 \cdot 0,625 = 290 Asp$$

Considerazioni teoriche sull'Autotrasformatore Multipresa

Analizziamo ora un autotrasformatore con più rapporti di tensione. Per capire meglio questo tipo di autotrasformatore facciamo un esempio pratico (trascurando le eventuali perdite) in cui mettiamo in evidenza i principi basilari da tenere in considerazione per la sua costruzione.

Progettiamo un Autotrasformatore abbassatore / elevatore con tensione di alimentazione 160V e due prese secondarie di 220V e 120V, ambedue in grado di erogare, non simultaneamente, una potenza di 400VA.

Le due prese secondarie dividono l'intero avvolgimento in tre parti che chiameremo A B C. Questo autotrasformatore presenta due funzionamenti possibili:

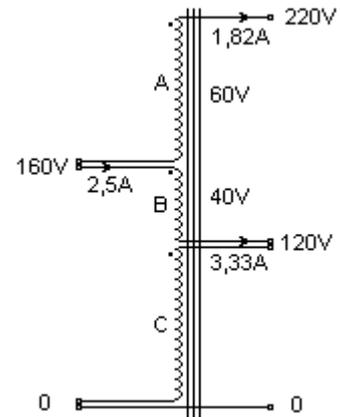
I°, alimentato dalla presa 160V fornisce energia dal secondario 220V;

II°, alimentato dalla presa 160V fornisce energia dal secondario 120V.

Nei due funzionamenti i valori delle correnti massime di ogni parte di avvolgimento A B C moltiplicati per le rispettive tensioni parziali ci danno tre valori di potenza PA PB e PC la cui semisomma corrisponderà alla potenza propria Pp in base alla quale viene dimensionato l'autotrasformatore.

Per il calcolo delle sezioni dei conduttori con cui realizzare gli avvolgimenti A B C che compongono tutto l'autotrasformatore è opportuno preparare una tabella delle correnti considerando i diversi funzionamenti uno alla volta. I valori massimi di corrente per ogni singolo avvolgimento servono a determinare la sezione più opportuna del conduttore di rame smaltato da utilizzare.

Consideriamo separatamente i due funzionamenti possibili, trascurando per semplicità le eventuali perdite, analizziamo



I° funzionamento, 160V / 220V 400VA;

Il rapporto fra le tensioni ci fornisce il Coefficiente di Riduzione Kr dal quale si ricava la Potenza Propria dell'autotrasformatore:

$$Kr = \frac{V_H - V_L}{V_H} \qquad \frac{220 - 160}{220} = 0,2727$$

$$Pp = Kr \cdot P_2 \qquad 0,2727 \cdot 400 = 109 \text{ VA}$$

La corrente assorbita dalla linea e la corrente secondaria risultano:

$$I = \frac{P}{V} \qquad I_1 = \frac{400}{160} = 2,5 \text{ A} \qquad I_2 = \frac{400}{220} = 1,82 \text{ A}$$

La parte di avvolgimento A (avvolgimento serie) è attraversato da una corrente di 1,82A e sottoposto a una tensione di 60V.

La parte di avvolgimento B (avvolgimento in derivazione) è attraversato da una corrente di 2,5 - 1,82 = 0,68 A e sottoposto a una tensione di 40V.

La parte di avvolgimento C (avvolgimento in derivazione) è attraversato da una corrente di 2,5 - 1,82 = 0,68 A e sottoposto a una tensione di 120V.

In questo funzionamento la presa 120V non è utilizzata, quindi ipotizziamo che non esiste e che l'avvolgimento B e C siano un unico avvolgimento.

Bisogna anche verificare che la potenza propria Pp:

$$Pp = PA = (PB + PC) \qquad 1,82 \cdot 60 = (0,68 \cdot 40 + 0,68 \cdot 120) = 109 \text{ VA}$$

II° funzionamento, 160V / 120V 400VA;

Il rapporto fra le tensioni ci fornisce il Coefficiente di Riduzione Kr dal quale si ricava la Potenza Propria dell'autotrasformatore:

$$Kr = \frac{V_H - V_L}{V_H} \qquad \frac{160 - 120}{160} = 0,25$$

$$Pp = Kr \cdot P1 \qquad 0,25 \cdot 400 = 100 \text{ VA}$$

La corrente assorbita dalla linea e la corrente secondaria risultano:

$$I = \frac{P}{V} \qquad I_1 = \frac{400}{160} = 2,5 \text{ A} \qquad I_3 = \frac{400}{120} = 3,33 \text{ A}$$

La parte di avvolgimento A non è utilizzato (presa 220V), quindi ipotizziamo che non esista.

La parte di avvolgimento B (avvolgimento serie) è attraversato da una corrente di 2,5A e sottoposto a una tensione di 40V.

La parte di avvolgimento C (avvolgimento in derivazione) è attraversato da una corrente di $3,33 - 2,5 = 0,83 \text{ A}$ e sottoposto a una tensione di 120V.

Bisogna anche verificare che la potenza propria Pp:

$$Pp = PB = PC \qquad 2,5 \cdot 40 = 0,83 \cdot 120 = 100 \text{ VA}$$

Possiamo riassumere in tabella i valori calcolati nei due funzionamenti:

	avvolgimento A	avvolgimento B	avvolgimento C
Corrente nel funzionamento 160V/220V 400VA	1,82A	0,68A	0,68A
Corrente nel funzionamento 160V/120V 400VA	0A	2,5A	0,83A
Correnti Massime avvolgimento (I)	1,82A	2,5A	0,83A
Tensioni avvolgimento (V)	60V	40V	120V
Potenza massima avvolgimento ($P = V \cdot I$)	109VA	100VA	100VA

Con i valori di Correnti Massime avvolgimento si procede al calcolo della sezione filo rame come si fa per un normale trasformatore.

Con i valori di Potenza massima avvolgimento calcoliamo la Potenza Propria Pp:

$$Pp = \frac{PA + PB + PC}{2} \qquad Pp = \frac{109 + 100 + 100}{2} = 154 \text{ VA}$$

In base a questa potenza Pp si dimensiona il nucleo ferromagnetico come si fa per un normale trasformatore.

Tramite questa formula pratica si può trovare la superficie totale del lamierino più adatto:

$$AxB = 80 \cdot \sqrt{\frac{Pp}{B \cdot f}} \quad (cm^2) \qquad AxB = 80 \cdot \sqrt{\frac{154}{1 \cdot 50}} = 140 \text{ cm}^2$$

Dal valore di AxB ottenuto, utilizzando le formule specifiche del lamierino da noi scelto (vedi tabelle lamierini) si ricava la misura della colonna centrale C, di seguito tutte le altre quote del lamierino.

Dalla Tabella Lamierini scelgo questo lamierino con le seguenti misure:

AxB(cm ²)	A(mm)	B(mm)	C(mm)	D(mm)	E(mm)	F(mm)	G(mm)	Tipo	Gf(Kg/1cm)
120	100	120	40	20	60	20	20	EI120	0,735

Il valore della Sezione Nucleo Ferromagnetico si calcola in funzione del coefficiente di dimensionamento Kd e della potenza propria.

$$Sfe = Kd \cdot \sqrt{Pp} \quad (cm^2) \qquad Sfe = 1,3 \cdot \sqrt{154} = 16,13 \text{ cm}^2$$

Dalla Sezione del Nucleo Ferromagnetico e dalla dimensione C del lamierino si ricava lo Spessore del pacco di lamierini, tenendo in considerazione anche il coefficiente di stipamento lamierini K_s .

$$Sp = \frac{Sfe}{C} \cdot Ks \quad (cm) \qquad Sp = \frac{16,13}{4} \cdot 1,11 = 4,47 \text{ cm}$$

Conoscendo le misure del lamierino e dello spessore pacco è necessario trovare un rocchetto di idonee dimensioni. Da un catalogo scelgo un rocchetto in plastica con le seguenti misure:

Cr=41mm	Spr=46mm	M=18mm	H=57mm
---------	----------	--------	--------

Scelto il tipo di lamierino, scelto lo spessore del nucleo ferromagnetico scelto il rocchetto adatto alle nostre esigenze, è opportuno aggiornare i calcoli:

$$S_{fe} = \frac{Sp \cdot C}{K_s} \quad (cm^2)$$

$$S_{fe} = \frac{4,5 \cdot 4,0}{1,11} = 16,22 \text{ cm}^2$$

La valutazione del numero delle spire dell'avvolgimento primario e secondario si effettua in relazione ai volt per spira:

$$e = 4,44 \cdot f \cdot S_{fe} \cdot B \cdot 10^{-4} \quad (V)$$

$$e = 4,44 \cdot 50 \cdot 16,22 \cdot 1 \cdot 10^{-4} = 0,36 \text{ V}$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento primario

$$N_1 = \frac{V_1}{e} \quad (\text{spire})$$

$$N_1 = \frac{160}{0,36} = 444 \text{ spire}$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento secondario elevatore

$$N_2 = \frac{V_2}{e} \quad (\text{spire})$$

$$N_2 = \frac{220}{0,36} = 611 \text{ spire}$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento secondario abbassatore

$$N_3 = \frac{V_3}{e} \quad (\text{spire})$$

$$N_3 = \frac{120}{0,36} = 333 \text{ spire}$$

Essendo un Autotrasformatore Elevatore/Abbassatore calcoliamo N_s e N_d :

$$N_s = N_2 - N_1$$

$$N_s = 611 - 444 = 167 \text{ spire}$$

$$N_s = N_1 - N_3$$

$$N_d = 444 - 333 = 111 \text{ spire}$$

$$N_d = N_3$$

$$N_d = 333 \text{ spire}$$

Verifica che il valore degli Amperspira primario agli Amperspira secondari:

$$N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2 = N_3 \cdot I_3 \quad (\text{Asp})$$

$$444 \cdot 2,5 = 611 \cdot 1,82 = 333 \cdot 3,33 = 1110 \text{ Asp}$$

Verifica che il valore degli Amperspira sia uguale in tutti gli avvolgimenti nel I° funzionamento:

$$N_s \cdot I_s = N_d \cdot I_d \quad (\text{Asp})$$

$$167 \cdot 1,82 = (111 + 333) \cdot 0,68 = 303 \text{ Asp}$$

Verifica che il valore degli Amperspira sia uguale in tutti gli avvolgimenti nel II° funzionamento:

$$N_s \cdot I_s = N_d \cdot I_d \quad (\text{Asp})$$

$$111 \cdot 2,5 = 333 \cdot 0,83 = 277 \text{ Asp}$$

Vantaggi dell'Autotrasformatore

- Permette un risparmio di rame. Infatti le correnti primarie e secondarie nel tratto di avvolgimento comune ai due avvolgimenti (N_d) si possono ritenere in opposizione di fase, infatti la corrente che percorre questo tratto è data dalla differenza tra le due correnti. Per cui la parte in derivazione (N_d) di avvolgimento potrà essere avvolta con un conduttore di sezione molto minore di quella necessaria per un trasformatore di pari potenza.
- Permette un risparmio nel ferro. Infatti la sezione del ferro dovrà essere proporzionata per la potenza propria P_P , non per la potenza passante P_2 dell'autotrasformatore. Ne risultano quindi sezioni del ferro alquanto ridotte e quindi minimo ingombro.
- Nell'autotrasformatore sono ridotte le perdite per effetto Joule (perdite nel rame) e le cadute di tensione nell'avvolgimento comune, essendo determinate dalle correnti in gioco. Quindi come conseguenza migliora il rendimento rispetto ad un trasformatore di uguale potenza.
- La massima economia di rame si ottiene nel caso in cui il rapporto tra V_1/V_2 sia prossimo all'unità. Tanto più questo rapporto diverge dall'unità, tanto più i vantaggi dell'autotrasformatore si riducono e compaiono gli svantaggi.

Svantaggi dell'Autotrasformatore

- L'isolamento dei due avvolgimenti (N_s ed N_d) deve essere dimensionato per la tensione più alta presente nell'autotrasformatore.
- L'autotrasformatore non isola dalla rete. Infatti gli avvolgimenti N_s ed N_d risultano collegati in serie essendoci così continuità metallica fra primario e secondario quindi sono maggiori i pericoli per le persone che accidentalmente toccano uno dei conduttori.

- Non é possibile collegare elettricamente tra di loro delle apparecchiature che hanno per alimentazione degli autotrasformatori, altrimenti si potrebbero verificare dei corti circuiti.
- Gli autotrasformatori nelle apparecchiature anche economiche stanno scomparendo, lasciando indiscusso il posto ai trasformatori. Vengono impiegati maggiormente solo per adattare due circuiti dove la differenza fra le tensioni V_1 e V_2 è minima. In linea di massima si può dire che conviene costruire un autotrasformatore quando il rapporto fra le tensioni V_1/V_2 non supera il valore di 3.

Esempio pratico di Autotrasformatore Monofase

Con questo esempio proviamo a calcolare un tradizionale autotrasformatore monofase abbassatore.

Elementi da prefissare

Conoscendo i seguenti dati di partenza è possibile calcolare un autotrasformatore in aria:

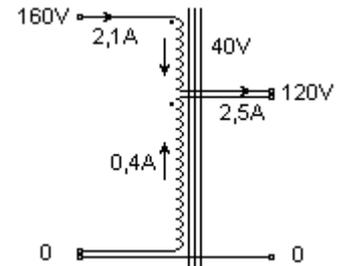
$P_2 = 300$ potenza al secondario in voltampere VA.

$f = 50$ frequenza alla quale dovrà funzionare il trasformatore in Hz.

$V_1 = 160$ tensione alimentazione dell'avvolgimento primario in V.

$V_2 = 120$ tensione che dovrà fornire l'avvolgimento secondario a pieno carico in V.

$B = 1$ Induzione Magnetica in Wb/m² alla quale si vuole far funzionare il trasformatore.



Potenze dell'Autotrasformatore

Al secondario si verifica una caduta di tensione % in relazione alla potenza del trasformatore:

$$v\% = \frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{P_2}{2} + 2,72\right)\right)^{1,35}} (\%) = \frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{300}{2} + 2,72\right)\right)^{1,35}} = 4,5 (\%)$$

Si può pertanto scrivere la relazione relativa alla tensione secondaria a vuoto:

$$V_{20} = \left(1 + \frac{v\%}{100}\right) \cdot V_2 \quad (V) \qquad V_{20} = \left(1 + \frac{4,5}{100}\right) \cdot 120 = 125,4V$$

Essendo V_H la tensione più elevata e V_L la tensione più bassa dell'autotrasformatore. Calcoliamo il fattore di riduzione Kr : e di seguito ricaviamo il valore della Potenza Propria Pp .

$$Kr = \frac{V_H - V_L}{V_H} \quad (n^\circ) \qquad Kr = \frac{160 - 120}{160} = 0,25$$

$$Pp = Kr \cdot P_2 \quad (VA) \qquad Pp = 0,25 \cdot 300 = 75 VA$$

Formato Lamierino

Tramite questa formula pratica si può trovare la superficie totale del Lamierino più adatto:

$$AxB = 80 \cdot \sqrt{\frac{Pp}{B \cdot f}} \quad (cm^2) \qquad AxB = 80 \cdot \sqrt{\frac{75}{1 \cdot 50}} = 97,98 cm^2$$

Dal valore di AxB ottenuto, utilizzando le formule specifiche del lamierino da noi scelto (vedi tabelle lamierini) si ricava la misura della colonna centrale C , di seguito tutte le altre quote del lamierino.

Dalla Tabella Lamierini scelgo questo lamierino con le seguenti misure:

AxB(cm ²)	A(mm)	B(mm)	C(mm)	D(mm)	E(mm)	F(mm)	G(mm)	Tipo	Gf(Kg/1cm)
97,2	90	108	36	18	54	18	18	EI108	0,595

Sezione del Nucleo

Il valore della Sezione Nucleo Ferromagnetico si calcola in funzione del coefficiente di dimensionamento Kd e della potenza propria.

$$Sfe = Kd \cdot \sqrt{Pp} \quad (cm^2) \qquad Sfe = 1,3 \cdot \sqrt{75} = 11,258 cm^2$$

Dalla Sezione del Nucleo Ferromagnetico e dalla dimensione C del lamierino si ricava lo Spessore del pacco di lamierini, tenendo in considerazione anche il coefficiente di stipamento lamierini K_s .

$$Sp = \frac{Sfe}{C} \cdot Ks \quad (cm)$$

$$Sp = \frac{11,258}{3,6} \cdot 1,11 = 3,47 \text{ cm}$$

Conoscendo le misure del lamierino e dello spessore pacco è necessario trovare un rocchetto di idonee dimensioni. Da un catalogo scelgo un rocchetto in plastica con le seguenti misure:

Cr=37mm	Spr=37mm	M=16mm	H=51mm
---------	----------	--------	--------

Lo spazio disponibile che offre questo rocchetto per ospitare gli avvolgimenti è dato da:

$$Sdisp = H \cdot M \quad (mm^2)$$

$$Sdisp = 51 \cdot 16 = 816 \text{ mm}^2$$

Scelto il tipo di lamierino, scelto lo spessore del nucleo ferromagnetico scelto il rocchetto adatto alle nostre esigenze, è opportuno aggiornare i calcoli:

$$Sfe = \frac{Sp \cdot C}{Ks} \quad (cm^2)$$

$$Sfe = \frac{3,6 \cdot 3,6}{1,11} = 11,67 \text{ cm}^2$$

Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro

Conoscendo lo spessore del singolo lamierino $sl=0,5mm$, e lo spessore del pacco lamellare Sp

$$N_L = \frac{Sp}{Ks \cdot sl} \quad (\text{lamierini})$$

$$N_L = \frac{3,6}{1,11 \cdot 0,05} = 65 \text{ lamierini}$$

Considerando il peso di un centimetro di spessore di pacco lamellare Gf calcolo il peso totale del pacco lamellare:

$$Gl = Gf \cdot Sp \quad (Kg)$$

$$Gl = 0,595 \cdot 3,6 = 2,142 \text{ Kg}$$

Conoscendo la cifra di perdita specifica del lamierino $ws = 3W/Kg$ si possono valutare le perdite nel ferro pf del nucleo ferromagnetico:

$$pf = B^2 \cdot ws \cdot Gl \quad (\text{watt})$$

$$pf = 1^2 \cdot 3 \cdot 2,142 = 6,426 \text{ watt}$$

Numero Spire

La valutazione del numero delle spire dell'avvolgimento primario e secondario si effettua in relazione ai volt per spira:

$$e = 4,44 \cdot f \cdot Sfe \cdot B \cdot 10^{-4} \quad (V)$$

$$e = 4,44 \cdot 50 \cdot 11,67 \cdot 1 \cdot 10^{-4} = 0,259 \text{ V}$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento primario

$$N_1 = \frac{V_1}{e} \quad (\text{spire})$$

$$N_1 = \frac{160}{0,259} = 617 \text{ spire}$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento secondario, considerando la tensione secondaria a vuoto

$$N_2 = \frac{V_{20}}{e} \quad (\text{spire})$$

$$N_2 = \frac{125,4}{0,259} = 484 \text{ spire}$$

Essendo un Autotrasformatore Abbassatore calcoliamo Ns e Nd :

$$Ns = N_1 - N_2$$

$$Ns = 617 - 484 = 133 \text{ spire}$$

$$Nd = N_2$$

$$Nd = 484 \text{ spire}$$

Corrente primario e secondario

Dalla Potenza Passante Totale Secondario si trova il Rendimento percentuale:

$$\eta = 60 + \left(\frac{\log_e (P_2 + 1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (P_2 + 1000)} \right) \quad (\%)$$

$$60 + \left(\frac{\log_e (300 + 1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (300 + 1000)} \right) = 89,3 \quad (\%)$$

Calcolo la corrente assorbita dal primario

$$I_1 = \frac{P_2}{\eta \cdot V_1} \quad (A)$$

$$I_1 = \frac{300}{0,893 \cdot 160} = 2,1 \text{ A}$$

Calcolo la massima corrente che può fornire il secondario

$$I_2 = \frac{P_2}{V_2} \quad (A)$$

$$I_2 = \frac{300}{120} = 2,5 A$$

Essendo un Autotrasformatore Abbassatore calcoliamo I_s e I_d :

$$I_s = I_1$$

$$I_s = 2,1 A$$

$$I_d = I_2 - I_1$$

$$I_d = 2,5 - 2,1 = 0,4 A$$

Diametro dei Conduttori

Dalla corrente e dalla densità di corrente si trova il diametro del filo di rame nudo, poi dalla tabella filo rame si sceglie il valore più prossimo.

$$\phi_r = 2 \cdot \sqrt{\frac{I}{J \cdot \pi}} \quad (mm)$$

$$\phi_{r_1} = 2 \cdot \sqrt{\frac{2,1}{2,5 \cdot \pi}} = 1,03 (mm)$$

$$\phi_{r_2} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,4}{2,5 \cdot \pi}} = 0,45 (mm)$$

Dalla tabella scelgo un filo con le seguenti misure in millimetri:

Diametro Filo Nudo ϕ_N (mm)	Diametro Filo Isolato ϕ_I (mm)	Sezione filo rame nudo S_f (mm ²)	n° di Spire in 1 cm di spazio N_{spcm}	Coefficien. di Riempimento K_f	Resistenza di 1m di filo R_f (Ω)	Peso di 1m di filo di rame P_f (gr/m)
1	1,08	0,7854	8,33	1,11	0,0224	6,9900
0,45	0,51	0,1590	17,58	1,12	0,1107	1,4155

Lunghezza Filo Avvolgimento e Peso del Rame

La lunghezza della spira media attorno al rocchetto è:

$$l_{spm} = 2 \cdot (Cr + M) + 2 \cdot (Spr + M) \quad (mm)$$

$$l_{spm} = 2 \cdot (37 + 16) + 2 \cdot (37 + 16) = 212 mm$$

La lunghezza totale del filo dell'avvolgimento in relazione al numero di spire:

$$l_{avv} = l_{spm} \cdot N \cdot 10^{-3} \quad (m)$$

$$l_{avv1} = 212 \cdot 133 \cdot 10^{-3} = 28,2 m$$

$$l_{avv2} = 212 \cdot 484 \cdot 10^{-3} = 102,6 m$$

Considerando il peso di un metro di filo di rame P_f calcolo il peso rame totale degli avvolgimenti:

$$Gr = P_f \cdot l_{avv} \cdot 10^{-3} \quad (Kg)$$

$$Gr_1 = 6,9900 \cdot 28,2 \cdot 10^{-3} = 0,1971 Kg$$

$$Gr_2 = 1,4155 \cdot 102,6 \cdot 10^{-3} = 0,1452 Kg$$

Resistenza degli avvolgimenti

Considerando la resistenza di un metro di filo di rame R_f calcolo la resistenza totale degli avvolgimenti:

$$R = R_f \cdot l_{avv} \quad (\Omega)$$

$$R_1 = 0,0224 \cdot 28,2 = 0,631 \Omega$$

$$R_2 = 0,1107 \cdot 102,6 = 11,358 \Omega$$

Perdite nel Rame

Determiniamo il nuovo valore di densità di corrente in relazione al filo utilizzato, poi conoscendo il peso del rame avvolgimento calcoliamo la potenza persa nel rame.

$$J = \frac{A}{S_f} \quad (A/mm^2)$$

$$J_1 = \frac{2,1}{0,7854} = 2,7 A/mm^2$$

$$J_2 = \frac{0,4}{0,1590} = 2,5 A/mm^2$$

In relazione ai conduttori scelti la densità di corrente rientra nei limiti stabiliti, per cui si procede con il calcolo della potenza persa nel rame:

$$pr = 2,4 \cdot J^2 \cdot Gr \quad (watt)$$

$$pr_1 = 2,4 \cdot 2,7^2 \cdot 0,1971 = 3,4 watt$$

$$pr_2 = 2,4 \cdot 2,5^2 \cdot 0,1452 = 2,2 watt$$

Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento

La tabella filo rame fornisce anche il numero delle spire che possono essere contenute assialmente in un centimetro N_{spcm} .

In base all'altezza H della finestra del rocchetto si può stabilire quante spire stanno in uno strato:

$$S_{Str} = H \cdot N_{spcm} \quad (\text{spire} \cdot \text{strato})$$

$$S_{Str1} = 5,1 \cdot 8,33 = 42,5 \text{ spire} \cdot \text{strato}$$

$$S_{Str2} = 5,1 \cdot 17,58 = 89,6 \text{ spire} \cdot \text{strato}$$

Considerando le spire totali si possono calcolare anche il numero degli strati necessari

$$N_{Str} = \frac{N}{S_{Str}} \quad (\text{strati})$$

$$N_{Str1} = \frac{133}{42,5} = 3,1 \text{ strati}$$

$$N_{Str2} = \frac{484}{89,6} = 5,4 \text{ strati}$$

Controllo Ingombri

Calcoliamo l'Ingombro Rame considerando il diametro filo rame isolato come se fosse di sezione quadrata in modo da tenere conto anche degli spazi d'aria fra spira e spira, che moltiplichiamo per il numero di spire e per il coefficiente di riempimento Kf che tiene conto di una certa tolleranza nell'esecuzione dell'avvolgimento.

$$Ing_R = \phi_1^2 \cdot N \cdot Kf \quad (mm^2)$$

$$Ing_{R1} = 1,08^2 \cdot 133 \cdot 1,11 = 172,5 mm^2$$

$$Ing_{R2} = 0,51^2 \cdot 484 \cdot 1,11 = 140,4 mm^2$$

Totale Ingombro Rame

$$Ing_{Rtot} = \sum Ing_{Rx} \quad (mm^2)$$

$$Ing_{Rtot} = 172,5 + 140,4 = 312,9 mm^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Strati. Supponendo di interporre fra ogni strato di spire un cartoncino isolante di spessore $I_{st}=0,2mm$,

$$Ing_{IST} = I_{ST} \cdot H \cdot \text{int}(N_{Str}) \quad (mm^2)$$

$$Ing_{IST1} = 0,2 \cdot 51 \cdot (3) = 30,6 mm^2$$

$$Ing_{IST2} = 0,2 \cdot 51 \cdot (5) = 51 mm^2$$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Strati:

$$Ing_{ISTtot} = \sum Ing_{ISTx} \quad (mm^2)$$

$$Ing_{ISTtot} = 30,6 + 51 = 81,6 mm^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti. Terminata la costruzione alla fine di tutti gli avvolgimenti e fra un avvolgimento e l'altro supponiamo di inserire un cartoncino isolante di spessore $I_{av}=0,5mm$.

$$Ing_{Iav} = I_{AV} \cdot H \quad (mm^2)$$

$$Ing_{Iav} = 0,5 \cdot 51 = 25,5 mm^2$$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti:

Essendo $n^{\circ}Avv$ il numero di avvolgimenti primari e secondari che compongono il trasformatore.

$$Ing_{Iavtot} = Ing_{Iav} \cdot n^{\circ}Avv \quad (mm^2)$$

$$Ing_{Iavtot} = 25,5 \cdot 2 = 51 mm^2$$

Calcoliamo l'ingombro totale maggiorandolo di un coefficiente di ingombro percentuale $Ki=10\%$ che tiene conto delle imperfezioni nella realizzazione dell'avvolgimento e degli eventuali spazi d'aria.

$$Ing_{TOT} = Ing_{Rtot} + Ing_{ISTtot} + Ing_{Iavtot} \cdot \left(1 + \frac{Ki\%}{100}\right) \quad (mm^2)$$

$$Ing_{TOT} = 312,9 + 81,6 + 51 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) = 490 mm^2$$

Il valore dell'ingombro totale è minore dello spazio offerto dal rocchetto, quindi gli avvolgimenti saranno contenuti nel rocchetto comodamente.

Verifica controllo, rendimento e caduta di tensione

Verifica del Rendimento % considerando le eventuali perdite calcolate:

$$\eta\% = \frac{P}{P + pf + pr} \cdot 100 \quad (\%)$$

$$\eta = \frac{300}{300 + 6,426 + 3,4 + 2,2} \cdot 100 = 96,1 \%$$

Calcolo della caduta di tensione secondaria considerando le eventuali perdite calcolate:

$$v2 = \frac{pr_1 \cdot N_2}{I_1 \cdot N_1} + \frac{pr_2}{I_2} \quad (V)$$

$$v2 = \frac{3,4 \cdot 484}{2,1 \cdot 133} + \frac{2,2}{0,4} = 11,4 V$$

Calcolo della tensione secondaria a carico:

$$V_C = V_{20} - v2 \quad (V)$$

$$V_C = 125,4 - 11,4 = 114 V$$

Verifica della Caduta di Tensione %:

$$v\% = \frac{V_2 - V_C}{V_C} \cdot 100 \quad (\%)$$

$$v\% = \frac{120 - 114}{114} \cdot 100 = 5,2 \%$$

Concludendo possiamo dire che il rendimento e la caduta di tensione % si discostano di poco rispetto ai valori calcolati in precedenza.

Comunque lo scopo di queste ultime verifiche è quello di capire se il dimensionamento del trasformatore è corretto, ed eventualmente se ne è il caso, correggere alcuni parametri in modo da rientrare con un rendimento e una c.d.t.% pressappoco nei valori previsti.

Esempio pratico di Autotrasformatore Monofase Multipresa

Con questo esempio proviamo a calcolare un autotrasformatore monofase multipresa dotato di due prese secondarie, ambedue in grado di erogare, non simultaneamente, una potenza di 400VA.

Elementi da prefissare

Conoscendo i seguenti dati di partenza è possibile calcolare un autotrasformatore in aria:

$P_2 = 400$ potenza al secondario in voltampere VA.

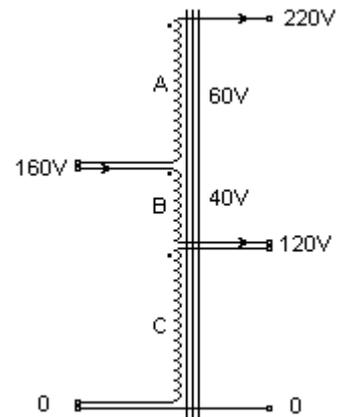
$f = 50$ frequenza alla quale dovrà funzionare il trasformatore in Hz.

$V_1 = 160$ tensione alimentazione dell'avvolgimento primario in V.

$V_2 = 220$ tensione che dovrà fornire l'avvolgimento secondario a pieno carico in V.

$V_3 = 120$ tensione che dovrà fornire l'avvolgimento secondario a pieno carico in V.

$B = 1$ Induzione Magnetica in Wb/m² alla quale si vuole far funzionare il trasformatore.



Potenze dell'Autotrasformatore

Dalla Potenza Passante Totale Secondario si trova il Rendimento percentuale:

$$\eta = 60 + \left(\frac{\log_e (P_2 + 1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (P_2 + 1000)} \right) (\%) \qquad 60 + \left(\frac{\log_e (400 + 1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (400 + 1000)} \right) = 90,4 (\%)$$

Al secondario si verifica una caduta di tensione % in relazione alla potenza del trasformatore:

$$v\% = \frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{P_2}{2} + 2,72 \right) \right)^{1,35}} (\%) \qquad \frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{400}{2} + 2,72 \right) \right)^{1,35}} = 4,2 (\%)$$

Si può pertanto scrivere la relazione relativa alla tensione secondaria a vuoto:

$$V_{20} = \left(1 + \frac{v\%}{100} \right) \cdot V_2 \quad (V) \qquad V_{20} = \left(1 + \frac{4,2}{100} \right) \cdot 220 = 229,2V$$

$$V_{20} = \left(1 + \frac{4,2}{100} \right) \cdot 120 = 125V$$

Consideriamo separatamente i due funzionamenti possibili:

I° funzionamento, 160V / 220V 400VA;

Essendo V_H la tensione più elevata e V_L la tensione più bassa dell'autotrasformatore. Calcoliamo il fattore di riduzione Kr : e di seguito ricaviamo il valore della Potenza Propria Pp .

$$Kr = \frac{V_H - V_L}{V_H} \quad (n^\circ) \qquad Kr = \frac{220 - 160}{220} = 0,2727$$

$$Pp = Kr \cdot P_2 \quad (VA) \qquad Pp = 0,2727 \cdot 400 = 109 VA$$

Calcolo la corrente assorbita dal primario

$$I_1 = \frac{P_2}{\eta \cdot V_1} \quad (A) \qquad I_1 = \frac{400}{0,904 \cdot 160} = 2,76 A$$

Calcolo la massima corrente che può fornire il secondario

$$I_2 = \frac{P_2}{V_2} \quad (A) \qquad I_2 = \frac{400}{220} = 1,82 A$$

Essendo un Autotrasformatore Elevatore calcoliamo I_s e I_d :

$$I_s = I_2 \qquad I_s = 1,82 A \text{ (corrente che passa nell'avvolgimento A)}$$

$$I_d = I_1 - I_2 \qquad I_d = 2,76 - 1,82 = 0,94 A \text{ (corrente che passa nell'avvolgimento B e C)}$$

II° funzionamento, 160V / 120V 400VA:

Essendo V_H la tensione più elevata e V_L la tensione più bassa dell'autotrasformatore. Calcoliamo il fattore di riduzione Kr e di seguito ricaviamo il valore della Potenza Propria Pp .

$$Kr = \frac{V_H - V_L}{V_H} \quad (n^\circ) \qquad Kr = \frac{160 - 120}{160} = 0,25$$

$$Pp = Kr \cdot P_2 \quad (VA) \qquad Pp = 0,25 \cdot 400 = 100 VA$$

Calcolo la corrente assorbita dal primario

$$I_1 = \frac{P_2}{\eta \cdot V_1} \quad (A) \qquad I_1 = \frac{400}{0,904 \cdot 160} = 2,76 A$$

Calcolo la massima corrente che può fornire il secondario

$$I_3 = \frac{P_2}{V_3} \quad (A) \qquad I_3 = \frac{400}{120} = 3,33 A$$

Essendo un Autotrasformatore Abbassatore calcoliamo I_s e I_d :

$$I_s = I_1 \qquad I_s = 2,76 A \text{ (corrente che passa nell'avvolgimento B)}$$

$$I_d = I_3 - I_1 \qquad I_d = 3,33 - 2,76 = 0,57 A \text{ (corrente che passa nell'avvolgimento C)}$$

Possiamo riassumere in tabella i valori calcolati nei due funzionamenti:

	avvolgimento A	avvolgimento B	avvolgimento C
Corrente nel funzionamento 160V/220V 400VA	1,82A	0,94A	0,94A
Corrente nel funzionamento 160V/120V 400VA	0A	2,76A	0,57A
Correnti Massime avvolgimento (I)	1,82A	2,76A	0,94A
Tensioni avvolgimento (V)	60V	40V	120V
Potenza massima avvolgimento ($P = V \cdot I$)	109VA	110VA	113VA

Con i valori di Correnti Massime avvolgimento si procede al calcolo della sezione filo rame come si fa per un normale trasformatore.

Dai dati rilevati da Potenza massima avvolgimento calcoliamo la Potenza Propria Pp :

$$Pp = \frac{PA + PB + PC}{2} \qquad Pp = \frac{109 + 110 + 113}{2} = 166 VA$$

In base a questa potenza si dimensiona il nucleo ferromagnetico come si fa per un normale trasformatore.

Formato Lamierino

Tramite questa formula pratica si può trovare la superficie totale del Lamierino più adatto:

$$Ax B = 80 \cdot \sqrt{\frac{Pp}{B \cdot f}} \quad (cm^2) \qquad Ax B = 80 \cdot \sqrt{\frac{166}{1 \cdot 50}} = 146 cm^2$$

Dal valore di AxB ottenuto, utilizzando le formule specifiche del lamierino da noi scelto (vedi tabelle lamierini) si ricava la misura della colonna centrale C , di seguito tutte le altre quote del lamierino.

Dalla Tabella Lamierini scelto questo lamierino con le seguenti misure:

$AxB(cm^2)$	A(mm)	B(mm)	C(mm)	D(mm)	E(mm)	F(mm)	G(mm)	Tipo	Gf(Kg/1cm)
120	100	120	40	20	60	20	20	EI120	0,735

Sezione del Nucleo

Il valore della Sezione Nucleo Ferromagnetico si calcola in funzione del coefficiente di dimensionamento K_d e della potenza propria.

$$S_{fe} = K_d \cdot \sqrt{P_p} \quad (cm^2) \qquad S_{fe} = 1,3 \cdot \sqrt{166} = 16,75 \quad cm^2$$

Dalla Sezione del Nucleo Ferromagnetico e dalla dimensione C del lamierino si ricava lo Spessore del pacco di lamierini, tenendo in considerazione anche il coefficiente di stipamento lamierini K_s .

$$S_p = \frac{S_{fe}}{C} \cdot K_s \quad (cm) \qquad S_p = \frac{16,75}{4} \cdot 1,11 = 4,64 \quad cm$$

Conoscendo le misure del lamierino e dello spessore pacco è necessario trovare un rocchetto di idonee dimensioni. Da un catalogo scelgo un rocchetto in plastica con le seguenti misure:

Cr=41mm	Spr=46mm	M=18mm	H=57mm
---------	----------	--------	--------

Lo spazio disponibile che offre questo rocchetto per ospitare gli avvolgimenti è dato da:

$$S_{disp} = H \cdot M \quad (mm^2) \qquad S_{disp} = 57 \cdot 18 = 1056 \quad mm^2$$

Scelto il tipo di lamierino, scelto lo spessore del nucleo ferromagnetico scelto il rocchetto adatto alle nostre esigenze, è opportuno aggiornare i calcoli:

$$S_{fe} = \frac{S_p \cdot C}{K_s} \quad (cm^2) \qquad S_{fe} = \frac{4,5 \cdot 4,0}{1,11} = 16,22 \quad cm^2$$

Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro

Conoscendo lo spessore del singolo lamierino $sl=0,5mm$, e lo spessore del pacco lamellare S_p

$$N_L = \frac{S_p}{K_s \cdot sl} \quad (lamierini) \qquad N_L = \frac{4,5}{1,11 \cdot 0,05} = 81 \quad lamierini$$

Considerando il peso di un centimetro di spessore di pacco lamellare G_f calcolo il peso totale del pacco lamellare:

$$G_l = G_f \cdot S_p \quad (Kg) \qquad G_l = 0,735 \cdot 4,5 = 3,3075 \quad Kg$$

Conoscendo la cifra di perdita specifica del lamierino $ws=3W/Kg$ si possono valutare le perdite nel ferro pf del nucleo ferromagnetico:

$$pf = B^2 \cdot ws \cdot G_l \quad (watt) \qquad pf = 1^2 \cdot 3 \cdot 3,3075 = 9,922 \quad watt$$

Numero Spire

La valutazione del numero delle spire dell'avvolgimento primario e secondario si effettua in relazione ai volt per spira:

$$e = 4,44 \cdot f \cdot S_{fe} \cdot B \cdot 10^{-4} \quad (V) \qquad e = 4,44 \cdot 50 \cdot 16,22 \cdot 1 \cdot 10^{-4} = 0,36 \quad V$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento primario

$$N_1 = \frac{V_1}{e} \quad (spire) \qquad N_1 = \frac{160}{0,36} = 444 \quad spire$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento secondario, considerando la tensione secondaria a vuoto

$$N_2 = \frac{V_{20}}{e} \quad (spire) \qquad N_2 = \frac{229,2}{0,36} = 637 \quad spire$$

$$N_3 = \frac{V_{30}}{e} \quad (spire) \qquad N_3 = \frac{125}{0,36} = 347 \quad spire$$

Essendo un Autotrasformatore Abbassatore calcoliamo N_s e N_d :

$$N_s = N_2 - N_1 \qquad N_s = 637 - 444 = 193 \quad spire \quad (\text{numero spire avvolgimento A})$$

$$N_d = N_1 - N_3 \qquad N_d = 444 - 347 = 97 \quad spire \quad (\text{numero spire avvolgimento B})$$

$$N_d = N_3 \qquad N_d = 347 \quad spire \quad (\text{numero spire avvolgimento C})$$

Diametro dei Conduttori

Dalla corrente e dalla densità di corrente si trova il diametro del filo di rame nudo, poi dalla tabella filo rame si sceglie il valore più prossimo.

$$\phi_r = 2 \cdot \sqrt{\frac{I}{J \cdot \pi}} \quad (mm)$$

$$\phi_{r_1} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1,82}{2,5 \cdot \pi}} = 0,96 \text{ mm}$$

$$\phi_{r_2} = 2 \cdot \sqrt{\frac{2,76}{2,5 \cdot \pi}} = 1,18 \text{ mm}$$

$$\phi_{r_3} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,94}{2,5 \cdot \pi}} = 0,69 \text{ mm}$$

Dalla tabella scelgo un filo con le seguenti misure in millimetri:

Diametro Filo Nudo ϕ_N (mm)	Diametro Filo Isolato ϕ_I (mm)	Sezione filo rame nudo S_f (mm ²)	n° di Spire in 1 cm di spazio N_{spcm}	Coefficien. di Riempimento K_f	Resistenza di 1m di filo R_f (Ω)	Peso di 1m di filo di rame P_f (gr/m)
0,9	0,97	0,6362	9,27	1,11	0,0277	5,6619
1,1	1,19	0,9503	7,56	1,11	0,0185	8,4580
0,65	0,71	0,3318	12,64	1,11	0,0530	2,9533

Lunghezza Filo Avvolgimento e Peso del Rame

La lunghezza della spira media attorno al rocchetto è:

$$l_{spm} = 2 \cdot (Cr + M) + 2 \cdot (Spr + M) \quad (mm)$$

$$l_{spm} = 2 \cdot (41 + 18) + 2 \cdot (46 + 18) = 246 \text{ mm}$$

La lunghezza totale del filo dell'avvolgimento in relazione al numero di spire:

$$l_{avv} = l_{spm} \cdot N \cdot 10^{-3} \quad (m)$$

$$l_{avv1} = 246 \cdot 193 \cdot 10^{-3} = 47,48 \text{ m}$$

$$l_{avv2} = 246 \cdot 97 \cdot 10^{-3} = 23,86 \text{ m}$$

$$l_{avv3} = 246 \cdot 347 \cdot 10^{-3} = 85,3 \text{ m}$$

Considerando il peso di un metro di filo di rame P_f calcolo il peso rame totale degli avvolgimenti:

$$Gr = P_f \cdot l_{avv} \cdot 10^{-3} \quad (Kg)$$

$$Gr_1 = 5,6619 \cdot 47,48 \cdot 10^{-3} = 0,2688 \text{ Kg}$$

$$Gr_2 = 8,4580 \cdot 23,86 \cdot 10^{-3} = 0,2018 \text{ Kg}$$

$$Gr_3 = 2,9533 \cdot 85,3 \cdot 10^{-3} = 0,2521 \text{ Kg}$$

Resistenza degli avvolgimenti

Considerando la resistenza di un metro di filo di rame R_f calcolo la resistenza totale degli avvolgimenti:

$$R = R_f \cdot l_{avv} \quad (\Omega)$$

$$R_1 = 0,0277 \cdot 47,48 = 1,31 \Omega$$

$$R_2 = 0,0185 \cdot 23,86 = 0,44 \Omega$$

$$R_3 = 0,0530 \cdot 85,3 = 4,52 \Omega$$

Perdite nel Rame

Determiniamo il nuovo valore di densità di corrente in relazione al filo utilizzato, poi conoscendo il peso del rame avvolgimento calcoliamo la potenza persa nel rame.

$$J = \frac{A}{S_f} \quad (A/mm^2)$$

$$J_1 = \frac{1,82}{0,6362} = 2,8 \text{ A/mm}^2$$

$$J_2 = \frac{2,76}{0,9503} = 2,9 \text{ A/mm}^2$$

$$J_3 = \frac{0,94}{0,3318} = 2,8 \text{ A/mm}^2$$

In relazione ai conduttori scelti la densità di corrente rientra nei limiti stabiliti, per cui si procede con il calcolo della potenza persa nel rame:

$$pr = 2,4 \cdot J^2 \cdot Gr \quad (\text{watt})$$

$$pr_1 = 2,4 \cdot 2,8^2 \cdot 0,2688 = 5,05 \text{ watt}$$

$$pr_2 = 2,4 \cdot 2,9^2 \cdot 0,2018 = 4,07 \text{ watt}$$

$$pr_3 = 2,4 \cdot 2,8^2 \cdot 0,2521 = 4,74 \text{ watt}$$

Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento

La tabella filo rame fornisce anche il numero delle spire che possono essere contenute assialmente in un centimetro N_{spcm} .

In base all'altezza H della finestra del rocchetto si può stabilire quante spire stanno in uno strato:

$$S_{Str} = H \cdot N_{spcm} \quad (\text{spire} \cdot \text{strato})$$

$$S_{Str1} = 5,7 \cdot 9,27 = 52,84 \text{ spire} \cdot \text{strato}$$

$$S_{Str2} = 5,7 \cdot 7,56 = 43,09 \text{ spire} \cdot \text{strato}$$

$$S_{Str2} = 5,7 \cdot 12,64 = 72,05 \text{ spire} \cdot \text{strato}$$

Considerando le spire totali si possono calcolare anche il numero degli strati necessari

$$N_{Str} = \frac{N}{S_{Str}} \quad (\text{strati})$$

$$N_{Str1} = \frac{193}{52,84} = 3,65 \text{ strati}$$

$$N_{Str2} = \frac{97}{43,09} = 2,25 \text{ strati}$$

$$N_{Str2} = \frac{347}{72,05} = 4,81 \text{ strati}$$

Controllo Ingombri

Calcoliamo l'Ingombro Rame considerando il diametro filo rame isolato come se fosse di sezione quadrata in modo da tenere conto anche degli spazi d'aria fra spira e spira, che moltiplichiamo per il numero di spire e per il coefficiente di riempimento Kf che tiene conto di una certa tolleranza nell'esecuzione dell'avvolgimento.

$$Ing_R = \phi_l^2 \cdot N \cdot Kf \quad (\text{mm}^2)$$

$$Ing_{R1} = 0,97^2 \cdot 193 \cdot 1,11 = 201 \text{ mm}^2$$

$$Ing_{R2} = 1,19^2 \cdot 97 \cdot 1,11 = 152 \text{ mm}^2$$

$$Ing_{R2} = 0,71^2 \cdot 347 \cdot 1,11 = 194 \text{ mm}^2$$

Totale Ingombro Rame

$$Ing_{Rtot} = \sum Ing_{Rx} \quad (\text{mm}^2)$$

$$Ing_{Rtot} = 201 + 152 + 194 = 547 \text{ mm}^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Strati. Supponendo di interporre fra ogni strato di spire un cartoncino isolante di spessore $Ist=0,2\text{mm}$,

$$Ing_{IST} = I_{ST} \cdot H \cdot \text{int}(N_{Str}) \quad (\text{mm}^2)$$

$$Ing_{IST1} = 0,2 \cdot 57 \cdot (3) = 34,2 \text{ mm}^2$$

$$Ing_{IST2} = 0,2 \cdot 57 \cdot (2) = 22,8 \text{ mm}^2$$

$$Ing_{IST2} = 0,2 \cdot 57 \cdot (4) = 45,6 \text{ mm}^2$$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Strati:

$$Ing_{ISTtot} = \sum Ing_{ISTx} \quad (\text{mm}^2)$$

$$Ing_{ISTtot} = 34,2 + 22,8 + 45,6 = 102,6 \text{ mm}^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti. Terminata la costruzione alla fine di tutti gli avvolgimenti e fra un avvolgimento e l'altro supponiamo di inserire un cartoncino isolante di spessore $I_{av}=0,5mm$.

$$Ing_{I_{AV}} = I_{AV} \cdot H \quad (mm^2) \qquad Ing_{I_{AV}} = 0,5 \cdot 57 = 28,5 mm^2$$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti:

Essendo $n^{\circ}AVV$ il numero di avvolgimenti primari e secondari che compongono il trasformatore.

$$Ing_{I_{AVTot}} = Ing_{I_{AV}} \cdot n^{\circ}AVV \quad (mm^2) \qquad Ing_{I_{AVTot}} = 28,5 \cdot 3 = 85,5 mm^2$$

Calcoliamo l'ingombro totale maggiorandolo di un coefficiente di ingombro percentuale $K_i=10\%$ che tiene conto delle imperfezioni nella realizzazione dell'avvolgimento e degli eventuali spazi d'aria.

$$Ing_{TOT} = Ing_{Rtot} + Ing_{ISTot} + Ing_{I_{AVTot}} \cdot \left(1 + \frac{K_i\%}{100}\right) \quad (mm^2)$$

$$Ing_{TOT} = 547 + 102,6 + 85,5 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) = 808,6 mm^2$$

Il valore dell'ingombro totale è minore dello spazio offerto dal rocchetto, quindi gli avvolgimenti saranno contenuti nel rocchetto comodamente.

Verifica controllo, rendimento e caduta di tensione

Verifica del Rendimento % considerando le eventuali perdite calcolate:

$$\eta\% = \frac{P}{P + pf + pr} \cdot 100 \quad (\%) \qquad \eta = \frac{400}{400 + 9,922 + 4,07 + 4,74} \cdot 100 = 95,5 \%$$

Calcolo della caduta di tensione secondaria considerando le eventuali perdite calcolate in riferimento ad un primario e un secondario a scelta (es. 160/120V):

$$v_2 = \frac{pr_1 \cdot N_2}{I_1 \cdot N_1} + \frac{pr_2}{I_2} \quad (V) \qquad v_2 = \frac{4,07 \cdot 347}{2,76 \cdot 97} + \frac{4,74}{0,94} = 10,317 V$$

Calcolo della tensione secondaria a carico:

$$V_C = V_{20} - v_2 \quad (V) \qquad V_C = 125 - 10,317 = 114,6 V$$

Verifica della Caduta di Tensione %:

$$v\% = \frac{V_2 - V_C}{V_C} \cdot 100 \quad (\%) \qquad v\% = \frac{120 - 114,6}{114,6} \cdot 100 = 4,63 \%$$

Concludendo possiamo dire che il rendimento e la caduta di tensione % si discostano di poco rispetto ai valori calcolati in precedenza.

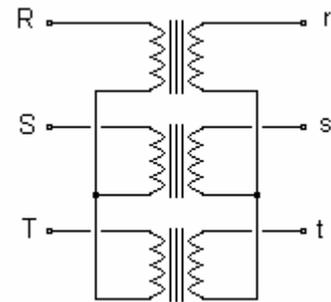
Comunque lo scopo di queste ultime verifiche è quello di capire se il dimensionamento del trasformatore è corretto, ed eventualmente se ne è il caso, correggere alcuni parametri in modo da rientrare con un rendimento e una c.d.t.% pressappoco nei valori previsti.

Introduzione al Trasformatore Trifase in Aria

Quando si crea l'energia elettrica in una centrale mediante un generatore questo produce energia elettrica trifase (tre fili). Le reti di distribuzione dell'energia elettrica sono trifasi ed anche numerosi utilizzatori sono previsti per alimentazione trifase.

L'energia di un sistema trifase può essere trasformata sia mediante tre trasformatori monofasi opportunamente collegati creando così un 'banco trifase', oppure mediante un trasformatore trifase che abbia la potenza uguale alla somma delle potenze dei tre trasformatori monofase.

In genere si preferisce questa ultima soluzione, un trasformatore trifase è costituito da un nucleo avente tre colonne, dove su ciascuna delle quali sono disposti gli avvolgimenti primario e secondario di una stessa fase.



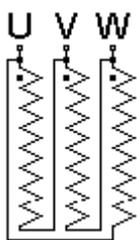
Questo ci fa capire che dobbiamo considerare il trasformatore trifase come tre circuiti monofasi indipendenti ciascuno formato da una fase, per cui nel calcolo faremo riferimento ad una sola fase, essendo le altre due uguali.

La potenza totale del trasformatore trifase sarà uguale alla somma delle tre singole potenze di ogni fase. Infatti in un sistema trifase simmetrico ed equilibrato (stesse tensioni e stesse correnti sulle tre fasi) è possibile misurare la potenza utilizzando un solo wattmetro inserito su una qualsiasi fase e la cui lettura va poi moltiplicata per tre.

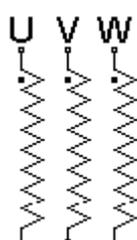
Tipi di collegamenti

Un sistema trifase è caratterizzato da tre conduttori di linea, quindi il trasformatore avrà tre avvolgimenti, ed ogni avvolgimento avrà un inizio e una fine, questi sei conduttori possono essere collegati fra di loro con tre metodi diversi:

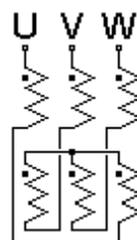
- **Triangolo** ogni avvolgimento fa capo con i suoi due estremi a due delle fasi, in modo che il loro insieme costituisca un triangolo dai cui vertici partono le tre fasi.
- **Stella** ogni avvolgimento fa capo con una fase, mentre gli estremi opposti sono collegati insieme e creano così il centro stella.
- **Zig-Zag** ogni avvolgimento è composto da due avvolgimenti, gli estremi dei primi avvolgimenti fanno capo con le fasi, mentre gli estremi opposti sono collegati agli estremi dei secondi avvolgimenti, i cui estremi opposti sono collegati insieme e creano così il centro stella.
- **Bifase** ogni avvolgimento è collegato in serie all'alto, la fine e l'inizio degli avvolgimenti esterni fanno capo alle due fasi, il punto dove convergono due avvolgimenti si considera il centro stella virtuale.



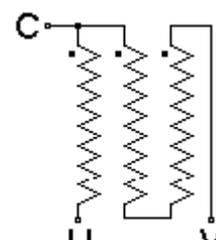
Triangolo



Stella



Zig-Zag



Bifase

I collegamenti fra le fasi del secondario possono essere uguali o diversi da quelli fra le fasi del primario, per cui si potrebbero avere in teoria nove combinazioni di collegamenti. Di solito nei trasformatori trifasi sono usati i seguenti collegamenti primario/secondario: stella/stella, triangolo/stella, stella/zig-zag, più raramente sono usati: triangolo/triangolo, stella/triangolo, mentre il collegamento a zig-zag è usato solitamente per il secondario e raramente per il primario.

Scelta dei collegamenti

La scelta delle combinazioni possibili di collegamenti dipende da considerazioni economiche e da esigenze di esercizio. Per esempio, in tutte le distribuzioni a tre fili con neutro, essendo necessario un centro accessibile, si possono impiegare soltanto trasformatori con secondario a stella o a zig-zag.

Quando si verificano degli squilibri di carico (fasi non equamente caricate) si può dire che scegliendo trasformatori con primario a triangolo e secondario a stella oppure con primario a stella e secondario a zig-zag tali squilibri si ripercuotono meno sulla linea di alimentazione primaria.

Per identificare i vari tipi di collegamenti che sono stati realizzati all'interno del trasformatore fra gli avvolgimenti di ogni fase si utilizza un codice alfanumerico:

- Y per indicare un collegamento a Stella.
- D per indicare un collegamento a Triangolo.
- Z per indicare un collegamento a Zig-Zag.

La lettera riportata in maiuscolo si riferisce al primario del trasformatore, mentre quella in minuscolo si riferisce al secondario. Se nel caso di collegamento a Stella o a Zig-Zag, il centro stella è accessibile dall'esterno (tramite un terminale a cui andrà collegato il conduttore di Neutro), al pedice della lettera Y (oppure y) si aggiunge la lettera N (oppure n). Per esempio Y_N significa primario collegato a Stella con centro stella accessibile dall'esterno, mentre per il secondario sarebbe y_n .

Di seguito a queste sigle trova posto un numero. Esso identifica il gruppo, ovvero le volte per cui è necessario moltiplicare 30° per ottenere l'effettivo spostamento angolare che si manifesta i vettori delle tensioni primarie e quelli delle tensioni secondarie in conseguenza al modo con cui sono stati collegati gli avvolgimenti. Un altro esempio: $D y_n 11$ significa primario collegato a triangolo, secondario a stella con centro stella accessibile, gruppo di appartenenza 11 (moltiplicando per 30° si ottiene 330° che rappresenta lo spostamento di fase della tensione secondaria rispetto quella primaria).

Alcuni pregi e difetti di alcuni collegamenti fra i più usati (vedi tabella):

- I collegamenti $Y-y_n-0$ (stella-stella gruppo 0) e $Y-y_n-6$ (stella-stella gruppo 6) non permettono il passaggio della 3^a armonica della corrente magnetizzante, e gli squilibri di corrente provocano forti squilibri di tensione se non esiste il filo del neutro primario. Di solito è meglio evitare questa combinazione di collegamenti.
- I collegamenti $D-d-0$ $D-d-6$ non sono adatti a circuiti con neutro.
- I collegamenti $D-y-11$ $D-y-5$ $Y-d-11$ $Y-d-5$ permettono il passaggio della 3^a armonica della corrente magnetizzante.
- I collegamenti $Y-z-11$ $Y-z-5$ non permettono il passaggio della 3^a armonica della corrente magnetizzante, collegando il neutro sul primario e sul secondario si diminuiscono gli squilibri sul primario dovuti a squilibri sul secondario.

Agli effetti economici si può dire che in linea di massima gli avvolgimenti a triangolo sono più costosi di quelli a stella, dovendo impiegare conduttori di diametro minore e dovendo avvolgere un maggiore numero di spire; mentre l'avvolgimento a zig-zag richiede a parità di tensione, un numero di spire secondarie maggiore del 15% di quello di un avvolgimento a stella.

Il costo dei conduttori smaltati per avvolgimenti dipende oltre che dal tipo di isolamento anche dalla sezione del conduttore, infatti più la sezione è piccola tanto maggiore è il costo

Per quanto riguarda il cablaggio dei fili una volta terminata la costruzione del trasformatore trifase è opportuno individuare tutti gli inizi e le fini di ogni avvolgimento. Per evitare di sbagliare il collegamento si usa etichettare tutti i fili con lettere maiuscole per il primario e con lettere minuscole per il secondario, per ciò tutti gli inizi degli avvolgimenti con le lettere U V W e le fini con le lettere X Y Z, (per esempio, il primo avvolgimento avrà come inizio la U e come fine la X). Con tutti gli avvolgimenti così identificati sarà più facile effettuare i collegamenti sopra descritti facendo sempre riferimento alla "Tabella dei Gruppi di Collegamento". Nella morsettiera terminale verrà segnalato dove collegare l'alimentazione trifase, questo mediante le lettere maiuscole R S T e dove collegare il carico, mediante le lettere minuscole r s t n.

Spostamento di fase

Nei trasformatori trifasi ha inoltre importanza l'eventuale spostamento di fase della tensione secondaria rispetto alla tensione primaria. Ciò interessa agli effetti del collegamento in parallelo di trasformatori, che è possibile effettuare solo se i trasformatori sono perfettamente uguali (stessa potenza, stesso collegamento, stesso numero spire, stessa variazione di tensione da vuoto a carico).

Nei trasformatori monofasi e nei trasformatori trifasi a collegamenti omonimi stella/stella, triangolo/triangolo, la tensione secondaria può soltanto essere o in fase o in opposizione di fase, cioè equivale a uno spostamento di fase rispettivamente di 0°, oppure di 180° (gruppo 0 oppure gruppo 6).

Invece nei trasformatori trifasi a collegamento misto stella/triangolo, triangolo/stella, stella/zig-zag, questo spostamento di fase angolare non può mai essere né di 0° né di 180°, ma deve essere multiplo dispari di 30°.

Esaminando vettorialmente tutte le combinazioni possibili di collegamenti trifasi risulta in definitiva che si possono avere 12 distinti valori di spostamento angolare di 30° in 30° che costituiscono 12 gruppi (da 0 a 11).

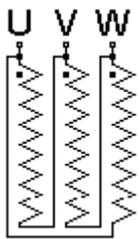
Questi gruppi rappresentano il ritardo della bassa tensione (secondario) rispetto alla alta tensione (primario), corrisponde alla lettura dell'ora su un quadrante d'orologio nel quale la lancetta lunga (minuti) rappresenta la f.e.m.i. nell'avvolgimento di alta tensione e sta sullo 0, mentre la lancetta corta (ore) rappresenta la f.e.m.i. nell'avvolgimento di bassa tensione e può stare su 0, 1, 2, 3, 4, 511.

Le norme CEI raccomandano come normali i gruppi 0, 5, 6, 11, che corrispondono a spostamenti angolari di fase di 0°, 150°, 180°, 330°, ed in particolare i gruppi 0, 11.

Al fine di collegare trasformatori in parallelo gli avvolgimenti devono essere collegati fra loro in modo tale che tutti abbiano lo stesso sfasamento e quindi appartengono allo stesso gruppo.

E' importante notare che i trasformatori trifasi del gruppo 6 possono essere convertiti al gruppo 0, e quelli del gruppo 5 possono essere convertiti al gruppo 11 mediante inversione di collegamenti interni degli avvolgimenti.

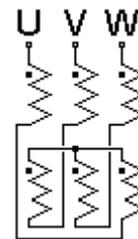
Non è invece mai possibile passare dai gruppi 0 e 6 ai gruppi 11 e 5 o viceversa: in altri termini non possono mai funzionare in parallelo trasformatori a collegamenti omonimi (stella/stella triangolo/triangolo), con trasformatori a collegamenti misti (stella/triangolo triangolo/stella).



Triangolo



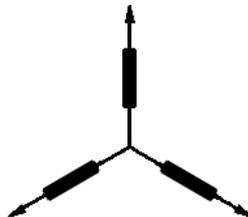
Stella



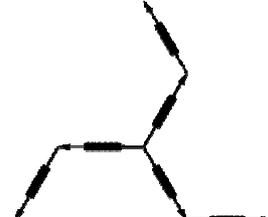
Zig-Zag



Triangolo



Stella



Zig-Zag

Tabella Spostamento di Fase dei Principali Gruppi

Gruppo 0 - Sfasam. vettoriale 0°	<p>Yy0</p>	Gruppo 5 - Sfasam. vettoriale 150°	<p>Yd5</p>
	<p>Dd0</p>		<p>Dy5</p>
	<p>Dz0</p>		<p>Yz5</p>
Gruppo 6 - Sfasam. vettoriale 180°	<p>Yy6</p>	Gruppo 11 - Sfasam. vettoriale 330°	<p>Yd11</p>
	<p>Dd6</p>		<p>Dy11</p>
	<p>Dz6</p>		<p>Zy11</p>

Per la identificazione dei terminali si fa riferimento alla norma CEI 14-7. Le lettere utilizzate per le tre fasi, sia primarie che secondarie sono U V W. Il neutro si identifica con la lettera N. Prima di ogni lettera, il numero 1 sta ad indicare il primario, il numero 2 sta ad indicare il secondario. In alcuni vecchi trasformatori si possono trovare terminali identificati con le lettere A B C in corrispondenza delle attuali U V W.

Per i collegamenti descritti si considerano gli avvolgimenti disegnati con in alto l'inizio e in basso la fine dell'avvolgimento stesso.

Considerazioni fra Parametri di Linea, di Fase e di Avvolgimento

Analizziamo un qualunque trasformatore trifase con nucleo ferromagnetico in lamierini a tre colonne dove su ogni colonna è avvolto un primario ed un secondario. Prendiamo in esame il singolo avvolgimento presente su di una sola colonna.

TABELLA RELAZIONI FRA TENSIONE DI AVVOLGIMENTO E TENSIONE DI LINEA

Tensione di un singolo Avvolgimento	Tensione di Linea con Collegamento STELLA	Tensione di Linea con Collegamento TRIANGOLO	Tensione di Linea con Collegamento ZIG-ZAG*	Tensione di Linea con Collegamento BIFASE
V_{avv}	$V_L = V_{avv} \cdot \sqrt{3}$	$V_L = V_{avv}$	$V_L = V_{avv} \cdot 3$	$V_L = V_{avv} \cdot 2$
127	220	127	380	254
220	380	220	660	440
380	658	380	1140	760

TABELLA RELAZIONI FRA TENSIONE DI AVVOLGIMENTO E TENSIONE DI FASE

Tensione di un singolo Avvolgimento	Tensione di Fase con Collegamento STELLA	Tensione di Fase con Collegamento TRIANGOLO	Tensione di Fase con Collegamento ZIG-ZAG*	Tensione di Fase con Collegamento BIFASE
V_{avv}	$V_f = V_{avv}$	$V_f = V_{avv}$	$V_f = V_{avv} \cdot \sqrt{3}$	$V_f = V_{avv} \cdot \sqrt{3}$
127	127	127	220	220
220	220	220	380	380
380	380	380	658	658

TABELLA RELAZIONI FRA POTENZA DI AVVOLGIMENTO E POTENZA DI LINEA

Potenza di un singolo Avvolgimento	Potenza di Linea con Collegamento STELLA	Potenza di Linea con Collegamento TRIANGOLO	Potenza di Linea con Collegamento ZIG-ZAG*	Potenza di Linea con Collegamento BIFASE**
P_{avv}	$P_L = P_{avv} \cdot 3$	$P_L = P_{avv} \cdot 3$	$P_L = P_{avv} \cdot \sqrt{3} \cdot 3$	$P_L = P_{avv} \cdot 2$
192	576	576	1000	384
333	1000	1000	1730	666
500	1500	1500	2598	1000

TABELLA RELAZIONI FRA POTENZA DI AVVOLGIMENTO E POTENZA DI FASE

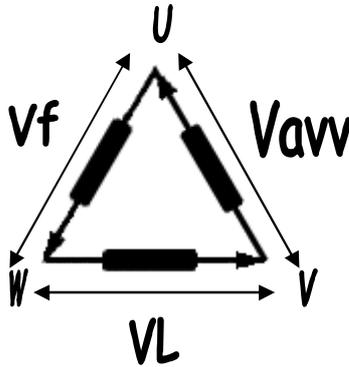
Potenza di un singolo Avvolgimento	Potenza di Fase con Collegamento STELLA	Potenza di Fase con Collegamento TRIANGOLO	Potenza di Fase con Collegamento ZIG-ZAG*	Potenza di Fase con Collegamento BIFASE**
P_{avv}	$P_f = P_{avv}$	$P_f = P_{avv}$	$P_f = P_{avv} \cdot \sqrt{3}$	$P_f = P_{avv} \cdot \sqrt{3}$
192	192	192	333	333
333	333	333	576	576
500	500	500	866	866

* l'avvolgimento a zig-zag è composto da 6 avvolgimenti. Da notare che collegando in serie i due avvolgimenti della stessa colonna si ottiene un collegamento a stella avente una tensione $2/\sqrt{3}$ volte maggiore. Se l'avvolgimento è un secondario comporta una potenza al primario di $2/\sqrt{3}$ volte maggiore di quella disponibile al secondario.

** da tenere in considerazione che per il collegamento Bifase di un avvolgimento secondario comporta una potenza al primario di 1,5 volte maggiore di quella disponibile al secondario.

Avvolgimento a Triangolo

Il collegamento a triangolo è prevalentemente utilizzato negli avvolgimenti primari, ma può essere utilizzato anche negli avvolgimenti secondari dei trasformatori trifasi. In questo tipo di collegamento non esiste un punto comune a tutti tre gli avvolgimenti, perciò non è disponibile il filo 'neutro'.



$$\begin{aligned}
 PL &= VL \cdot IL \cdot \sqrt{3} & 380 \cdot 1,52 \cdot \sqrt{3} &= 1000 \\
 PL &= Pf \cdot 3 & 333 \cdot 3 &= 1000 \\
 P_{avv} &= \frac{PL}{3} & \frac{1000}{3} &= 333 \\
 Pf &= Vf \cdot If & 380 \cdot 0,877 &= 333 \\
 IL &= \frac{PL}{VL \cdot \sqrt{3}} & \frac{1000}{380 \cdot \sqrt{3}} &= 1,52 \\
 IL &= If \cdot \sqrt{3} & 0,877 \cdot \sqrt{3} &= 1,52 \\
 I_{avv} &= \frac{P_{avv}}{V_{avv}} & \frac{333}{380} &= 0,877 \\
 If &= \frac{PL}{VL \cdot 3} & \frac{1000}{380 \cdot 3} &= 0,877
 \end{aligned}$$

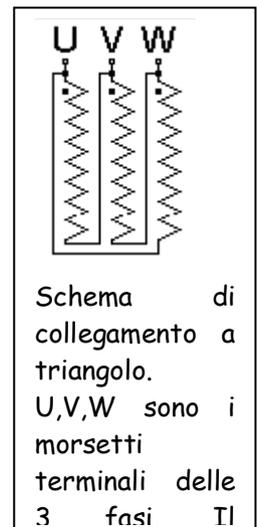
$$VL = Vf = V_{avv} \quad Pf = P_{avv} \quad If = I_{avv}$$

VL	Vf	Vavv	IL	If	Iavv	PL	Pf	Pavv
380	380	380	1,52	0,877	0,877	1000	333	333

Per il dimensionamento del trasformatore con avvolgimento a triangolo è necessario tenere in considerazione i soli parametri che interessano il singolo avvolgimento; come Vavv, Iavv e Pavv. Gli altri parametri di linea come PL e IL, subiscono le variazioni in funzione dei valori assunti dai parametri di avvolgimento come Pavv e Iavv, secondo le relazioni sopra descritte anche con esempi numerici.

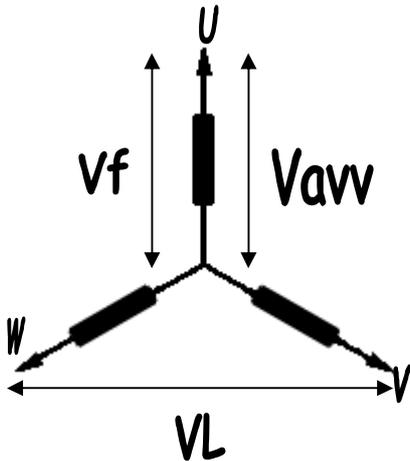
Legenda:

- VL Tensione di linea misurata fra fase e fase.
- Vf Tensione di fase misurata fra fase e punto comune (neutro).
- Vavv Tensione di avvolgimento misurata ai capi del singolo avvolgimento.
- IL Corrente di linea misurata su uno dei 3 conduttori di fase collegati al trasformatore.
- If Corrente di fase misurata sul terminale dell'avvolgimento.
- Iavv Corrente di avvolgimento misurata sul terminale del singolo avvolgimento
- PL Potenza di Linea del sistema trifase completo.
- Pf Potenza di fase riferita a una delle 3 fasi rispetto al punto comune.
- Pavv Potenza di avvolgimento del singolo avvolgimento.
- PL₁ Potenza riflessa al primario del trasformatore



Avvolgimento a Stella

Il collegamento a stella normalmente è utilizzato sia negli avvolgimenti primari, sia negli avvolgimenti secondari dei trasformatori trifasi. In questo tipo di collegamento esiste un punto comune a tutti tre gli avvolgimenti che viene denominato 'centro stella' dove se lo si desidera è possibile collegare il filo 'neutro'. La connessione delle fasi a stella presenta il vantaggio di richiedere un isolamento degli avvolgimenti contro massa proporzionato alla tensione stellata (V_f), e cioè alla tensione di linea (V_L) divisa per $\sqrt{3}$: sotto questo aspetto la connessione a stella è particolarmente impiegata per le alte tensioni e dove necessita utilizzare il conduttore Neutro.



$$V_L = V_f \cdot \sqrt{3} \quad 220 \cdot \sqrt{3} = 380$$

$$V_f = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad \frac{380}{\sqrt{3}} = 220$$

$$P_L = V_L \cdot I_L \cdot \sqrt{3} \quad 380 \cdot 1,52 \cdot \sqrt{3} = 1000$$

$$P_L = P_f \cdot 3 \quad 333 \cdot 3 = 1000$$

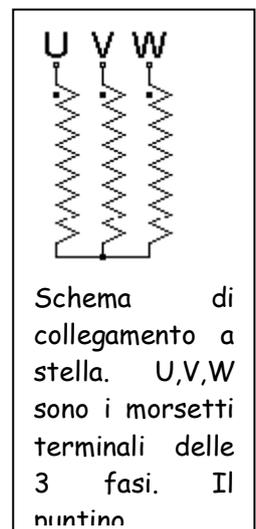
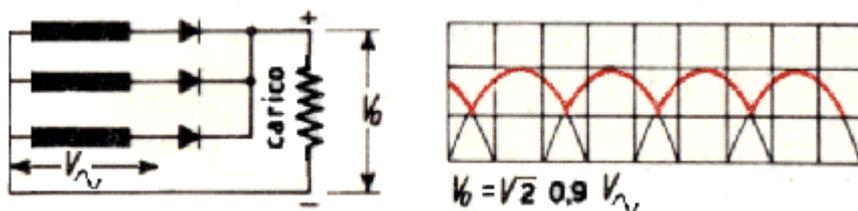
$$P_f = V_f \cdot I_f \quad 220 \cdot 1,52 = 333$$

$$I_L = \frac{P_L}{V_L \cdot \sqrt{3}} \quad \frac{1000}{380 \cdot \sqrt{3}} = 1,52$$

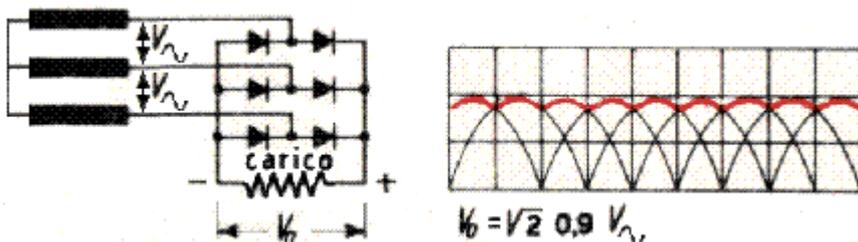
$$I_L = I_f = I_{avv} \quad V_f = V_{avv} \quad P_f = P_{avv}$$

V_L	V_f	V_{avv}	I_L	I_f	I_{avv}	P_L	P_f	P_{avv}
380	220	220	1,52	1,52	1,52	1000	333	333

Raddrizzatore Trifase a Semionda: I diodi permettono il passaggio della sola semionda positiva. E' applicabile solo su collegamenti a Stella e a Zig-Zag con centro stella accessibile. (raddrizza la tensione di fase).



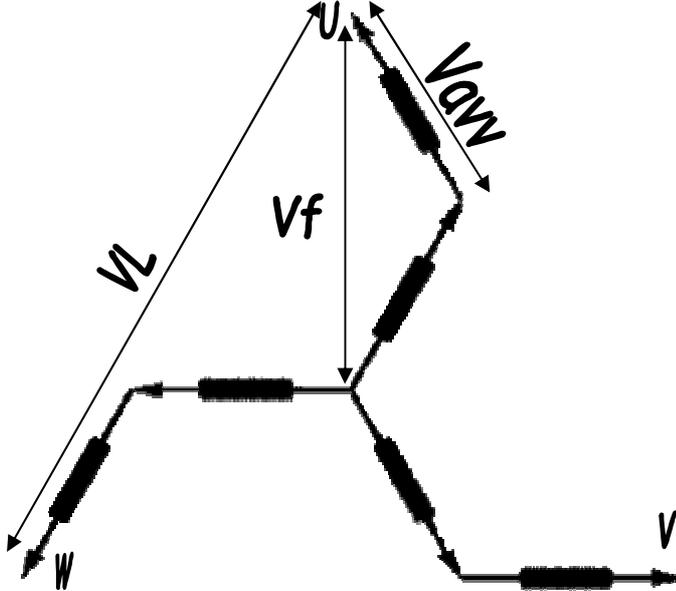
Raddrizzatore Trifase a Ponte di Graetz: I diodi permettono il passaggio della semionda positiva e negativa (onda intera). E' applicabile su tutti i collegamenti a Triangolo, Stella e Zig-Zag, senza centro stella accessibile (raddrizza la tensione di linea).



Con 3 fasi e un Ponte di Graetz si ottiene una continua livellata uguale come si otterrebbe con 6 fasi e 6 diodi a raddrizzatore a semionda. Il ripple risulta ottimale anche senza filtro di livellamento.

Avvolgimento a Zig-Zag

Il collegamento a zig-zag normalmente è utilizzato negli avvolgimenti secondari dei trasformatori trifasi di solito con primario a stella, come si nota dallo schema in figura, ciascuna fase si compone di due metà di avvolgimento disposte su due colonne diverse e collegate in serie fra loro in senso rovesciato l'una rispetto all'altra. Questo fatto porta all'eliminazione della terza armonica della tensione secondaria stellata. La ripartizione di ciascuna fase secondaria su due colonne, ha inoltre lo scopo di compensare gli squilibri delle tensioni dovuti alle dissimmetrie di carico sulle tre fasi. Questo tipo di collegamento può essere impiegato così nell'alimentazione delle reti a bassa tensione a quattro fili, in sostituzione del collegamento a stella. Per certe applicazioni il maggior costo dovuto ad un numero maggiore di spire rispetto al collegamento a stella si ritiene compensato dal vantaggio di eliminare la terza armonica delle tensioni secondarie, e dal vantaggio di rendere il trasformatore meglio adatto a sopportare carichi squilibrati.



$$\begin{aligned}
 VL &= V_{avv} \cdot 3 & 127 \cdot 3 &= 380 \\
 Vf &= V_{avv} \cdot \sqrt{3} & 127 \cdot \sqrt{3} &= 220 \\
 VL &= Vf \cdot \sqrt{3} & 220 \cdot \sqrt{3} &= 380 \\
 PL &= P_{avv} \cdot \sqrt{3} \cdot 3 & 192 \cdot \sqrt{3} \cdot 3 &= 1000 \\
 Pf &= P_{avv} \cdot \sqrt{3} & 192 \cdot \sqrt{3} &= 333 \\
 PL &= Pf \cdot 3 & 333 \cdot 3 &= 1000 \\
 IL &= \frac{PL}{VL \cdot \sqrt{3}} & \frac{1000}{380 \cdot \sqrt{3}} &= 1,51 \\
 If &= \frac{Pf}{Vf} & \frac{333}{220} &= 1,51 \\
 I_{avv} &= \frac{P_{avv}}{V_{avv}} & \frac{192}{127} &= 1,51 \\
 IL &= If = I_{avv} & & \\
 PL_1 &= (P_{avv} + P_{avv}) \cdot 3 & (192 + 192) \cdot 3 &= 1154 \\
 PL_1 &= PL \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} & 1000 \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} &= 1154
 \end{aligned}$$

VL	Vf	Vavv	IL	If	Iavv	PL	Pf	Pavv
380	220	127	1,51	1,51	1,51	1000	333	192

Per il dimensionamento del trasformatore con avvolgimento a zig-zag è necessario tenere in considerazione i soli parametri che interessano il singolo avvolgimento; come Vavv, Iavv e Pavv, da notare che sono 6 avvolgimenti.

Gli altri parametri di fase come Pf e Vf, o di linea come PL e VL, subiscono le variazioni in funzione dei valori assunti dai parametri di avvolgimento come Pavv e Vavv, secondo le relazioni sopra descritte anche con esempi numerici.

Se l'avvolgimento a Zig-Zag è un secondario si deve considerare nel dimensionamento del trasformatore che la dimensione del nucleo ferromagnetico va calcolata in funzione della potenza riflessa al primario PL_1 cioè aumentata di $\frac{2}{\sqrt{3}}$ rispetto alla

potenza disponibile secondario

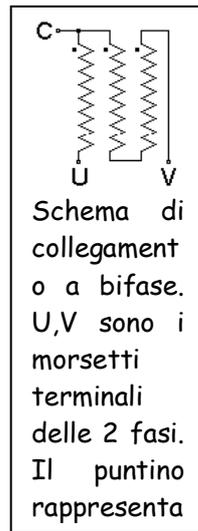
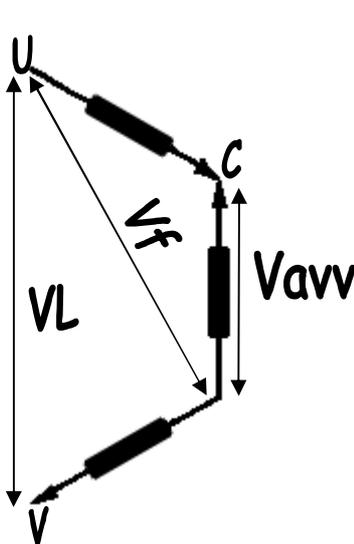
Viceversa se l'avvolgimento Zig-Zag è un primario la potenza disponibile al secondario

va diminuita di $\frac{2}{\sqrt{3}}$ rispetto alla potenza assorbita dal primario



Avvolgimento Bifase

Il collegamento a bifase normalmente è utilizzato solo negli avvolgimenti secondari dei trasformatori trifasi con primario a stella, corrisponde come è noto, allo schema in figura. Questo collegamento si utilizza per diminuire lo squilibrio del sistema trifase quando si ha l'esigenza di alimentare grossi carichi monofase da una rete trifase. Purtroppo non è semplice ripartire la corrente e la potenza in modo uniforme sulle 3 fasi della rete di alimentazione, ma questa può essere una soluzione. Infatti nella configurazione bifase la corrente dell'avvolgimento primario non è uguale nelle 3 fasi: la fase centrale assorbe una corrente doppia delle altre due. Se il primario fosse collegato a triangolo questo squilibrio sulla fase S provoca un calo di tensione sulle due fasi laterali del secondario, ecco perché il primario è di questo trasformatore deve essere a stella..



$$\begin{aligned}
 V_{avv} &= VL \cdot \frac{1}{2} & 220 \cdot \frac{1}{2} &= 110 \\
 V_f &= VL \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} & 220 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} &= 190 \\
 V_f &= V_{avv} \cdot \sqrt{3} & 110 \cdot \sqrt{3} &= 190 \\
 PL &= VL \cdot IL & 220 \cdot 4,54 &= 1000 \\
 P_f &= P_{avv} \cdot \sqrt{3} & 500 \cdot \sqrt{3} &= 866 \\
 P_f &= V_f \cdot I_f & 190 \cdot 4,54 &= 866 \\
 P_f &= PL \cdot \sqrt{3} / 2 & 1000 \cdot \sqrt{3} / 2 &= 866 \\
 P_{avv} &= V_{avv} \cdot I_{avv} & 110 \cdot 4,54 &= 500 \\
 P_{avv} &= PL / 2 & 1000 / 2 &= 500 \\
 PL_1 &= P_{avv} \cdot 3 & 500 \cdot 3 &= 1500 \\
 IL &= I_f = I_{avv}
 \end{aligned}$$

VL	Vf	Vavv	IL	If	Iavv	PL	Pf	Pavv
220	190	110	4,54	4,54	4,54	1000	866	500

Da tenere presente che la potenza di linea assorbita dall'avvolgimento primario di questo trasformatore è di 1,5 volte maggiore di quella disponibile al secondario, perciò se al secondario si ha $PL = 1000VA$ al primario si assorbe $PL_1 = 1500VA$.

Potenza di linea al primario	$PL_1 = P_{avv} \cdot 3$	$500 \cdot 3 = 1500$
Corrente di linea al primario a stella	$IL_m = \frac{PL_1}{VL_1 \cdot \sqrt{3}}$	$\frac{1500}{380 \cdot \sqrt{3}} = 2,28$
Corrente fase R primario colonna laterale	$I_R = IL_m \cdot 0,75$	$2,28 \cdot 0,75 = 1,71$
Corrente fase S primario colonna centrale	$I_S = IL_m \cdot 1,5$	$2,28 \cdot 1,5 = 3,42$
Corrente fase T primario colonna laterale	$I_T = IL_m \cdot 0,75$	$2,28 \cdot 0,75 = 1,71$

Nella realizzazione dell'avvolgimento primario a stella bisogna tenere valutare se è il caso di utilizzare un filo di sezione maggiore nella colonna centrale.

Attenzione, se il collegamento Bifase viene realizzato per l'avvolgimento Primario può essere alimentato solo da un altro trasformatore con secondario Bifase collegando tutti 3 i conduttori U, V, C. Questo per chiarire che alimentando solo le fasi U, V non genera al secondario una trifase.

Analisi di un Trasformatore Tri-Bifase 380V/150V

Analisi del trasformatore tri-bifase 380/150 con collegamento stella / bifase. Il trasformatore in esame è di potenza nominale 15KVA (10KVA al secondario), è realizzato su tre colonne e su ogni colonna è avvolto un primario ed un secondario. Gli avvolgimenti sono avvolti tutti nello stesso senso sulle tre rispettive colonne, ed il pallino nero indica l'inizio avvolgimento. Le dimensioni in millimetri del lamierino che realizza il circuito magnetico sono: A=360, B=400, C=80, D=80, E=200, F=80, G=80, Sp=110.

Il primario è collegato a stella con neutro N accessibile, la tensione di alimentazione è di VL=380V per ciò la tensione di fase è di Vf=220V e la tensione di un singolo avvolgimento è Vavv=220V.

Il secondario è collegato a bifase con centro stella C accessibile, la tensione di uscita è di VL=150V per ciò la tensione di un singolo avvolgimento è di Vavv=75V.

Per analizzare i volt/spira, e quindi risalire al numero delle spire che costituiscono l'avvolgimento è necessario ricorrere a questo espediente:

Avvolgere solo su una colonna 10 spire utilizzando un comune cavo da elettricista con sezione di 1mm². Alimentare il trasformatore con la tensione giusta, nel nostro caso VL=380V, misurare con un tester la tensione ai capi delle 10 spire avvolte, nel nostro caso ho misurato Vm=21,8V. Fare attenzione durante questa prova perché è molto facile prendere la scossa senza essere protetti da un differenziale.

Dalle considerazioni eseguite ne risulta che:

I volt su una spira di questo trasformatore sono: $V_{spira} = \frac{V_m}{n^{\circ} \text{spira}} = \frac{21,8}{10} = 2,18 \text{ V / spira}$

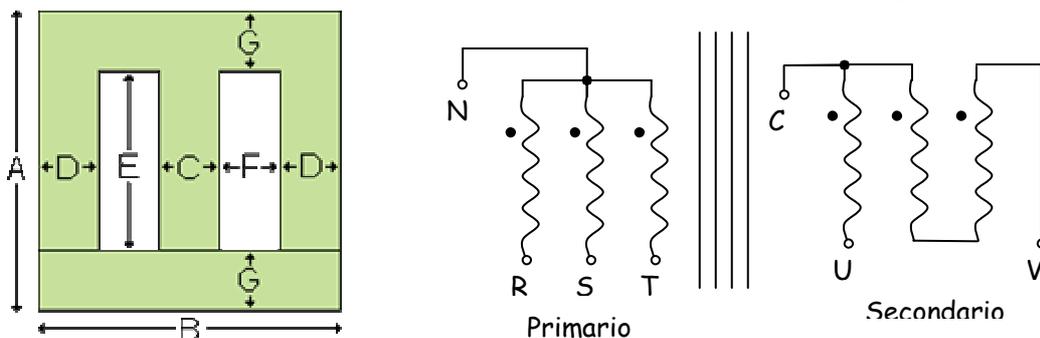
Per ciò ogni avvolgimento primario sarà di: $N1 = \frac{V_{avv}}{V_{spira}} = \frac{220}{2,18} = 100 \text{ spira}$

Per ciò ogni avvolgimento secondario sarà di: $N2 = \frac{V_{avv}}{V_{spira}} = \frac{75}{2,18} = 35 \text{ spira}$

Sezione Nucleo Ferromagnetico $S_{fe} = \frac{C \cdot Sp}{1,1} = \frac{8 \cdot 11}{1,1} = 79,3 \text{ cm}^2$

Induzione Magnetica $B = \frac{e}{4,44 \cdot f \cdot S_{fe}} = \frac{2,18}{4,44 \cdot 50 \cdot 79,3 \cdot 10^{-4}} = 1,2 \text{ Wb/m}^2$

Ovviamente esiste un primario di 100spire e un secondario di 35spire su ogni colonna.



Il secondario con collegamento Bifase può essere utilizzato in tre modi diversi:

Bifase: è infatti così chiamato perché essendo il terminale C (centro stella virtuale) collegato a terra, ci permette di avere come uscita la fase U e la fase V.

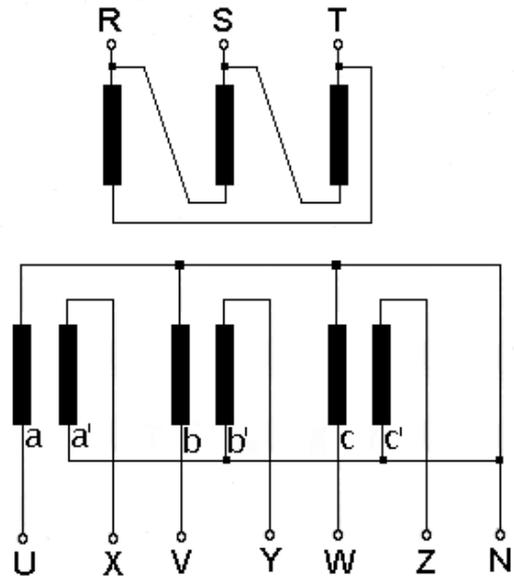
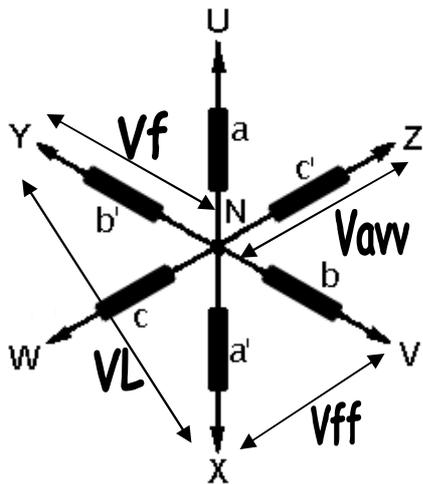
Monofase: lasciando il terminale C scollegato, e collegando il terminale U a terra, così si ottiene come uscita, V come fase, e U come neutro.

Monofase Isolato: senza collegare nessun terminale a terra utilizzando come uscite U e V, ma attenzione perché in questo caso il differenziale non vi protegge.

Il Trasformatore con collegamento Tri-Bifase trova importanti applicazioni specialmente nell'alimentazione dei grandi forni elettrici monofasi, o qualsiasi altro carico monofase di notevole potenza, quando si vogliono alimentare con una linea trifase ed ottenere un carico quasi equilibrato sulle tre fasi.

Avvolgimento Esafase a Doppia Stella

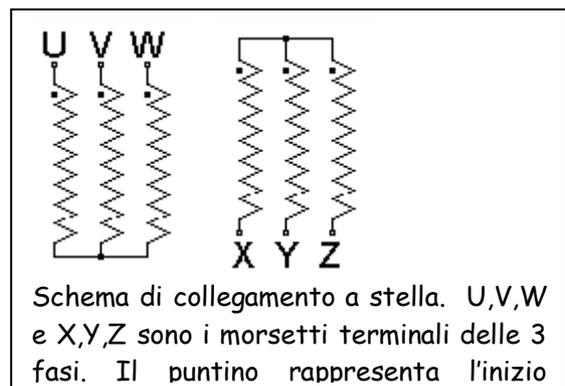
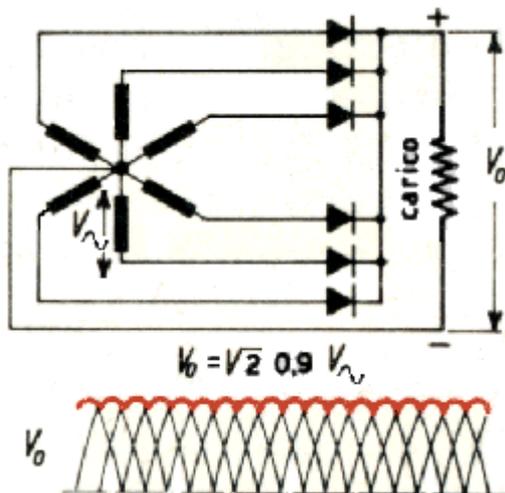
Il collegamento esafase a Doppia Stella normalmente è utilizzato solo negli avvolgimenti secondari dei trasformatori trifasi. Su ogni colonna del trasformatore sono avvolti due secondari identici tali da formare due stelle opposte. I due centri stella sono collegati fra loro per formare un unico centro stella dove se lo si desidera è possibile collegare il filo 'neutro'. Se il sistema esafase deve funzionare su un carico squilibrato con le fasi utilizzatrici derivate fra i fili di linea e il neutro, come accade nei raddrizzatori esafasi, per assicurare l'equilibrio delle tensioni secondarie, le fasi primarie del trasformatore devono essere collegate a triangolo.



VL	Vf	Vavv	IL	If	Iavv	PL	Pf	Pavv
380	220	220	1,52	1,52	1,52	1000	333	333

Raddrizzatore Trifase a Semionda:

$$V_{ff} = V_f = V_{avv}$$

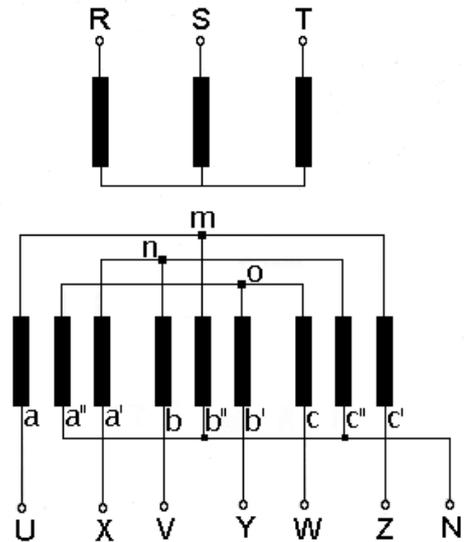
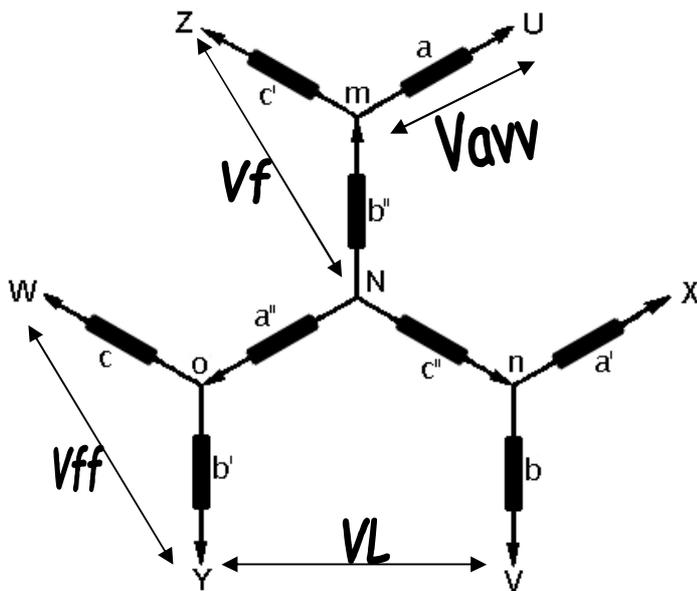


la tensione raddrizzata è $V_o = V_f \cdot \sqrt{2} \cdot 0,9$

Fondamentalmente si tratta di un trasformatore con collegamento Triangolo, Stella, Stella, Dy11y5. Le formule per il calcolo degli avvolgimenti secondari sono le stesse del collegamento a Stella, considerando due avvolgimenti secondari a stella identici.

Avvolgimento Esafase a Zig-Zag

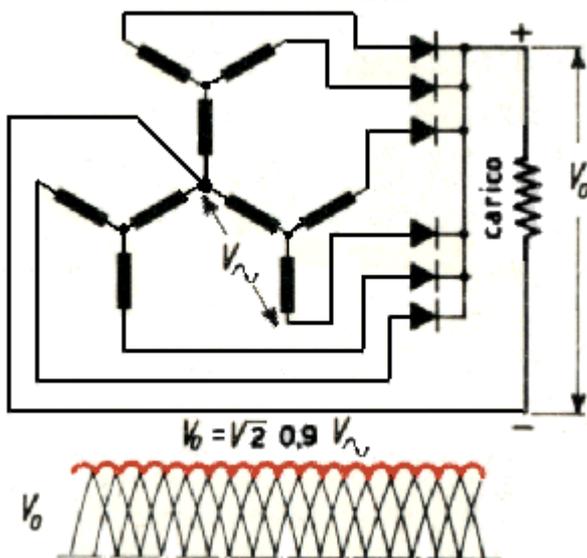
Il collegamento Esafase a Zig-Zag detto anche collegamento a 'Forca' normalmente è utilizzato solo negli avvolgimenti secondari dei trasformatori trifasi di solito con primario a stella. Questo collegamento migliora ulteriormente la ripartizione del carico sulla linea primaria, questo trasformatore porta avvolte su ogni colonna tre fasi secondarie eguali che vengono collegate fra loro come da figura. La ripartizione di ciascuna fase secondaria su due colonne, ha inoltre lo scopo di compensare gli squilibri delle tensioni dovuti alle dissimmetrie di carico sulle sei fasi, per questo motivo il primario di questo trasformatore può essere collegato a stella anziché a triangolo. Contemporaneamente può essere prelevata energia anche nei punti n,m,o,N (3 fasi+N) per alimentare delle reti a quattro fili. Per certe applicazioni il maggior costo dovuto ad un numero maggiore di spire rispetto al collegamento a doppia stella si ritiene compensato dal vantaggio di rendere il trasformatore meglio adatto a sopportare carichi squilibrati.



VL	Vf	Vavv	IL	If	Iavv	PL	Pf	Pavv
220	220	127	1,51	1,51	1,51	1000	333	192

Raddrizzatore Trifase a Semionda:

$$VL = V_{ff} = V_f = V_{avv} \cdot \sqrt{3}$$



Fondamentalmente si tratta di un trasformatore con collegamento Stella, Zig-Zag, Zig-Zag, Yz11z5. Le formule per il calcolo degli avvolgimenti secondari sono le stesse del collegamento a Zig-Zag, considerando di avvolgere un avvolgimento in più su ogni colonna.

la tensione raddrizzata è $V_0 = V_f \cdot \sqrt{2} \cdot 0,9$

Dimensionamento di un Trasformatore Trifase in aria

Per il dimensionamento dei trasformatori trifasi necessario interpretare bene la differenza che intercorre fra parametri di *linea* e parametri di *fase* e parametri di *avvolgimento*.

I parametri di linea sono quelli che considerano il trasformatore trifase come un blocco unico, considerandolo come una scatola dove entrano le tre fasi ed un eventuale neutro, ed escono altre tre fasi ed un altro eventuale neutro. In questo caso si parla di Potenza Totale di Linea del trasformatore, che rappresenta la potenza globale; Tensione di linea, che sarà quella misurata fra fase e fase; Corrente di linea, che sarà quella che si può misurare su uno dei conduttori di fase.

I parametri di fase sono quelli che considerano il singolo trasformatore, considerando il trasformatore trifase come se composto da tre trasformatori monofasi opportunamente collegati.

I parametri di avvolgimento sono quelli considerano l'avvolgimento singolo del singolo trasformatore, quei parametri misurabili ai capi di ogni avvolgimento.

Per meglio capire, prendiamo come esempio il collegamento a Zig-Zag che è composto da 6 avvolgimenti distinti tutti uguali, ognuno dei quali avrà una tensione di avvolgimento V_{avv} , la serie di due avvolgimenti avrà la tensione di fase V_f , l'intero collegamento avrà una tensione di linea V_L .

I parametri di avvolgimento sono quelli che più ci interessano nel dimensionamento del trasformatore trifase. Quindi è indispensabile analizzare il tipo di collegamento trifase scelto ed individuare correttamente tutti i parametri di avvolgimento come P_{avv} , V_{avv} , I_{avv} per avere a disposizione tutti i dati necessari per effettuare il calcolo.

Elementi da prefissare

Conoscendo i seguenti dati di partenza è possibile calcolare un trasformatore in aria:

$PL_2 = 1000$ potenza di linea disponibile al secondario in voltampere VA.

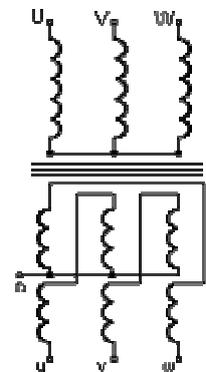
$f = 50$ frequenza alla quale dovrà funzionare il trasformatore in Hz.

$VL_1 = 380$ tensione di linea di alimentazione dell'avvolgimento primario.

$VL_2 = 220$ tensione di linea che dovrà fornire l'avvolgimento secondario a pieno carico.

$B = 1$ Induzione Magnetica in Wb/m^2 alla quale si vuole far funzionare il trasformatore.

Tipo Collegamento = avvolgimento Primario a Stella 'Y' e Secondario a Zig-Zag 'z'



Per meglio comprendere vengono riportati di seguito anche alcuni calcoli relativi agli altri tipi di collegamento: triangolo, stella, zig-zag e bifase.

Calcolo della Potenza Totale secondario

In relazione al tipo di collegamento scelto si calcola la potenza totale secondario che viene riflessa verso l'avvolgimento primario PL :

Se è stato scelto un Collegamento a Triangolo

$$PL = PL_2 \quad (VA) \quad 1000 = 1000 \quad (VA)$$

Se è stato scelto un Collegamento a Stella

$$PL = PL_2 \quad (VA) \quad 1000 = 1000 \quad (VA)$$

Se è stato scelto un Collegamento a Zig-Zag

$$PL = PL_2 \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (VA) \quad 1000 \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} = 1154 \quad (VA)$$

Se è stato scelto un Collegamento a Bifase

$$PL = PL_2 \cdot 1,5 \quad (VA) \quad 1000 \cdot 1,5 = 1500 \quad (VA)$$

Parametri di Singolo Avvolgimento Secondario

In relazione al tipo di collegamento scelto si calcolano i parametri del singolo avvolgimento:

Se è stato scelto un Collegamento a Triangolo

$$V_{avv2} = VL_2 \quad (V) \qquad P_{avv2} = \frac{PL_2}{3} \quad (VA) \qquad I_{avv2} = \frac{P_{avv2}}{V_{avv2}} \quad (A)$$

$$220 = 220 V \qquad \frac{1000}{3} = 333,3 VA \qquad \frac{333,3}{220} = 1,51 A$$

Se è stato scelto un Collegamento a Stella

$$V_{avv2} = \frac{VL_2}{\sqrt{3}} \quad (V) \qquad P_{avv2} = \frac{PL_2}{3} \quad (VA) \qquad I_{avv2} = \frac{P_{avv2}}{V_{avv2}} \quad (A)$$

$$\frac{220}{\sqrt{3}} = 127 V \qquad \frac{1000}{3} = 333,3 VA \qquad \frac{333,3}{127} = 2,62 A$$

Se è stato scelto un Collegamento a Zig-Zag

$$V_{avv2} = \frac{VL_2}{3} \quad (VA) \qquad P_{avv2} = \frac{PL_2}{\sqrt{3} \cdot 3} \quad (VA) \qquad I_{avv2} = \frac{P_{avv2}}{V_{avv2}} \quad (A)$$

$$\frac{220}{3} = 73,3 V \qquad \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 3} = 192,4 VA \qquad \frac{192,4}{73,3} = 2,62 A$$

Se è stato scelto un Collegamento a Bifase

$$V_{avv2} = \frac{VL_2}{2} \quad (V) \qquad P_{avv2} = \frac{PL_2}{2} \quad (VA) \qquad I_{avv2} = \frac{P_{avv2}}{V_{avv2}} \quad (A)$$

$$\frac{220}{2} = 110 V \qquad \frac{1000}{2} = 500 VA \qquad \frac{500}{110} = 4,54 A$$

Parametri di Singolo Avvolgimento Primario

Dalla Potenza Totale Secondario si trova il Rendimento percentuale:

$$\eta = 60 + \left(\frac{\log_e (PL+1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (PL+1000)} \right) (\%) \qquad 60 + \left(\frac{\log_e (1154+1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (1154+1000)} \right) = 93,8 (\%)$$

La potenza dell'avvolgimento primario va considerata aumentata in funzione del rendimento:

$$PL_1 = \frac{PL}{\eta} \quad (VA) \qquad \frac{1154}{0,938} = 1230 VA$$

In relazione al tipo di collegamento scelto si calcolano i parametri del singolo avvolgimento:

Se è stato scelto un Collegamento a Triangolo

$$V_{avv1} = VL_1 \quad (V) \qquad P_{avv1} = \frac{PL_1}{3} \quad (VA) \qquad I_{avv1} = \frac{P_{avv1}}{V_{avv1}} \quad (A)$$

$$380 = 380 V \qquad \frac{1230}{3} = 410 VA \qquad \frac{410}{380} = 1,07 A$$

Se è stato scelto un Collegamento a Stella

$$V_{avv1} = \frac{VL_1}{\sqrt{3}} \quad (V) \qquad P_{avv1} = \frac{PL_1}{3} \quad (VA) \qquad I_{avv1} = \frac{P_{avv1}}{V_{avv1}} \quad (A)$$

$$\frac{380}{\sqrt{3}} = 220 V \qquad \frac{1230}{3} = 410 VA \qquad \frac{410}{220} = 1,87 A$$

Se è stato scelto un Collegamento a Zig-Zag

$$V_{avv1} = \frac{VL_1}{3} \quad (V) \qquad P_{avv1} = \frac{PL_1}{\sqrt{3} \cdot 3} \quad (VA) \qquad I_{avv1} = \frac{P_{avv1}}{V_{avv1}} \quad (A)$$

$$\frac{380}{3} = 126,6 V \qquad \frac{1230}{\sqrt{3} \cdot 3} = 236 VA \qquad \frac{236}{126,6} = 1,87 A$$

Se è stato scelto un Collegamento a Bifase

$$V_{avv1} = \frac{VL_1}{2} \quad (V) \qquad P_{avv1} = \frac{PL_1}{2} \quad (VA) \qquad I_{avv1} = \frac{P_{avv1}}{V_{avv1}} \quad (A)$$

$$\frac{380}{2} = 190 V \qquad \frac{1230}{2} = 615 VA \qquad \frac{615}{190} = 3,22 A$$

Formato Lamierino

Tramite questa formula pratica si può trovare la superficie totale del Lamierino più adatto:

$$AxB = 20 \cdot \sqrt{PL} \quad (cm^2) \qquad AxB = 20 \cdot \sqrt{1154} = 679 cm^2$$

Dal valore di AxB ottenuto, utilizzando le formule specifiche del lamierino da noi scelto (vedi tabelle lamierini) si ricava la misura della colonna centrale C, di seguito tutte le altre quote del lamierino.

Dalla Tabella Lamierini scelgo questo lamierino con le seguenti misure:

AxB(cm ²)	A(mm)	B(mm)	C(mm)	D(mm)	E(mm)	F(mm)	G(mm)	Tipo	Gf(Kg/1cm)
562,5	225	250	50	50	125	50	50	EI250	3,350

Sezione del Nucleo Ferromagnetico di una colonna

Il valore della Sezione Nucleo Ferromagnetico si calcola in funzione del coefficiente di dimensionamento Kd e della potenza secondaria.

$$S_{fe} = Kd \cdot \sqrt{\frac{PL}{3}} \quad (cm^2) \qquad S_{fe} = 1,3 \cdot \sqrt{\frac{1154}{3}} = 25,5 cm^2$$

Dalla Sezione del Nucleo Ferromagnetico e dalla dimensione C del lamierino si ricava lo Spessore del pacco di lamierini, tenendo in considerazione anche il coefficiente di stipamento lamierini K_s .

$$S_p = \frac{S_{fe}}{C} \cdot K_s \quad (cm) \qquad S_p = \frac{25,5}{5} \cdot 1,11 = 5,6 cm$$

Conoscendo le misure del lamierino e dello spessore pacco è necessario trovare un rocchetto di idonee dimensioni. Da un catalogo scelgo un rocchetto in plastica con le seguenti misure:

Cr=51mm	Spr=51mm	M=24mm	H=122mm
---------	----------	--------	---------

Ovviamente occorreranno tre rocchetti uguali uno per ogni colonna del lamierino.

Lo spazio disponibile che offre questo rocchetto per ospitare gli avvolgimenti è dato da:

$$S_{disp} = H \cdot M \quad (mm^2) \qquad S_{disp} = 122 \cdot 24 = 2928 mm^2$$

Scelto il tipo di lamierino, scelto lo spessore del nucleo ferromagnetico scelto il rocchetto adatto alle nostre esigenze, è opportuno aggiornare i calcoli:

$$S_{fe} = \frac{S_p \cdot C}{K_s} \quad (cm^2) \qquad S_{fe} = \frac{5 \cdot 5}{1,11} = 22,5 cm^2$$

Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro

Conoscendo lo spessore del singolo lamierino $sl=0,5mm$, e lo spessore del pacco lamellare S_p :

$$N_L = \frac{S_p}{K_s \cdot sl} \quad (lamierini) \qquad N_L = \frac{5}{1,11 \cdot 0,05} = 90 lamierini$$

Considerando il peso di un centimetro di spessore di pacco lamellare Gf calcolo il peso totale del pacco lamellare:

$$Gl = Gf \cdot S_p \quad (Kg) \qquad Gl = 3,350 \cdot 5 = 16,8 Kg$$

Conoscendo la cifra di perdita specifica del lamierino $ws = 3W/Kg$ si possono valutare le perdite nel ferro pf del nucleo ferromagnetico:

$$pf = B^2 \cdot ws \cdot Gl \quad (watt) \qquad pf = 1^2 \cdot 3 \cdot 16,8 = 50,3 \text{ watt}$$

Numero Spire

La valutazione del numero delle spire dell'avvolgimento primario e secondario si effettua in relazione ai volt per spira:

$$e = 4,44 \cdot f \cdot Sfe \cdot B \cdot 10^{-4} \quad (V) \qquad e = 4,44 \cdot 50 \cdot 22,5 \cdot 1 \cdot 10^{-4} = 0,5V$$

Al secondario si verifica una caduta di tensione % in relazione alla potenza del trasformatore:

$$v\% = \frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{PL}{2} + 2,72\right)\right)^{1,35}} \quad (\%) \qquad \frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{1154}{2} + 2,72\right)\right)^{1,35}} = 3,28 (\%)$$

Si può pertanto scrivere la relazione relativa alla tensione secondaria a vuoto:

$$V_{avv20} = \left(1 + \frac{v\%}{100}\right) \cdot V_{avv2} \quad (V) \qquad V_{avv20} = \left(1 + \frac{3,28}{100}\right) \cdot 73,3 = 75,7V$$

Calcoliamo le spire di un avvolgimento primario

$$N_1 = \frac{V_{avv1}}{e} \quad (spire) \qquad N_1 = \frac{220}{0,5} = 439 \text{ spire}$$

Calcoliamo le spire di un avvolgimento secondario, considerando la tensione secondaria a vuoto

$$N_2 = \frac{V_{avv20}}{e} \quad (spire) \qquad N_2 = \frac{75,7}{0,5} = 152 \text{ spire}$$

Ovviamente nell'esecuzione dell'avvolgimento Primario o dell'avvolgimento Secondario considerare che: Per realizzare un collegamento a Triangolo, o Stella, o Bifase si deve avvolgere 1 avvolgimento su ogni colonna per un totale di 3 avvolgimenti.

Per realizzare un collegamento a Zig-Zag si devono avvolgere 2 avvolgimenti su ogni colonna per un totale di 6 avvolgimenti.

Diametro dei Conduttori

Dalla corrente e dalla densità di corrente si trova il diametro del filo di rame nudo, poi dalla tabella filo rame si sceglie il valore più prossimo.

$$\phi_r = 2 \cdot \sqrt{\frac{I}{J \cdot \pi}} \quad (mm) \qquad \phi_{r1} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1,87}{2,5 \cdot \pi}} = 0,95 (mm) \qquad \phi_{r2} = 2 \cdot \sqrt{\frac{2,62}{2,5 \cdot \pi}} = 1,15 (mm)$$

Dalla tabella Filo Rame scelgo questi fili con le seguenti misure:

Diametro Filo Nudo ϕ_N (mm)	Diametro Filo Isolato ϕ_I (mm)	Sezione filo rame nudo Sf (mm ²)	n° di Spire in 1 cm di spazio N_{spcm}	Coefficien. di Riempimento Kf	Resistenza di 1m di filo Rf (Ω)	Peso di 1m di filo di rame Pf (gr/m)
0,9	0,97	0,6362	9,27	1,11	0,0277	5,6619
1,1	1,19	0,9503	7,56	1,11	0,0185	8,4580

Lunghezza filo avvolgimento e peso del rame

La lunghezza della spira media attorno al rocchetto è:

$$l_{spm} = 2 \cdot (Cr + M) + 2 \cdot (Spr + M) \quad (mm) \qquad l_{spm} = 2 \cdot (51 + 24) + 2 \cdot (51 + 24) = 300 \text{ mm}$$

La lunghezza totale del filo dell'avvolgimento in relazione al numero di spire:

$$l_{avv} = l_{spm} \cdot N \cdot 10^{-3} \quad (m) \qquad l_{avv1} = 300 \cdot 439 \cdot 10^{-3} = 131,7 \text{ m}$$

$$l_{avv2} = 300 \cdot 152 \cdot 10^{-3} = 45,6 \text{ m}$$

se Zig-Zag c'è un avvolgimento in più:

$$l_{avv2} = 300 \cdot 152 \cdot 10^{-3} = 45,6 \text{ m}$$

Considerando il peso di un metro di filo di rame Pf calcolo il peso rame totale degli avvolgimenti:

$$Gr = Pf \cdot l_{avv} \cdot 10^{-3} \quad (Kg)$$

$$Gr_1 = 5,6619 \cdot 131,7 \cdot 10^{-3} = 0,745 \text{ Kg}$$

$$Gr_2 = 8,4580 \cdot 45,6 \cdot 10^{-3} = 0,385 \text{ Kg}$$

se Zig-Zag c'è un avvolgimento in più:

$$Gr_2 = 8,4580 \cdot 45,6 \cdot 10^{-3} = 0,385 \text{ Kg}$$

Resistenza degli avvolgimenti

Considerando la resistenza di un metro di filo di rame Rf calcolo la resistenza totale degli avvolgimenti:

$$R = Rf \cdot l_{avv} \quad (\Omega)$$

$$R_1 = 0,0277 \cdot 131,7 = 3,64 \Omega$$

$$R_2 = 0,0185 \cdot 45,6 = 0,84 \Omega$$

se Zig-Zag c'è un avvolgimento in più:

$$R_2 = 0,0185 \cdot 45,6 = 0,84 \Omega$$

Perdite nel Rame

Determiniamo il nuovo valore di densità di corrente in relazione al filo utilizzato, poi conoscendo il peso del rame avvolgimento calcoliamo la potenza persa nel rame.

$$J = \frac{A}{Sf} \quad (A/mm^2)$$

$$J_1 = \frac{1,87}{0,6362} = 2,9 \text{ A/mm}^2$$

$$J_2 = \frac{2,62}{0,9503} = 2,8 \text{ A/mm}^2$$

se Zig-Zag c'è un avvolgimento in più:

$$J_2 = \frac{2,62}{0,9503} = 2,8 \text{ A/mm}^2$$

In relazione ai conduttori scelti la densità di corrente rientra nei limiti stabiliti, per cui si procede con il calcolo della potenza persa nel rame:

$$pr = 2,4 \cdot J^2 \cdot Gr \quad (watt)$$

$$pr_1 = 2,4 \cdot 2,9^2 \cdot 0,745 = 15,5 \text{ watt}$$

$$pr_2 = 2,4 \cdot 2,8^2 \cdot 0,384 = 7,1 \text{ watt}$$

se Zig-Zag c'è un avvolgimento in più:

$$pr_2 = 2,4 \cdot 2,8^2 \cdot 0,384 = 7,1 \text{ watt}$$

Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento

La tabella filo rame fornisce anche il numero delle spire che possono essere contenute assialmente in un centimetro N_{spcm} .

In base all'altezza H della finestra del rocchetto si può stabilire quante spire stanno in uno strato:

$$S_{Str} = H \cdot N_{spcm} \quad (spire \cdot strato)$$

$$S_{Str1} = 12,2 \cdot 9,27 = 113,1 \text{ spire} \cdot \text{strato}$$

$$S_{Str2} = 12,2 \cdot 7,56 = 92,3 \text{ spire} \cdot \text{strato}$$

se Zig-Zag c'è un avvolgimento in più:

$$S_{Str2} = 12,2 \cdot 7,56 = 92,3 \text{ spire} \cdot \text{strato}$$

Considerando le spire totali si possono calcolare anche il numero degli strati necessari

$$N_{Str} = \frac{N}{S_{Str}} \quad (strati)$$

$$N_{Str1} = \frac{439}{113,1} = 3,9 \text{ strati}$$

$$N_{Str2} = \frac{151}{92,3} = 1,6 \text{ strati}$$

se Zig-Zag c'è un avvolgimento in più:

$$N_{Str2} = \frac{151}{92,3} = 1,6 \text{ strati}$$

Controllo Ingombri

Calcoliamo l'Ingombro Rame considerando il diametro filo rame isolato come se fosse di sezione quadrata in modo da tenere conto anche degli spazi d'aria fra spira e spira, che moltiplichiamo per il numero di spire e per il coefficiente di riempimento Kf che tiene conto di una certa tolleranza nell'esecuzione dell'avvolgimento.

$$Ing_R = \phi_1^2 \cdot N \cdot Kf \quad (mm^2)$$

$$Ing_{R1} = 0,97^2 \cdot 439 \cdot 1,11 = 459 \text{ mm}^2$$

$$Ing_{R2} = 1,19^2 \cdot 152 \cdot 1,11 = 239 \text{ mm}^2$$

se Zig-Zag c'è un avvolgimento in più: $Ing_{R2} = 1,19^2 \cdot 152 \cdot 1,11 = 239 \text{ mm}^2$

Totale Ingombro Rame

$$Ing_{Rtot} = \sum Ing_{Rx} \quad (\text{mm}^2) \quad Ing_{Rtot} = 459 + 239 + 239 = 937 \text{ mm}^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Strati. Supponendo di interporre fra ogni strato di spire un cartoncino isolante di spessore $Ist=0,2\text{mm}$,

$$Ing_{IST} = I_{ST} \cdot H \cdot \text{int}(N_{str}) \quad (\text{mm}^2) \quad Ing_{IST1} = 0,2 \cdot 122 \cdot (3) = 73,2 \text{ mm}^2$$

$$Ing_{IST2} = 0,2 \cdot 122 \cdot (1) = 24,4 \text{ mm}^2$$

se Zig-Zag c'è un avvolgimento in più: $Ing_{IST2} = 0,2 \cdot 122 \cdot (1) = 24,4 \text{ mm}^2$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Strati:

$$Ing_{ISTtot} = \sum Ing_{ISTx} \quad (\text{mm}^2) \quad Ing_{ISTtot} = 73,2 + 24,4 + 24,4 = 122 \text{ mm}^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti. Terminata la costruzione alla fine di tutti gli avvolgimenti e fra un avvolgimento e l'altro supponiamo di inserire un cartoncino isolante di spessore $Iav=0,5\text{mm}$.

$$Ing_{IAV} = I_{AV} \cdot H \quad (\text{mm}^2) \quad Ing_{IAV} = 0,5 \cdot 122 = 61 \text{ mm}^2$$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti:

Essendo $n^{\circ}AVV$ il numero di avvolgimenti primari e secondari che compongono il trasformatore.

$$Ing_{IAVtot} = Ing_{IAV} \cdot n^{\circ}AVV \quad (\text{mm}^2) \quad Ing_{IAVtot} = 61 \cdot 3 = 183 \text{ mm}^2$$

Calcoliamo l'ingombro totale maggiorandolo di un coefficiente di ingombro percentuale $Ki=10\%$ che tiene conto delle imperfezioni nella realizzazione dell'avvolgimento e degli eventuali spazi d'aria.

$$Ing_{TOT} = Ing_{Rtot} + Ing_{ISTtot} + Ing_{IAVtot} \cdot \left(1 + \frac{Ki\%}{100}\right) \quad (\text{mm}^2)$$

$$Ing_{TOT} = 937 + 122 + 183 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) = 1367 \text{ mm}^2$$

Il valore dell'ingombro totale è minore dello spazio offerto dal rocchetto, quindi gli avvolgimenti saranno contenuti nel rocchetto comodamente.

Verifica controllo, rendimento e caduta di tensione

Verifica del Rendimento % considerando le eventuali perdite calcolate:

$$\eta\% = \frac{P}{P + pf + pr} \cdot 100 \quad (\%) \quad \eta\% = \frac{1154}{1154 + 50,3 + 15,5 + 7,1} \cdot 100 = 94\%$$

Calcolo della caduta di tensione secondaria considerando le eventuali perdite calcolate:

$$v2 = \frac{pr_1 \cdot N_2}{I_1 \cdot N_1} + \frac{pr_2}{I_2} \quad (V) \quad v2 = \frac{15,5 \cdot 152}{1,87 \cdot 439} + \frac{7,1}{2,62} = 5,57 V$$

Calcolo della tensione secondaria a carico:

$$Vc = V_{20} - v2 \quad (V) \quad Vc = 75,7 - 5,57 = 70,12 V$$

Verifica della Caduta di Tensione %:

$$v\% = \frac{V_2 - Vc}{Vc} \cdot 100 \quad (\%) \quad v\% = \frac{73,3 - 70,12}{70,12} \cdot 100 = 4,5\%$$

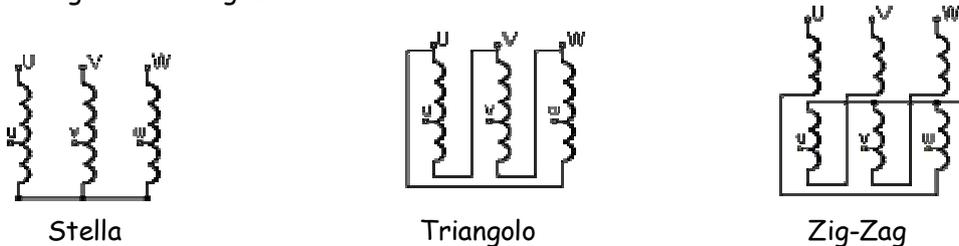
Concludendo possiamo dire che il rendimento e la caduta di tensione % si discostano di poco rispetto ai valori calcolati in precedenza.

Comunque lo scopo di queste ultime verifiche è quello di capire se il dimensionamento del trasformatore è corretto, ed eventualmente se ne è il caso, correggere alcuni parametri in modo da rientrare con un rendimento e una c.d.t.% pressappoco nei valori previsti.

Dimensionamento di un AutoTrasformatore Trifase in aria

Un autotrasformatore trifase può considerarsi come costituito da tre autotrasformatori monofasi opportunamente collegati. Quindi valgono le stesse regole del autotrasformatore monofase.

L'avvolgimento primario e secondario sono riuniti in un unico avvolgimento, ovviamente esiste un avvolgimento su ognuna delle tre colonne.



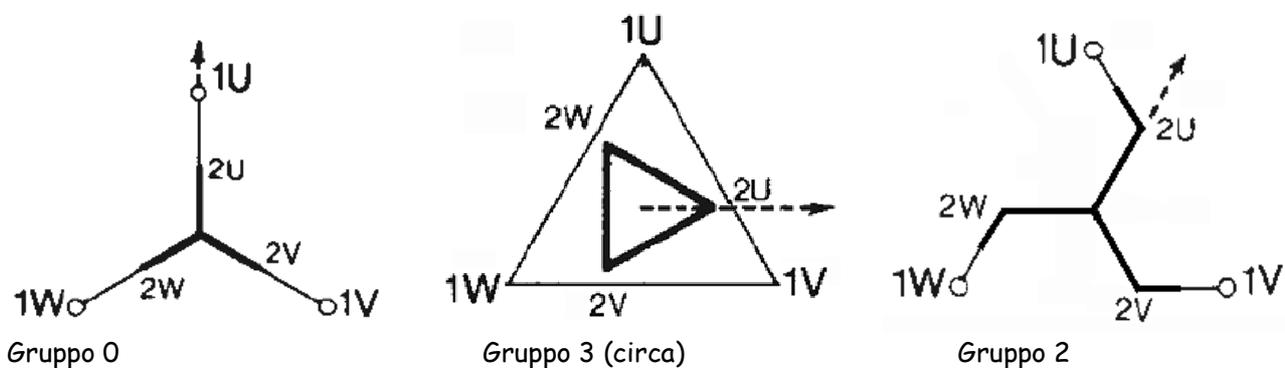
Spostamento di fase dell'autotrasformatore trifase

Come già descritto per i trasformatori trifasi anche negli autotrasformatori trifasi ha inoltre importanza l'eventuale spostamento di fase della tensione secondaria rispetto alla tensione primaria. Ciò interessa agli effetti del collegamento in parallelo di autotrasformatori, che è possibile effettuare solo se questi sono perfettamente uguali (stessa potenza, stesso collegamento, stesso numero spire, stessa variazione di tensione da vuoto a carico).

Nell'autotrasformatore con collegamento a Stella indifferentemente dal punto in cui viene prelevata la presa di uscita che identifica il secondario sull'intero avvolgimento, la tensione secondaria può soltanto essere in fase, cioè equivale a uno spostamento di fase rispettivamente di 0° (gruppo 0).

Nell'autotrasformatore con collegamento a Triangolo il punto in cui viene prelevata la presa di uscita che identifica il secondario sull'intero avvolgimento determina un diverso spostamento di fase progressivo, la tensione secondaria può essere da in fase fino a 120° sfasata rispetto alla tensione primaria, cioè equivale a uno spostamento di fase progressivo da 0° fino a 120° (da gruppo 0 a gruppo 4).

Nell'autotrasformatore con collegamento a Zig-Zag il punto in cui viene prelevata la presa di uscita che identifica il secondario sull'intero avvolgimento determina un diverso spostamento di fase in relazione all'avvolgimento superiore o inferiore in cui viene realizzata la presa, la tensione secondaria può essere o in fase oppure 60° sfasata rispetto alla tensione primaria, cioè equivale a uno spostamento di fase rispettivamente di 0° oppure 60° (gruppo 0 oppure gruppo 2). Se la presa è nell'avvolgimento superiore si ha gruppo 0, se invece è nell'avvolgimento inferiore gruppo 2.



Elementi da prefissare

Conoscendo i seguenti dati di partenza è possibile calcolare un trasformatore in aria:

$PL_2 = 1000$ potenza di linea disponibile al secondario in voltampere VA.

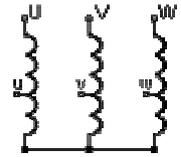
$f = 50$ frequenza alla quale dovrà funzionare il trasformatore in Hz.

$VL_1 = 380$ tensione di linea di alimentazione dell'avvolgimento primario.

$VL_2 = 220$ tensione di linea che dovrà fornire l'avvolgimento secondario a pieno carico.

$B = 1$ Induzione Magnetica in Wb/m² alla quale si vuole far funzionare il trasformatore.

Tipo di collegamento: Stella

**Calcolo della Potenza Totale secondario**

In relazione al tipo di collegamento si calcola la potenza totale secondario, cioè quella che viene riflessa verso l'avvolgimento primario:

Collegamento a Stella

$$PL = PL_2 \quad (VA) \qquad 1000 = 1000 \quad (VA)$$

Parametri di Singolo Avvolgimento Secondario

In relazione al tipo di collegamento si calcolano i parametri del singolo avvolgimento:

E' stato scelto un Collegamento a Stella

$$V_{avv2} = \frac{VL_2}{\sqrt{3}} \quad (V) \qquad P_{avv2} = \frac{PL_2}{3} \quad (VA) \qquad I_{avv2} = \frac{P_{avv2}}{V_{avv2}} \quad (A)$$

$$\frac{220}{\sqrt{3}} = 127 V \qquad \frac{1000}{3} = 333,3 VA \qquad \frac{333,3}{127} = 2,62 A$$

Parametri di Singolo Avvolgimento Primario

Dalla Potenza Totale Secondario si trova il Rendimento percentuale:

$$\eta = 60 + \left(\frac{\log_e (PL+1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (PL+1000)} \right) (\%) \qquad 60 + \left(\frac{\log_e (1000+1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (1000+1000)} \right) = 93,4 (\%)$$

La potenza dell'avvolgimento primario va considerata aumentata in funzione del rendimento:

$$PL_1 = \frac{PL}{\eta} \quad (VA) \qquad \frac{1000}{0,934} = 1070 VA$$

E' stato scelto un Collegamento a Stella

$$V_{avv1} = \frac{VL_1}{\sqrt{3}} \quad (V) \qquad P_{avv1} = \frac{PL_1}{3} \quad (VA) \qquad I_{avv1} = \frac{P_{avv1}}{V_{avv1}} \quad (A)$$

$$\frac{380}{\sqrt{3}} = 219,4 V \qquad \frac{1070}{3} = 356 VA \qquad \frac{356}{219,4} = 1,62 A$$

Corrente primario e secondario

Essendo un Autotrasformatore Abbassatore calcoliamo I_s e I_d :

$$I_s = I_{avv1} \qquad I_s = 1,62 A$$

$$I_d = I_{avv2} - I_{avv1} \qquad I_d = 2,62 - 1,62 = 1 A$$

Potenze dell'Autotrasformatore

Al secondario si verifica una caduta di tensione % in relazione alla potenza del trasformatore:

$$v\% = \frac{40}{\left(\log_e\left(\frac{PL}{2} + 2,72\right)\right)^{1,35}} (\%) \qquad \frac{40}{\left(\log_e\left(\frac{1000}{2} + 2,72\right)\right)^{1,35}} = 3,4 (\%)$$

Si può pertanto scrivere la relazione relativa alla tensione secondaria a vuoto:

$$V_{avv20} = \left(1 + \frac{v\%}{100}\right) \cdot V_{avv2} \quad (V) \qquad V_{avv20} = \left(1 + \frac{3,4}{100}\right) \cdot 127 = 131,3V$$

Essendo V_H la tensione più elevata e V_L la tensione più bassa dell'autotrasformatore. Calcoliamo il fattore di riduzione Kr : e di seguito ricaviamo il valore della Potenza Propria .

$$Kr = \frac{V_H - V_L}{V_H} \qquad Kr = \frac{219,4 - 127}{219,4} = 0,4211$$

$$Pp = Kr \cdot PL \quad (VA) \qquad Pp = 0,4211 \cdot 1000 = 421,1 VA$$

Formato Lamierino

Tramite questa formula pratica si può trovare la superficie totale del Lamierino più adatto:

$$AxB = 20 \cdot \sqrt{Pp} \quad (cm^2) \qquad AxB = 20 \cdot \sqrt{421,1} = 410 cm^2$$

Dal valore di AxB ottenuto, utilizzando le formule specifiche del lamierino da noi scelto (vedi tabelle lamierini) si ricava la misura della colonna centrale C, di seguito tutte le altre quote del lamierino.

Dalla Tabella Lamierini scelgo questo lamierino con le seguenti misure:

AxB(cm ²)	A(mm)	B(mm)	C(mm)	D(mm)	E(mm)	F(mm)	G(mm)	Tipo	Gf(Kg/1cm)
360	180	200	40	40	100	40	40	EI200	2,144

Sezione del Nucleo Ferromagnetico di una colonna

Il valore della Sezione Nucleo Ferromagnetico si calcola in funzione del coefficiente di dimensionamento Kd e della potenza secondaria.

$$Sfe = Kd \cdot \sqrt{\frac{Pp}{3}} \quad (cm^2) \qquad Sfe = 1,3 \cdot \sqrt{\frac{421,1}{3}} = 15,4 cm^2$$

Dalla Sezione del Nucleo Ferromagnetico e dalla dimensione C del lamierino si ricava lo Spessore del pacco di lamierini, tenendo in considerazione anche il coefficiente di stipamento lamierini K_s .

$$Sp = \frac{Sfe}{C} \cdot K_s \quad (cm) \qquad Sp = \frac{15,4}{4} \cdot 1,11 = 4,27 cm$$

Conoscendo le misure del lamierino e dello spessore pacco è necessario trovare un rocchetto di idonee dimensioni. Da un catalogo scelgo un rocchetto in plastica con le seguenti misure:

Cr=41mm	Spr=41mm	M=19mm	H=97mm
---------	----------	--------	--------

Ovviamente occorreranno tre rocchetti uguali uno per ogni colonna del lamierino.

Lo spazio disponibile che offre questo rocchetto per ospitare gli avvolgimenti è dato da:

$$Sdisp = H \cdot M \quad (mm^2) \qquad Sdisp = 97 \cdot 19 = 1843 mm^2$$

Scelto il tipo di lamierino, scelto lo spessore del nucleo ferromagnetico scelto il rocchetto adatto alle nostre esigenze, è opportuno aggiornare i calcoli:

$$Sfe = \frac{Sp \cdot C}{K_s} \quad (cm^2) \qquad \frac{4 \cdot 4}{1,11} = 14,4 cm^2$$

Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro

Conoscendo lo spessore del singolo lamierino $sl=0,5mm$, e lo spessore del pacco lamellare Sp :

$$N_L = \frac{Sp}{K_s \cdot sl} \quad (lamierini) \qquad N_L = \frac{4}{1,11 \cdot 0,05} = 72 lamierini$$

Considerando il peso di un centimetro di spessore di pacco lamellare Gf calcolo il peso totale del pacco lamellare:

$$Gl = Gf \cdot Sp \quad (Kg) \qquad Gl = 2,144 \cdot 4 = 8,576 \text{ Kg}$$

Conoscendo la cifra di perdita specifica del lamierino $ws = 3W/Kg$ si possono valutare le perdite nel ferro pf del nucleo ferromagnetico:

$$pf = B^2 \cdot ws \cdot Gl \quad (watt) \qquad pf = 1^2 \cdot 3 \cdot 8,576 = 25,72 \text{ watt}$$

Numero Spire

La valutazione del numero delle spire dell'avvolgimento primario e secondario si effettua in relazione ai volt per spira:

$$e = 4,44 \cdot f \cdot Sfe \cdot B \cdot 10^{-4} \quad (V) \qquad e = 4,44 \cdot 50 \cdot 14,4 \cdot 1 \cdot 10^{-4} = 0,320V$$

Calcoliamo le spire di un avvolgimento primario

$$N_1 = \frac{V_{avv1}}{e} \quad (spire) \qquad N_1 = \frac{219,4}{0,320} = 686 \text{ spire}$$

Calcoliamo le spire di un avvolgimento secondario, considerando la tensione secondaria a vuoto

$$N_2 = \frac{V_{avv20}}{e} \quad (spire) \qquad N_2 = \frac{131,3}{0,320} = 410 \text{ spire}$$

Nel caso di Autotrasformatore Abbassatore calcoliamo Ns e Nd :

$$Ns = N_1 - N_2 \qquad Ns = 686 - 410 = 276 \text{ spire}$$

$$Nd = N_2 \qquad Nd = 410 \text{ spire}$$

Ovviamente nell'esecuzione dell'avvolgimento si deve avvolgere 1 avvolgimento Ns e 1 avvolgimento Nd su ogni colonna per un totale di 6 avvolgimenti:

Diametro dei Conduttori

Dalla corrente e dalla densità di corrente si trova il diametro del filo di rame nudo, poi dalla tabella filo rame si sceglie il valore più prossimo.

$$\phi r = 2 \cdot \sqrt{\frac{I}{J \cdot \pi}} \quad (mm) \qquad \phi r_1 = 2 \cdot \sqrt{\frac{1,62}{2,5 \cdot \pi}} = 0,90 \text{ (mm)} \qquad \phi r_2 = 2 \cdot \sqrt{\frac{1}{2,5 \cdot \pi}} = 0,71 \text{ (mm)}$$

Dalla tabella Filo Rame scelgo questi fili con le seguenti misure:

Diametro Filo Nudo ϕ_N (mm)	Diametro Filo Isolato ϕ_I (mm)	Sezione filo rame nudo Sf (mm ²)	n° di Spire in 1 cm di spazio Ns_{pcm}	Coefficien. di Riempimento Kf	Resistenza di 1m di filo Rf (Ω)	Peso di 1m di filo di rame Pf (gr/m)
0,9	0,97	0,6362	9,27	1,11	0,0277	5,6619
0,7	0,76	0,3848	11,81	1,11	0,0457	3,4251

Lunghezza filo avvolgimento e peso del rame

La lunghezza della spira media attorno al rocchetto è:

$$l_{spm} = 2 \cdot (Cr + M) + 2 \cdot (Spr + M) \quad (mm) \qquad l_{spm} = 2 \cdot (41 + 19) + 2 \cdot (41 + 19) = 240 \text{ mm}$$

La lunghezza totale del filo dell'avvolgimento in relazione al numero di spire:

$$l_{avv} = l_{spm} \cdot N \cdot 10^{-3} \quad (m) \qquad l_{avv1} = 240 \cdot 276 \cdot 10^{-3} = 66 \text{ m}$$

$$l_{avv2} = 240 \cdot 410 \cdot 10^{-3} = 98 \text{ m}$$

Considerando il peso di un metro di filo di rame Pf calcolo il peso rame totale degli avvolgimenti:

$$Gr = Pf \cdot l_{avv} \cdot 10^{-3} \quad (Kg) \qquad Gr_1 = 5,6619 \cdot 66 \cdot 10^{-3} = 0,374 \text{ Kg}$$

$$Gr_2 = 3,4251 \cdot 98 \cdot 10^{-3} = 0,336 \text{ Kg}$$

Resistenza degli avvolgimenti

Considerando la resistenza di un metro di filo di rame R_f calcolo la resistenza totale degli avvolgimenti:

$$R = R_f \cdot l_{avv} \quad (\Omega) \quad R_1 = 0,0277 \cdot 66 = 1,83 \Omega \quad R_2 = 0,0457 \cdot 98 = 4,5 \Omega$$

Perdite nel Rame

Determiniamo il nuovo valore di densità di corrente in relazione al filo utilizzato, poi conoscendo il peso del rame avvolgimento calcoliamo la potenza persa nel rame.

$$J = \frac{A}{S_f} \quad (A/mm^2) \quad J_1 = \frac{1,62}{0,6362} = 2,55 A/mm^2 \quad J_2 = \frac{1}{0,3848} = 2,59 A/mm^2$$

In relazione ai conduttori scelti la densità di corrente rientra nei limiti stabiliti, per cui si procede con il calcolo della potenza persa nel rame:

$$pr = 2,4 \cdot J^2 \cdot Gr \quad (watt) \quad pr_1 = 2,4 \cdot 2,55^2 \cdot 0,374 = 5,84 watt$$

$$pr_2 = 2,4 \cdot 2,59^2 \cdot 0,336 = 5,41 watt$$

Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento

La tabella filo rame fornisce anche il numero delle spire che possono essere contenute assialmente in un centimetro N_{spcm} .

In base all'altezza H della finestra del rocchetto si può stabilire quante spire stanno in uno strato:

$$S_{Str} = H \cdot N_{spcm} \quad (spire \cdot strato) \quad S_{Str1} = 9,7 \cdot 9,27 = 88,9 spire \cdot strato$$

$$S_{Str2} = 9,7 \cdot 11,81 = 114,5 spire \cdot strato$$

Considerando le spire totali si possono calcolare anche il numero degli strati necessari

$$N_{Str} = \frac{N}{S_{Str}} \quad (strati) \quad N_{Str1} = \frac{276}{89,9} = 3,1 strati \quad N_{Str2} = \frac{410}{114,5} = 3,6 strati$$

Controllo Ingombri

Calcoliamo l'Ingombro Rame considerando il diametro filo rame isolato come se fosse di sezione quadrata in modo da tenere conto anche degli spazi d'aria fra spira e spira, che moltiplichiamo per il numero di spire e per il coefficiente di riempimento K_f che tiene conto di una certa tolleranza nell'esecuzione dell'avvolgimento.

$$Ing_R = \phi_l^2 \cdot N \cdot K_f \quad (mm^2) \quad Ing_{R1} = 0,97^2 \cdot 276 \cdot 1,11 = 288,9 mm^2$$

$$Ing_{R2} = 0,76^2 \cdot 410 \cdot 1,11 = 264 mm^2$$

Totale Ingombro Rame

$$Ing_{Rtot} = \Sigma Ing_{Rx} \quad (mm^2) \quad Ing_{Rtot} = 288,9 + 264 = 552,9 mm^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Strati. Supponendo di interporre fra ogni strato di spire un cartoncino isolante di spessore $I_{st}=0,2mm$,

$$Ing_{IST} = I_{ST} \cdot H \cdot \text{int}(N_{Str}) \quad (mm^2) \quad Ing_{IST1} = 0,2 \cdot 97 \cdot (3) = 58,2 mm^2$$

$$Ing_{IST2} = 0,2 \cdot 97 \cdot (3) = 58,2 mm^2$$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Strati:

$$Ing_{ISTtot} = \Sigma Ing_{ISTx} \quad (mm^2) \quad Ing_{ISTtot} = 58,2 + 58,2 = 116,4 mm^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti. Terminata la costruzione alla fine di tutti gli avvolgimenti e fra un avvolgimento e l'altro supponiamo di inserire un cartoncino isolante di spessore $I_{av}=0,5mm$.

$$Ing_{IAV} = I_{AV} \cdot H \quad (mm^2)$$

$$Ing_{IAV} = 0,5 \cdot 97 = 48,5 \text{ mm}^2$$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti:

Essendo $n^\circ AVV$ il numero di avvolgimenti primari e secondari che compongono il trasformatore.

$$Ing_{IAVtot} = Ing_{IAV} \cdot n^\circ AVV \quad (mm^2)$$

$$Ing_{IAVtot} = 48,5 \cdot 2 = 97 \text{ mm}^2$$

Calcoliamo l'ingombro totale maggiorandolo di un coefficiente di ingombro percentuale $Ki=10\%$ che tiene conto delle imperfezioni nella realizzazione dell'avvolgimento e degli eventuali spazi d'aria.

$$Ing_{TOT} = Ing_{Rot} + Ing_{ISTot} + Ing_{IAVtot} \cdot \left(1 + \frac{Ki\%}{100}\right) \quad (mm^2)$$

$$Ing_{TOT} = 552,9 + 116,4 + 97 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) = 843 \text{ mm}^2$$

Il valore dell'ingombro totale è minore dello spazio offerto dal rocchetto, quindi gli avvolgimenti saranno contenuti nel rocchetto comodamente.

Verifica controllo, rendimento e caduta di tensione

Verifica del Rendimento % considerando le eventuali perdite calcolate:

$$\eta\% = \frac{P}{P + pf + pr} \cdot 100 \quad (\%)$$

$$\eta\% = \frac{1000}{1000 + 25,72 + 5,84 + 5,41} \cdot 100 = 96\%$$

Calcolo della caduta di tensione secondaria considerando le eventuali perdite calcolate:

$$v2 = \frac{pr_1 \cdot Nd}{I_s \cdot N_s} + \frac{pr_2}{Id} \quad (V)$$

$$v2 = \frac{5,84 \cdot 410}{1,62 \cdot 276} + \frac{5,41}{1} = 10,76 \text{ V}$$

Calcolo della tensione secondaria a carico:

$$V_c = V_{20} - v2 \quad (V)$$

$$V_c = 131,3 - 10,76 = 120,53 \text{ V}$$

Verifica della Caduta di Tensione %:

$$v\% = \frac{V_2 - V_c}{V_c} \cdot 100 \quad (\%)$$

$$v\% = \frac{127 - 120,53}{120,53} \cdot 100 = 5,3 \%$$

Concludendo possiamo dire che il rendimento e la caduta di tensione % si discostano di poco rispetto ai valori calcolati in precedenza.

Comunque lo scopo di queste ultime verifiche è quello di capire se il dimensionamento del trasformatore è corretto, ed eventualmente se ne è il caso, correggere alcuni parametri in modo da rientrare con un rendimento e una c.d.t.% pressappoco nei valori previsti.

Introduzione al Trasformatore di Uscita per Amplificatore Valvolare

Questo capitolo tratta separatamente la costruzione di Adattatori di Impedenza (trasformatori di uscita) per stadio asimmetrico (Single-Ended SE) e stadio simmetrico (Push-Pull PP). Per non confondere le idee e facilitare la conoscenza dei due tipi di adattatori di impedenza è stata ripetuta tutta la procedura di calcolo dall'inizio alla fine per entrambi i trasformatori di uscita.

Il trasformatore di uscita è costituito da un nucleo di ferro di lamierini, e da due avvolgimenti di filo di rame smaltato; uno di essi è formato da molte spire e viene detto primario, l' altro è formato da poche spire e viene detto secondario. Il primario è inserito nel circuito fra il positivo alta tensione continua e l' anodo della valvola finale; il secondario è invece collegato direttamente alla bobina mobile dell' altoparlante o cassa acustica.

Generalità sul trasformatore di uscita

Il trasformatore di uscita ha la funzione di trasferire la potenza dell' amplificatore a bassa frequenza all' altoparlante, ciò non sarebbe possibile data la diversità tra le due impedenze. L'adattamento di impedenza tra la valvola o le valvole finali e l'altoparlante è importantissimo ai fini della qualità di riproduzione del suono, per cui il trasformatore di uscita è una delle sezioni più delicate del sistema di amplificazione. Possiamo dire che il trasformatore di uscita è un adattatore che serve per accoppiare due stadi ad impedenza diversa.

La bobina mobile dell' altoparlante è leggera e sottile per potersi muovere velocemente entro il sottile traferro del magnete, ed è formata solo da poche spire di filo di rame smaltato, per cui l'impedenza di carico (Z_c) che queste spire oppongono alle audiofrequenze risulta essere di pochi ohm (da 2Ω a 20Ω circa).

La valvola finale, invece si comporta come una resistenza di valore elevato, e funziona normalmente solo se nel suo circuito di anodo è presente una adeguata impedenza di carico, costituita dall' avvolgimento primario del trasformatore di uscita. Questa impedenza di carico che richiede la valvola dipende dal tipo di valvola utilizzata e dalle sue condizioni di lavoro, cioè dalle tensioni ad essa applicate, per cui l' impedenza di carico anodico di una valvola (Z_a) può essere diverse migliaia di ohm (da 1500Ω a 18000Ω circa)

Se inseriamo la bobina mobile dell' altoparlante direttamente sul circuito anodico dello stadio finale di bassa frequenza senza ricorrere al trasformatore di uscita questa si comporterebbe come una resistenza di pochi ohm posta in serie ad un'altra resistenza del valore di qualche migliaia di ohm: le due resistenze formerebbero un divisore di tensione dove ai capi della bobina mobile risulterebbe una tensione molto bassa praticamente zero volt, quindi l' altoparlante non sarebbe in grado di riprodurre la bassa frequenza ad elevata intensità.

Sarebbe possibile eliminare il trasformatore di uscita elevando l' impedenza della bobina mobile di circa un migliaio di volte, ma ciò richiederebbe un avvolgimento di moltissime spire, il che la appesantirebbe notevolmente. In passato venivano usati questi altoparlanti con bobina mobile ad alta impedenza di circa 3500Ω , il risultato era discreto ma non buono.

Il trasformatore di uscita è costituito da un avvolgimento primario con impedenza pari a quella richiesta dalla valvola finale dell' amplificatore e da un avvolgimento secondario di impedenza pari a quella della bobina mobile dell' altoparlante. Così si può dire che mentre nel circuito anodico della valvola finale vi è molta tensione e poca corrente, nel circuito della bobina mobile vi è poca tensione e molta corrente.

La qualità del trasformatore d'uscita

Il trasformatore di uscita è la parte più importante dell' amplificatore, perché solo se riesce a trasferire in modo perfetto tutta la banda audio frequenza all' altoparlante si può definire un trasformatore di qualità.

Nel caso di trasformatori di uscita normali per apparecchi radio le caratteristiche devono essere lineari tra 100 e 4500Hz, mentre negli amplificatori finali di qualità il trasformatore di uscita deve avere una banda passante compresa fra 50 e 10000Hz, ed infine negli impianti di alta fedeltà deve poter essere lineare da 20 a 20000Hz.

In tutti i trasformatori, verso le frequenze molto basse la permeabilità del nucleo tende ad opporsi al trasferimento lineare, è noto infatti che nei trasformatori d'alimentazione il nucleo ferromagnetico può essere diminuito con l' aumentare della frequenza di lavoro. In conformità a questo un trasformatore per frequenze molto basse dovrà avere dimensioni molto maggiori a parità di potenza resa, di un altro funzionante a frequenza più elevata. Verso le frequenze alte, entrano in gioco diversi fattori associati fra loro, come l'insufficiente permeabilità del ferro, che può essere migliorata solo con l' impiego di lamierini speciali ad elevata permeabilità magnetica (silicio, permalloy, ecc...), l'induttanza parassita degli avvolgimenti, le capacità parassite degli avvolgimenti, ecc...

Caratteristiche di un buon trasformatore di uscita

I fattori che determinano la qualità di un buon trasformatore di uscita sono:

- **Induttanza Primario** solo se l' induttanza dell' avvolgimento primario è sufficientemente elevata, il trasformatore può trasferire al secondario e quindi all' altoparlante le frequenze più basse, diversamente tali frequenze vengono eliminate. Per ottenere un valore di induttanza elevata bisogna tenere alto per quanto possibile il numero delle spire primarie N_1 e la sezione del nucleo centrale S_f .
- **Capacità Primario** la capacità parassita che si viene a creare fra spira e spira del primario deve essere più bassa possibile, poiché si trova in parallelo con l' induttanza del primario, e forma con esso un circuito risonante, la cui frequenza di risonanza deve cadere al di fuori della banda audio frequenze. Un buon trasformatore di uscita ha valori di capacità parassita sul primario che vanno da 200 a 300pF.
- **Induttanza dispersa** In un qualsiasi trasformatore esiste sempre una certa parte del flusso generato dal primario che non è raccolto dal secondario. L'entità di questa parte dipende principalmente dalla bontà di costruzione del trasformatore. Più è alta la frequenza di lavoro e maggiore può essere la perdita in questione che viene denominata flusso disperso.

Quando un flusso o parte di esso non viene utilizzato, il flusso disperso fa nascere negli avvolgimenti delle induttanze che non partecipano all' accoppiamento e che perciò risultano in serie a ciascun avvolgimento. Queste induttanze, pur essendo piccole, producono reattanze di dispersione le quali sviluppano delle controtensioni tanto maggiori quanto più elevata è la frequenza e tanto più intense sono le correnti che scorrono negli avvolgimenti. Queste controtensioni, in sostanza, si traducono in perdita di tensione nel secondario.

Quindi l'induttanza dispersa deve essere più bassa possibile, ed è dovuta alla qualità dell' avvolgimento. L' induttanza di dispersione è proporzionale al quadrato del numero delle spire dell'avvolgimento primario. Riducendo il numero delle spire si abbassa anche l'induttanza del primario quindi si peggiora la resa alle basse frequenze, ma è possibile ottenere ancora la medesima induttanza adoperando un materiale magnetico con maggiore permeabilità per il nucleo. Per abbassare l' induttanza dispersa occorre sezionare in più parti l' avvolgimento primario e secondario ed alternandone le sezioni allo scopo di migliorare l' accoppiamento magnetico, anche a costo di aumentare un po' la capacità parassita tra gli avvolgimenti. Un altro accorgimento è quello di adoperare nuclei magnetici piuttosto abbondanti e proporzionalmente ridurre le spire degli avvolgimenti.

Un buon trasformatore di uscita ha valori di induttanza dispersa sul primario che vanno da 15 a 20mH.

- **Resistenza** L'avvolgimento primario deve avere una resistenza da 100 a 300 ohm. Questo parametro dipende dal numero di spire e dalla sezione del filo con cui è avvolto il primario. Per diminuire la resistenza è sufficiente utilizzare un filo di sezione leggermente maggiore di quello richiesto.

Tra i requisiti sopra esposti alcuni entrano in contrasto tra di loro; l'elevata induttanza primaria comporta una forte resistenza dell' avvolgimento, dato il grande numero di spire di diametro forzatamente piccolo, ed una forte capacità parassita fra spira e spira; così come la bassa induzione (B)

alla quale si fa lavorare il ferro comporta un aumento delle dimensioni del nucleo ferromagnetico a scapito dell' induttanza primaria.

Per ottenere il compromesso migliore in modo da avere un elevata induttanza e bassa capacità parassita è opportuno sezionare l'avvolgimento primario e secondario in più avvolgimenti, così facendo si sposta la risonanza tra induttanza e capacità all'estremo alto della gamma di lavoro. Qualora si desideri la risposta uniforme in frequenza fino a 20KHz, la frequenza di risonanza deve essere superiore a 60KHz.

Distorsioni sui trasformatori di uscita

Un trasformatore di uscita può dare luogo alle seguenti distorsioni:

- *Distorsione di frequenza* sia per scarsa induzione del primario, sia per eccessiva induttanza dispersa, sia infine per effetti di risonanza.
- *Distorsione di fase* provocata dalla controreazione presa dal secondario del trasformatore di uscita che produce delle oscillazioni a frequenza elevata dovute alla rotazione di fase provocata dall'induttanza dispersa e dalla capacità parassita.
- *Distorsione armonica* dovuta alla bassa induttanza primaria che alle basse frequenze provoca una diminuzione dell'impedenza primaria e di conseguenza una diminuzione del carico anodico sulla valvola finale. Tale distorsione può essere causata anche da una non linearità della variazione di flusso al variare della frequenza; per attenuare (non eliminare) questa distorsione occorre tenere basso il valore l'induzione magnetica, conviene non superare il limite massimo di $B = 0,7 \text{ Wb/m}^2$ per single-ended e $B = 0,9 \text{ Wb/m}^2$ per push-pull.

Materiali ferro-magnetici

Il trasformatore di uscita deve essere il più possibile lineare nella sua risposta, cioè deve riprodurre fedelmente al secondario senza distorsione la forma d'onda applicata al primario. Per fare questo si cerca di curare più accuratamente la parte ferro-magnetica (lamierini) cercando di usare dei lamierini che siano in grado di magnetizzarsi e smagnetizzarsi velocemente con bassi valori di intensità di campo (il suono risulta più dinamico). Per cui avremo che una piccola variazione della corrente anodica provocherà una debole variazione dell'intensità di campo magnetico ed il lamierino "sensibile" ne risentirà subito, tale sensibilità è definita da un parametro chiamato permeabilità magnetica.

I trasformatori di uscita di solito si costruiscono con lamierini normali o lamierini al silicio, cioè quei lamierini usati anche nella costruzione di trasformatori di alimentazione, ma se si vuole migliorare la qualità (specialmente alle alte frequenze) occorre usare particolari materiali ferro-magnetici pregiati dotati di una maggiore permeabilità magnetica come il Permalloy, Mumetal, ecc... ossia speciali leghe magnetiche contenenti ferro, cobalto, nichel, rame.

Intensità di campo magnetico

Un avvolgimento percorso da una corrente elettrica genera al suo interno un campo magnetico meglio chiamato come "intensità di campo magnetico" (simbolo H). Tale campo magnetico è proporzionale al valore della corrente I, al numero delle spire N che formano l'avvolgimento ed inversamente proporzionale alla lunghezza del circuito magnetico, la sua unità di misura è Ampere--spire su metro (Asp/m).

$$H = \frac{N \cdot I}{l} \text{ (Asp / m)}$$

Induzione Magnetica

L'induzione magnetica come già descritto in precedenza per i trasformatori di alimentazione è un parametro molto importante anche per il trasformatore di uscita. Questo parametro è responsabile del corretto funzionamento del ciclo di magnetizzazione del nucleo ferromagnetico. La scelta del valore di induzione magnetica 'B' più adeguata dipende dal tipo di materiale ferromagnetico utilizzato e dall'esperienza pratica acquisita sul campo nella costruzione di trasformatori. Tale scelta va ponderata in funzione del trasformatore di uscita che si desidera realizzare, sapendo che i trasformatori di uscita si dividono in due famiglie: Single-Ended e Push-Pull possiamo dire:

Per single-ended si può scegliere un valore di induzione magnetica 'B' fra 0,3 e 0,7 Wb/m².

Per push-pull si può scegliere un valore di induzione magnetica 'B' fra 0,6 e 1,2 Wb/m².

Permeabilità Magnetica

Ogni materiale magnetico ha una sua caratteristica specifica e si comporta in diversi modi quando è sottoposto a campi magnetici. La permeabilità magnetica μ rappresenta l'attitudine che possiede un certo materiale ferro-magnetico a lasciarsi attraversare dal flusso magnetico, si misura in Henry su metro (H/m). Quindi i materiali che possiedono una permeabilità magnetica elevata si magnetizzano molto intensamente anche con intensità di campo magnetico basso. La permeabilità magnetica non è sempre un valore costante ma assume dei valori variabili in funzione del valore di induzione B.

La permeabilità magnetica del vuoto o dell'aria viene presa come riferimento, ed è definita permeabilità dell'aria μ_0 che vale:

$$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ (H / m)}$$

Per tutti gli altri materiali si indica la Permeabilità Relativa μ_r , relativa al materiale stesso, indicata da tabelle dove è ben visibile come varia la permeabilità al variare dell'induzione magnetica. Per ottenere la permeabilità assoluta μ si deve moltiplicare la permeabilità dell'aria con la permeabilità relativa:

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \text{ (H / m)}$$

Nei calcoli del trasformatore di uscita non è importante sapere il valore della permeabilità assoluta. Se utilizziamo un altro lamierino, i calcoli sono sempre gli stessi, ovviamente con un lamierino ad elevata permeabilità ci accorgeremo in fase di ascolto la differenza.

Trasformatori di Uscita collegati in Serie

Avendo due o più trasformatori di uscita (meglio se tutti identici) possiamo collegarli in serie, cioè, gli avvolgimenti primari in serie nel circuito anodico ed gli avvolgimenti secondari in serie collegati ai capi della bobina mobile dell'altoparlante.

Si ottiene che il rapporto fra le impedenze non è variato, quindi non è cambiato neppure il rapporto di trasformazione K, ma c'è una variazione del valore delle impedenze primaria e secondaria complessiva. Per cui due trasformatori di uscita uguali di potenza 30VA, con impedenza primaria di 3500 Ω , e impedenza secondaria 6 Ω , se collegati in serie, si comportano come uno solo con impedenza primaria 7000 Ω , e impedenza secondaria 12 Ω .

L'impedenza complessiva Primaria e Secondaria dei trasformatori di uscita collegati:

$$Z = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n \quad Z = 3500 + 3500 = 7000 \Omega \quad Z = 6 + 6 = 12 \Omega$$

Come si vede nei due casi il rapporto di trasformazione K è sempre lo stesso:

$$K = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} \quad K = \sqrt{\frac{3500}{6}} = 24,15 \quad K = \sqrt{\frac{7000}{12}} = 24,15$$

La potenza complessiva è uguale alla somma delle potenze di tutti i trasformatori utilizzati:

$$P_{tot} = P_1 + P_2 + \dots + P_n \quad P_{tot} = 30 + 30 = 60VA$$

Per meglio comprendere analizziamo gli avvolgimenti, supponiamo che il trasformatore in esame 3500 Ω /6 Ω sia realizzato con il seguente rapporto spire 2415/100 spire.

Come si vede nei due casi il rapporto di trasformazione K è sempre lo stesso:

$$K = \frac{N_1}{N_2} \quad K = \frac{2415}{100} = 24,15 \quad K = \frac{4830}{200} = 24,15$$

Trasformatori di Uscita collegati in Parallelo

Avendo due o più trasformatori di uscita (meglio se tutti identici) possiamo collegarli in parallelo, cioè, gli avvolgimenti primari in parallelo nel circuito anodico ed gli avvolgimenti secondari in parallelo collegati ai capi della bobina mobile dell'altoparlante.

Si ottiene che il rapporto fra le impedenze non è variato, quindi non è cambiato neppure il rapporto di trasformazione K, ma c'è una variazione del valore delle impedenze primaria e secondaria complessiva.

Per cui due trasformatori di uscita uguali di potenza 30VA, con impedenza primaria di 3500Ω, e impedenza secondaria 6Ω, se collegati in parallelo, si comportano come uno solo con impedenza primaria 1750Ω, e impedenza secondaria 3Ω.

L'impedenza complessiva Primaria e Secondaria dei trasformatori di uscita collegati:

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \dots + \frac{1}{Z_n}} \quad Z = \frac{1}{\frac{1}{3500} + \frac{1}{3500}} = 1750 \Omega \quad Z = \frac{1}{\frac{1}{6} + \frac{1}{6}} = 3 \Omega$$

Come si vede nei due casi il rapporto di trasformazione K è sempre lo stesso.

$$K = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} \quad K = \sqrt{\frac{3500}{6}} = 24,15 \quad K = \sqrt{\frac{1750}{3}} = 24,15$$

La potenza complessiva è uguale alla somma delle potenze di tutti i trasformatori utilizzati:

$$P_{tot} = P_1 + P_2 + \dots + P_n \quad P_{tot} = 30 + 30 = 60VA$$

Per meglio comprendere analizziamo gli avvolgimenti, supponiamo che il trasformatore i esame 3500Ω/6Ω sia realizzato con il seguente rapporto spire 2415/100 spire.

Come si vede nei due casi il rapporto di trasformazione K è sempre lo stesso:

$$K = \frac{N_1}{N_2} \quad K = \frac{2415}{100} = 24,15 \quad K = \frac{2415}{100} = 24,15$$

Trasformatori di Uscita collegati in Serie e in Parallelo

Avendo due o più trasformatori di uscita (meglio se tutti identici) possiamo collegarli in serie, cioè, gli avvolgimenti primari in serie nel circuito anodico ed gli avvolgimenti secondari in parallelo collegati ai capi della bobina mobile dell' altoparlante.

Si ottiene che il rapporto fra le impedenze è variato, quindi è cambiato anche il rapporto di trasformazione K, ma c'è anche una variazione del valore delle impedenze primaria e secondaria complessiva. Per cui due trasformatori di uscita uguali di potenza 30VA, con impedenza primaria di 3500Ω, e impedenza secondaria 6Ω, se collegati in serie e in parallelo, si comportano come uno solo con impedenza primaria 7000Ω, e impedenza secondaria 3Ω.

L'impedenza complessiva Primaria e Secondaria dei trasformatori di uscita collegati:

$$Z = 3500 + 3500 = 7000 \Omega \quad Z = \frac{1}{\frac{1}{6} + \frac{1}{6}} = 3 \Omega$$

Come si vede nei due casi il rapporto di trasformazione K è cambiato:

$$K = \sqrt{\frac{3500}{6}} = 24,15 \quad K = \sqrt{\frac{7000}{3}} = 48,3$$

La potenza complessiva è uguale alla somma delle potenze di tutti i trasformatori utilizzati:

$$P_{tot} = P_1 + P_2 + \dots + P_n \quad P_{tot} = 30 + 30 = 60VA$$

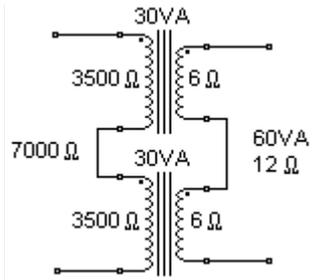
Per meglio comprendere analizziamo gli avvolgimenti, supponiamo che il trasformatore i esame 3500Ω/6Ω sia realizzato con il seguente rapporto spire 2415/100 spire.

Come si vede nei due casi il rapporto di trasformazione K cambia:

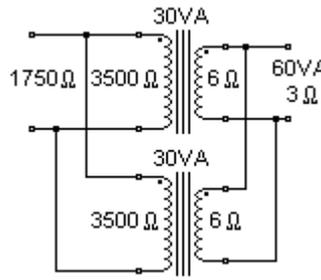
$$K = \frac{N_1}{N_2} \quad K = \frac{2415}{100} = 24,15 \quad K = \frac{4830}{100} = 48,3$$

Esempi di Trasformatori di Uscita collegati in Serie e in Parallelo per SE

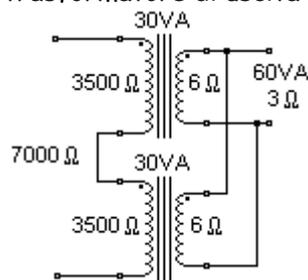
Avendo a disposizione due trasformatori per single-ended da 30VA 3500Ω/6 Ω, collegando gli avvolgimenti primari in serie e gli avvolgimenti secondari in serie si ottiene come risultato complessivo come se fosse un unico trasformatore di uscita da 60VA 7000Ω/12 Ω.



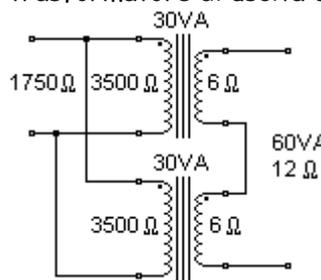
Avendo a disposizione due trasformatori per single-ended da 30VA 3500Ω/6 Ω, collegando gli avvolgimenti primari in parallelo e gli avvolgimenti secondari in parallelo si ottiene come risultato complessivo come se fosse un unico trasformatore di uscita da 60VA 1750Ω/3 Ω.



Avendo a disposizione due trasformatori per single-ended da 30VA 3500Ω/6 Ω, collegando gli avvolgimenti primari in serie e gli avvolgimenti secondari in parallelo si ottiene come risultato complessivo come se fosse un unico trasformatore di uscita da 60VA 7000Ω/3 Ω.

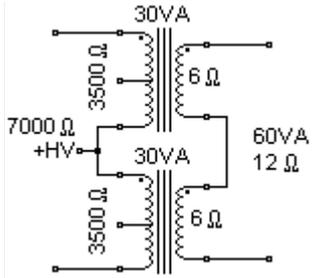


Avendo a disposizione due trasformatori per single-ended da 30VA 3500Ω/6 Ω, collegando gli avvolgimenti primari in parallelo e gli avvolgimenti secondari in serie si ottiene come risultato complessivo come se fosse un unico trasformatore di uscita da 60VA 1750Ω/12 Ω.

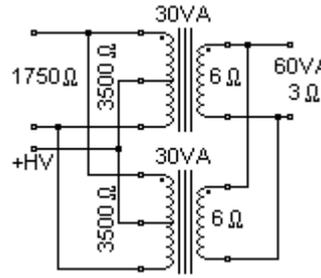


Esempi di Trasformatori di Uscita collegati in Serie e in Parallelo per PP

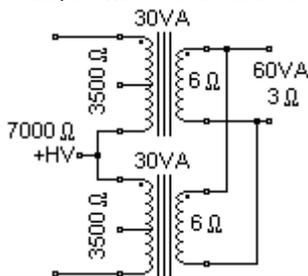
Avendo a disposizione due trasformatori per Push-Pull da 30VA 3500Ω/6 Ω, collegando gli avvolgimenti primari in serie e gli avvolgimenti secondari in serie si ottiene come risultato complessivo come se fosse un unico trasformatore di uscita da 60VA 7000Ω/12 Ω.



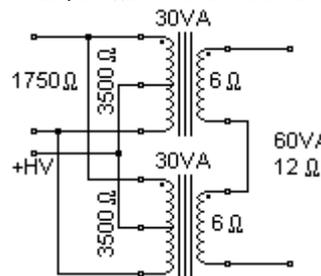
Avendo a disposizione due trasformatori per Push-Pull da 30VA 3500Ω/6 Ω, collegando gli avvolgimenti primari in parallelo e gli avvolgimenti secondari in parallelo si ottiene come risultato complessivo come se fosse un unico trasformatore di uscita da 60VA 1750Ω/3 Ω.



Avendo a disposizione due trasformatori per Push-Pull da 30VA 3500Ω/6 Ω, collegando gli avvolgimenti primari in serie e gli avvolgimenti secondari in parallelo si ottiene come risultato complessivo come se fosse un unico trasformatore di uscita da 60VA 7000Ω/3 Ω.



Avendo a disposizione due trasformatori per Push-Pull da 30VA 3500Ω/6 Ω, collegando gli avvolgimenti primari in parallelo e gli avvolgimenti secondari in serie si ottiene come risultato complessivo come se fosse un unico trasformatore di uscita da 60VA 1750Ω/12 Ω.



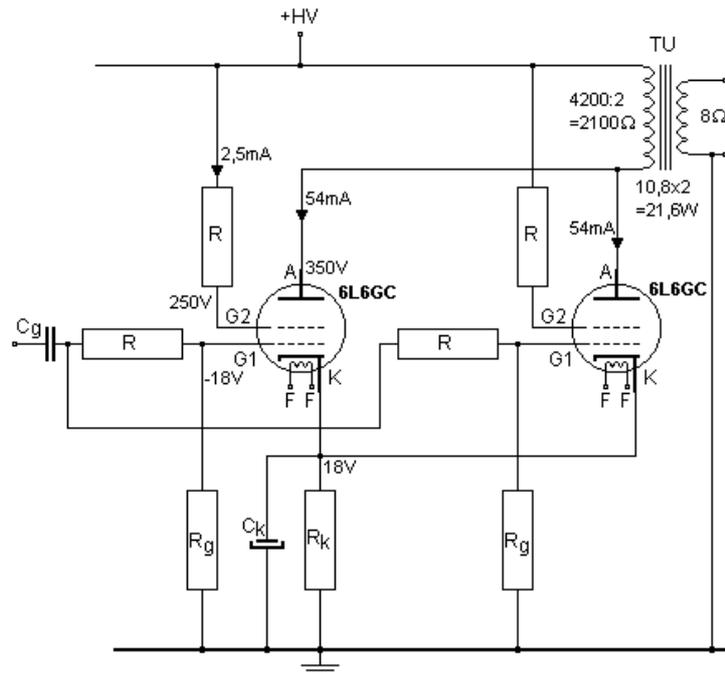
Valvole finali collegate in parallelo

Quando è necessario ottenere una potenza di uscita superiore a quella che un certo tubo elettronico può dare, si effettua il collegamento di due o più valvole in parallelo tutte dello stesso tipo. Questo significa che gli elementi corrispondenti dei vari tubi elettronici vengono connessi insieme. La potenza di uscita è proporzionale al numero delle valvole impiegate, mentre il segnale di griglia, o tensione eccitatrice, ha lo stesso valore richiesto da un solo tubo.

In questi casi il trasformatore di uscita va calcolato prendendo in esame tutte le valvole finali utilizzate, per cui:

Nella configurazione asimmetrica Single-Ended (SE) la potenza P sarà uguale alla potenza di una singola valvola finale per il numero delle valvole utilizzate; l'impedenza Z_a sarà uguale all'impedenza di una singola valvola diviso il numero delle valvole; la corrente I_a che circherà nel primario del trasformatore sarà uguale alla corrente richiesta da una sola valvola finale per il numero delle valvole utilizzate

Esempio SE in figura: con due valvole finali 6L6GC in parallelo si ha:
 una potenza di $10,8 \times 2 = 21,6$ Watt
 una impedenza di $4200 : 2 = 2100$ ohm
 una corrente di $54 \text{mA} \times 2 = 108 \text{mA}$

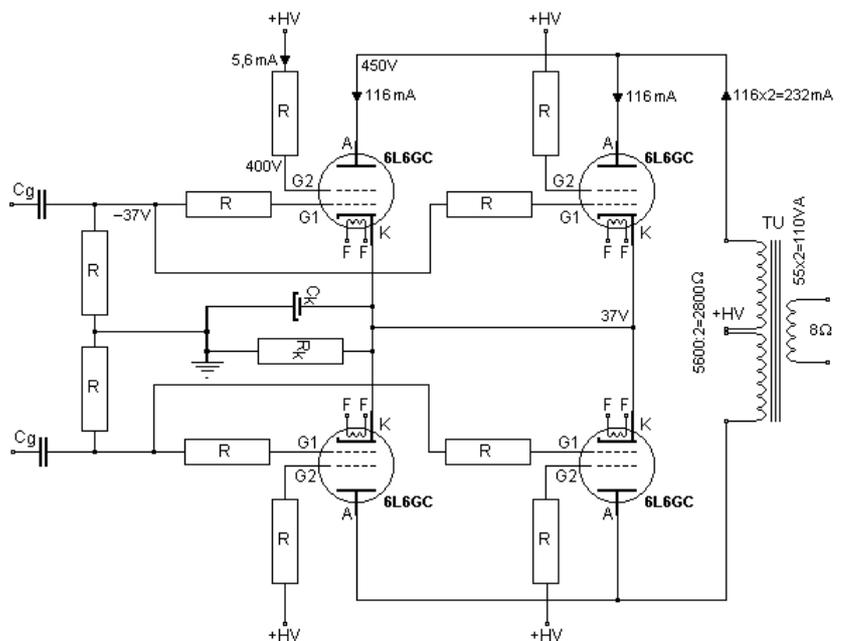


per cui si costruisce un trasformatore con $P = 21,6\text{W}$ $Z_a = 2100\Omega$ $I_a = 108\text{mA}$.

Nella configurazione simmetrica Push-Pull (PP)

la potenza P sarà uguale alla potenza erogata da una coppia di valvole finali per il numero di coppie di valvole utilizzate; l'impedenza Z_{aa} sarà uguale all'impedenza di una coppia di valvole, diviso il numero delle coppie di valvole, la corrente I_a che circherà nel primario del trasformatore sarà uguale alla corrente richiesta da una sola valvola finale per il numero delle coppie di valvole utilizzate

Esempio: con quattro valvole finali (2 coppie) di EL34, due a due in parallelo si ha:
 una potenza di $55 \times 2 = 110$ Watt
 una impedenza di $5600 : 2 = 2800$ ohm
 una corrente di $116 \text{mA} \times 2 = 232 \text{mA}$
 per cui si costruisce un trasformatore con $P = 110\text{VA}$



per cui si costruisce un trasformatore con $P = 110\text{VA}$ $Z_{aa} = 2800\Omega$ $I_a = 232\text{mA}$

Trasformatori HI-FI

Per i trasformatori di uscita HI-FI occorre usare nei calcoli un valore di frequenza minima (f_{min}) molto bassa di solito da 20Hz a 50Hz naturalmente come conseguenza la sezione del nucleo (S_{fe}) e il numero di spire degli avvolgimenti N_1 e N_2 raggiungeranno valori di notevole entità rispetto ai normali trasformatori economici per i quali si arriva a considerare una frequenza minima (f_{min}) da 100Hz a 200Hz.

Essendo richiesta pure la presenza di note molto più alte di quelle considerate si ha allora che f_{max} solitamente sui 4000-5000Hz sale sui 15000-20000Hz. Ciò comporta uno speciale montaggio degli avvolgimenti al fine di minimizzare la capacità parassita, causa prima dell'attenuazione delle frequenze alte.

E' richiesta infine una rigorosa disposizione simmetrica degli avvolgimenti, affinché le correnti anodiche "Ia" fornite da ciascuna valvola risultino il più uguali possibili (nei trasformatori per PP) e così la distorsione della seconda armonica venga ridotta al minimo.

Quindi è necessario in fase di costruzione segnare su un foglietto tutte le spire avvolte in ogni strato e in ogni sezione, segnare anche l'inizio e la fine di ogni sezione avvolta, e il senso di avvolgimento (orario o antiorario).

Per trasformatori di elevata qualità si consiglia l'uso di materiali magnetici ad bassa forza coercitiva, alta permeabilità iniziale. Sono leghe ferro nichel (Fe-Ni) con aggiunte di manganese (Mn), cromo (Cr), rame (Cu), molibdeno (Mo), (Permalloy A, Permanorm, Mumetal, Perminvar, Megaperm, ecc...).

Trasformatore di Uscita Asimmetrico (Single-Ended SE)

Il trasformatore di uscita per una valvola finale (stadio asimmetrico) presenta la particolarità di risultare soggetto nello stesso tempo sia alla corrente continua I_a che alimenta l' anodo della valvola finale, che a correnti alternate I_{ca} di frequenze diverse corrispondenti al suono.

Essendo le correnti I_a e I_{ca} di senso concorde percorrono l' avvolgimento primario nello stesso senso. Quindi gli effetti magnetizzanti della corrente continua "Ia" nel trasformatore asimmetrico provoca una magnetizzazione molto forte tendendo a fare saturare il nucleo ferro-magnetico, impedendo il trasferimento di potenza. Per evitare questo si crea un traferro così da portare la saturazione del materiale ferro-magnetico a valori più elevati.

I lamierini che costituiscono il nucleo ferromagnetico vanno montati come se fosse un induttanza, cioè prima si infilano tutte le "E" da una parte, poi dall'altra parte del rocchetto tutte le "I" si appoggiano alle "E" interponendo uno stato di cartoncino di spessore come da calcolo che funge da traferro. Per bloccare il trasformatore sarà necessario un serrapacco avendo cura di tenerlo isolato dai lamierini con dei pezzi di cartoncino.

Trasformatore di Uscita Simmetrico (Push-Pull PP)

Il trasformatore di uscita per due valvole finali (stadio simmetrico) detto anche push-pull o controfase permette l' eliminazione del traferro "Tf".

Le due valvole utilizzate in questo tipo di amplificatori devono essere dello stesso tipo con uguali caratteristiche, in modo da avere le stesse identiche condizioni di funzionamento.

Le correnti I_{a1} e I_{a2} sono rispettivamente le correnti della I e della II valvola, tali correnti percorrono l'avvolgimento primario entrando dalla presa centrale e uscendo dalle due estremità, per poi finire sugli anodi delle due valvole. Si capisce così che il primario è percorso dalle due correnti in senso contrario per cui se le correnti sono perfettamente uguali non si crea nessuna intensità di campo magnetico "H", per ciò il traferro non è necessario.

Quindi gli effetti magnetizzanti della corrente continua "Ia" nel trasformatore simmetrico non esistono per cui il trasformatore sarà di dimensioni minori e minore sarà anche la distorsione, infatti i migliori amplificatori Hi-Fi utilizzano trasformatori di uscita simmetrici.

I lamierini che costituiscono il nucleo ferromagnetico vanno montati alternando le E e le I come per tutti i trasformatori standard di alimentazione, serrando bene il pacco lamellare per evitare dei traferri. Per bloccare il trasformatore sarà necessario un serrapacco avendo cura di tenerlo isolato dai lamierini con dei pezzi di cartoncino.

Come avvolgere il trasformatore di uscita Asimmetrico Single-Ended

Avvolgere il trasformatore di uscita per una valvola finale (stadio asimmetrico) è molto simile alla costruzione di un normale trasformatore di alimentazione.

Per questo trasformatore occorre un normale rocchetto in plastica o in cartoncino ad un gola di dimensioni idonee a contenere dentro di sé i lamierini del nucleo ferromagnetico. Nella realizzazione gli avvolgimenti sia il primario che il secondario vanno avvolti tutti nello stesso senso, solo che il primario richiede più attenzioni.

L' avvolgimento primario va scomposto in blocchi chiamati "sezioni", ogni sezione è composta da tanti "strati", ogni strato è composto un certo numero di spire, tante quante il rocchetto ne riesce a contenere in tutta la sua lunghezza senza sovrapporre le spire. Fra strato e strato bisogna interporre un giro di carta paraffinata, fra sezione e sezione interporre due giri di carta paraffinata.

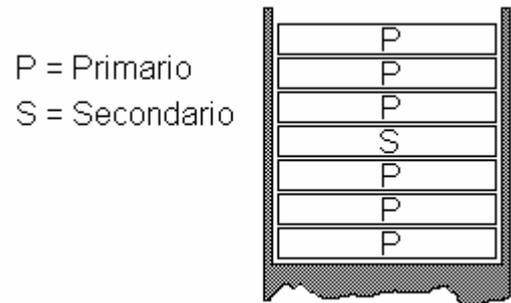
Scomporre l' avvolgimento primario, avere cura di isolare strati e sezioni, avvolgere in modo uniforme senza creare degli ammassamenti di spire, tutto questo per cercare di diminuire al massimo le capacità parassite che si creano fra spira e spira e l' induttanza dispersa.

Tutte le sezioni di primario devono essere collegate in serie, cioè la fine di una sezione va collegata con l'inizio della sezione successiva.

In mezzo alle sezioni primarie si inserisce l'avvolgimento secondario, così da farlo risultare immerso e ben amalgamato al primario.

Se decidiamo di scomporre il primario N1 in sei sezioni, l'unica sezione del secondario N2 va inserita a metà, fra la terza e la quarta sezione. Il numero delle sezioni da fare è a scelta, dipende dal numero di spire dell' avvolgimento primario, di solito una sezione può contenere circa da 200 a 400 spire.

Di solito la quantità di spire contenute in una sezione si stabilisce in fase di costruzione, cioè contando il numero delle spire in uno strato e stabilito a caso il numero degli strati si definisce subito il numero di spire che può contenere una sezione. Tutto questo per evitare di lasciare l'ultimo strato a metà. Se per esempio l'avvolgimento primario N1 = 2400 spire posso dividerlo in sei sezioni così da ottenere 2400:6=400 spire ogni sezione (vedi figura).

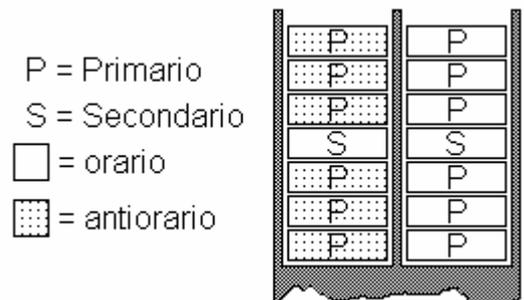


Come avvolgere il trasformatore di uscita Simmetrico Push-Pull

Avvolgere il trasformatore di uscita per due valvole finali (stadio simmetrico) è molto più difficoltoso perché necessita di alcuni accorgimenti.

Per questo trasformatore occorre un normale rocchetto in plastica o in cartoncino a due gole di dimensioni idonee a contenere dentro di sé i lamierini del nucleo ferromagnetico.

L'avvolgimento primario va scomposto in blocchi chiamati "sezioni", ogni sezione è composta da tanti "strati", ogni strato è composto un certo numero di spire, tante quante il rocchetto ne riesce a contenere in tutta la sua lunghezza senza sovrapporre le spire. Fra strato e strato bisogna interporre un giro di carta paraffinata, fra sezione e sezione interporre due giri di carta paraffinata.



Scomporre l' avvolgimento primario, avere cura di isolare strati e sezioni, avvolgere in modo uniforme senza creare degli ammassamenti di spire, tutto questo per cercare di diminuire al massimo le capacità parassite che si creano fra spira e spira e l' induttanza dispersa.

Il rocchetto si considera diviso in due gole, per cui in una gola saranno contenuti gli avvolgimenti per la valvola "I" e nell'altra gola saranno contenuti gli avvolgimenti della valvola "II". L' avvolgimento primario N1 calcolato rappresenta tutto il trasformatore, per cui va diviso in due, metà per ogni valvola, poi suddiviso in sezioni di avvolgimento. Tutte le spire delle sezioni contenute nella "I" gola dedicata

alla "I" valvola saranno avvolte in senso orario (o antiorario), mentre tutte le spire delle sezioni contenute nella "II" gola dedicata alla "II" valvola saranno avvolte in senso antiorario (o orario).

Tutte le sezioni di primario di ogni gola devono essere collegate in serie, cioè la fine di una sezione va collegata con l'inizio della sezione successiva, così da avere due grossi avvolgimenti uno per gola, quindi gli inizi (prime spire avvolte) saranno collegati insieme in un unico filo che sarà identificato con "+" che rappresenta dove entra l'alta tensione, le fini (ultime spire avvolte) saranno collegate rispettivamente agli anodi della "I" e alla "II" valvola che identifichiamo con A1 e A2.

In mezzo alle sezioni primarie delle due gole si inserisce l'avvolgimento secondario N2, così da farlo risultare immerso e ben amalgamato al primario, viene avvolto per intero e nello stesso senso sia nella "I" che nella "II" gola.

L' avvolgimento primario N1 viene diviso in due, ogni metà primario diviso per esempio in sei sezioni, l'avvolgimento secondario N2 va inserito a metà, fra la terza e quarta sezione di ogni gola. Il numero delle sezioni da fare è a scelta, dipende dal numero di spire dell' avvolgimento primario, di solito una sezione può contenere circa da 200 a 400 spire.

L'avvolgimento secondario N2 può essere avvolto per intero sia in una gola che nell'altra poi collegato in parallelo, oppure metà in ogni gola poi collegato in serie.

Di solito la quantità di spire contenute in una sezione si stabilisce in fase di costruzione, cioè contando il numero delle spire in uno strato e stabilito a caso il numero degli strati si definisce subito il numero di spire che può contenere una sezione. Tutto questo per evitare di lasciare l'ultimo strato a metà. Se per esempio l'avvolgimento primario N1 = 2400 spire devo dividerlo in due parti $2400:2=1200$ spire per ogni gola, le quali posso dividerle in sei sezioni così da ottenere $1200:6=200$ spire ogni sezione (vedi figura).

Qualche consiglio utile per un buon Trasformatore:

Scelto il tipo di valvola da utilizzare, si procede alla realizzazione del trasformatore di uscita e di alimentazione secondo come specificato dalle caratteristiche tecniche della valvola utilizzata.

Dopo aver calcolato il trasformatore e verificato che gli avvolgimenti siano contenuti nella finestra del lamierino si procede alla costruzione fisica del trasformatore.

Questa è la fase più delicata, infatti ci vuole precisione e tanta costanza, volontà e pazienza. Il buon funzionamento e la qualità del trasformatore dipende per 80% dalla sua costruzione.

Quando si esegue un calcolo di un nuovo trasformatore è buona norma eseguire un primo calcolo di massima partendo dalla potenza totale del trasformatore per ottenere le dimensioni del pacco lamellare. Quindi trovato il lamierino e rocchetto che soddisfa le nostre esigenze si ripete il calcolo partendo dal pacco lamellare a disposizione. Tutto ciò tenendo sempre sotto occhio gli ingombri degli avvolgimenti.

Alcune regole pratiche per ottenere un buon Trasformatore di Alimentazione:

Avvolgere il filo sul rocchetto in modo uniforme, accostando le spire l'una all'altra.

Utilizzare nel calcolo un' induzione magnetica da 0,6 a 0,9 Wb/m². Induzioni basse comportano un trasformatore di dimensioni maggiori ma con vibrazioni molto basse e campi magnetici esterni irrilevanti.

Completare lo strato, non terminare mai l'avvolgimento a metà rocchetto ma arrivare fino alle fiancate laterali. Questa regola è molto importante per gli avvolgimenti con poche spire, quindi aggiungere o togliere qualche spira, oppure avvolgere in bifilare cambiando la sezione del filo smaltato. Infine è necessario fare una verifica del calcolo per tenere conto delle variazioni di spire aggiunte o tolte.

Alcune regole pratiche per ottenere un buon Trasformatore di Uscita:

E' molto più importante la precisione e la cura con cui si esegue la costruzione manuale di qualche spira in più o in meno rispetto al calcolo.

Per amplificatori stereo tutti e due i trasformatori di uscita devono essere identici in tutte le sue parti. Cioè devono essere composti dallo stesso numero di lamierini, dallo stesso filo smaltato, dallo stesso isolamento fra strato e strato, dagli stessi strati, dallo stesso numero di spire.

Avvolgere il filo sul rocchetto in modo uniforme, accostando le spire l'una all'altra.

Completare lo strato, non terminare mai l'avvolgimento a metà rocchetto ma arrivare fino alle fiancate laterali. Infine è necessario fare una verifica del calcolo per tenere conto delle variazioni di spire aggiunte o tolte, in modo da rispettare il rapporto di trasformazione.

Inserire l'avvolgimento secondario a circa metà dell' avvolgimento primario. Oppure ancora meglio inserire più avvolgimenti secondari in mezzo al avvolgimento primario. Questi secondari saranno realizzati con un numero di spire opportuno, che poi collegheremo in serie o parallelo, in modo da ottenere il numero di spire richiesto dal calcolo per tale impedenza.

Realizzare l' avvolgimento secondario secondo quanto descritto nel capitolo Secondari Multipli, oppure avvolgere in bifilare, trifilare, quadrifilare, ecc... (2, 3, 4, fili di rame smaltato paralleli da avvolgere tutti contemporaneamente) avendo cura di completare lo strato, non terminare mai l'avvolgimento a metà rocchetto, ma arrivare fino alle fiancate laterali. Se per fare ciò è necessario aggiungere o togliere 3 5 spire circa rispetto al calcolo è da considerare una cosa ininfluente. E' buona norma se necessario cambiare sezione del filo in modo da completare lo strato con il numero di spire calcolato. Se non abbiamo a disposizione altre sezioni di filo smaltato, possiamo aggiungere o togliere le spire che ci servono per completare lo strato. Ma poi la variazione di spire è consistente è necessario fare una verifica del calcolo per tenere conto delle variazioni di spire aggiunte o tolte, in modo da rispettare il rapporto di trasformazione. Non tralasciare questa regola perché molto più importante per l' avvolgimento secondario che per il primario

Calcoliamo sempre i secondari in modo da poterli combinare fra loro (in serie e in parallelo) per ottenere le impedenze da noi richieste senza lasciare mai avvolgimenti liberi a vuoto (senza carico). Vedi capitolo Secondari Multipli.

Utilizzare nel calcolo un' induzione magnetica da 0,4 a 0,6 Wb/m² per single-ended. Mentre un' induzione magnetica da 0,8 a 1 Wb/m² per push-pull.

A trasformatore finito eseguire tutti i collegamenti rispettando gli inizi e le fini degli avvolgimenti. Si ottengono migliori risultati sonori collegando l' inizio dell' avvolgimento primario (quello più vicino al nucleo ferromagnetico) all' anodo della valvola e la fine dell' avvolgimento (quello più esterno) al positivo di alimentazione. Così facendo la fine dell' avvolgimento secondario sarà il positivo, mentre l' inizio dell' avvolgimento secondario sarà il negativo dove vanno collegati i diffusori acustici.

Nel realizzare un trasformatore di uscita è preferibile utilizzare sempre un rocchetto a sezione quadrata.

Ottimizzazione dell'Avvolgimento per migliori prestazioni

E' buona norma, per quanto è possibile completare lo strato, da fiancata a fiancata laterale, evitando di avvolgere le spire distanti fra loro (avvolgimento rado), oppure terminare l'avvolgimento a metà rocchetto (per quanto possibile). In base al numero di spire calcolato verificare se uno o più strati completi sono sufficienti a contenerle. Se ciò non è possibile verificare se utilizzando un filo leggermente più grosso o più piccolo, oppure avvolgere in bifilare, trifilare o quadrifilare, (avvolgendo 2, 3 o 4 fili contemporaneamente) che poi collegheremo tutti in serie o in parallelo in modo da soddisfare complessivamente come da progetto il numero di spire o la sezione filo.

Soprattutto nei trasformatori di uscita per raggiungere l'obbiettivo di completare lo strato è possibile anche aggiungere o togliere qualche spira, poi però è necessario fare una verifica del calcolo sugli altri avvolgimenti del trasformatore in modo da rispettare sempre lo stesso rapporto di trasformazione K per tenere conto delle variazioni di spire aggiunte o tolte.

Dopo aver eseguito il calcolo del trasformatore e verificato che l'ingombro degli avvolgimenti sia contenuto nella finestra con un minimo di margine, è necessario fare questo studio dell'avvolgimento in modo da rispettare la buona norma descritta sopra. Esaminando prima di tutto gli avvolgimenti con minor numero di spire, e via via tutti gli altri avvolgimenti con numero di spire crescente.

Esempio Pratico per Avvolgimenti con poche spire (in un solo strato):

Il Rocchetto per lamierino con $C=32\text{mm}$ ha una larghezza per accogliere l'avvolgimento $H=45\text{mm}$.

Dal calcolo vedo che devo avvolgere 14 spire con filo $\phi_1=2,08\text{mm}$ $Sf=3,1416\text{mm}^2$.

$$\frac{\text{larghezza}}{n^\circ \text{spire}} = \text{diametro filo isolato per uno strato} \quad \frac{45}{14} = 3,214 \quad (\text{mm})$$

Per terminare correttamente l'avvolgimento è necessario utilizzare sempre dei diametri di filo che siano multipli o sottomultipli del diametro di filo ideale.

Eseguendo un avvolgimento trifilare $\frac{3,214}{3} = 1,07 \quad (\text{mm})$

Considerando che esiste un minimo di tolleranza, si esegue l'avvolgimento con un filo di $\phi_1=1,08\text{mm}$ $Sf=0,7854\text{mm}^2$ da avvolgere in 3 fili contemporaneamente (trifilare) che successivamente collegheremo in parallelo per avere $Sf=2,3562\text{mm}^2$.

Se la densità di corrente risulta essere minore di 5 A/mm^2 va bene la scelta del filo:

supponiamo che $7A$ sia la corrente che circola nell'avvolgimento $J = 7/2,3562 = 2,97 \quad \text{A/mm}^2$

Esempio Pratico per Avvolgimenti con medio numero di spire:

Il Rocchetto per lamierino con $C=28\text{mm}$ ha una larghezza per accogliere l'avvolgimento di 39mm

Dal calcolo vedo che devo avvolgere 157 spire con filo $\phi_1=0,66\text{mm}$ $Sf=0,2827\text{mm}^2$.

$$\frac{\text{larghezza}}{n^\circ \text{spire}} = \text{diametro filo isolato per uno strato} \quad \frac{39}{157} = 0,248 \quad (\text{mm})$$

Per terminare correttamente l'avvolgimento è necessario utilizzare sempre dei diametri di filo che siano multipli o sottomultipli del diametro di filo ideale.

Eseguendo un avvolgimento bifilare $0,248 \cdot 2 = 0,496 \quad (\text{mm})$

Considerando che esiste un minimo di tolleranza, si esegue l'avvolgimento con un filo di $\phi_1=0,51\text{mm}$ $Sf=0,1590\text{mm}^2$ da avvolgere in 2 fili contemporaneamente (bifilare) che successivamente collegheremo in parallelo per avere $Sf=0,318\text{mm}^2$.

$$\frac{\text{larghezza}}{\text{diametro}} = \text{spire in uno strato} \quad \frac{39}{0,51} = 77 \text{ spire in uno strato}$$

Facendo 2 strati di 77spire si ottengono 154spire totali: $77 \cdot 2 = 154 \text{ spire}$

Se la densità di corrente risulta essere minore di 5 A/mm^2 va bene la scelta del filo:

supponiamo che $1A$ sia la corrente che circola nell'avvolgimento $J = 1/0,318 = 3,14 \quad \text{A/mm}^2$

Con 2 strati completi si nota la differenza di 3 spire in meno rispetto al calcolo, perciò è necessario rivedere il calcolo del numero spire degli altri avvolgimenti in modo da rispettare sempre il rapporto di trasformazione.

Esempio Pratico per Avvolgimenti con molte spire:

Il Rocchetto per lamierino con $C=32\text{mm}$ ha una larghezza per accogliere l'avvolgimento di 45mm .

Dal calcolo vedo che devo avvolgere 1300 spire con filo $\phi=0,25\text{mm}$.

$$\frac{\text{larghezza}}{\phi \text{ filo isolato}} = \text{spire in uno strato} \quad \frac{45}{0,25} = 180 \text{ spire in uno strato}$$

Facendo 7 strati completi si ottengono $180 \cdot 7 = 1260 \text{ spire}$

Differenza spire rispetto al calcolo $1300 - 1260 = 40 \text{ spire}$

Con 7 strati completi si nota la differenza di 40 spire in meno rispetto al calcolo, perciò è necessario rivedere il calcolo del numero spire degli altri avvolgimenti in modo da rispettare sempre il rapporto di trasformazione.

Trasformatori di Uscita con Avvolgimenti Secondari Multipli

Mediante la descrizione in 'schede di configurazione' si cerca di approfondire la realizzazione pratica degli avvolgimenti secondari complessi per trasformatori di uscita per amplificatori valvolari.

Per comprendere meglio l'argomento analizziamo singolarmente alcune configurazioni in modo pratico.

Lo scopo di queste configurazioni è quello di utilizzare tutte le spire senza lasciare avvolgimenti a vuoto (senza carico, condizione ottimale di funzionamento e di resa per il TU), ma ovviamente bisogna accettare qualche compromesso: un notevole aumento del numero di spire secondario, una maggior difficoltà nella realizzazione pratica dovuta a un aumento degli strati, e la impossibilità di avere combinazioni di impedenze di uscita di valore preciso come 4Ω , 8Ω , 16Ω , ecc....

Se ad esempio si vuole realizzare un trasformatore di uscita adattabile ad una sola impedenza di uscita ma lo si vuole stratificare maggiormente (intercalando primario e secondario più volte) l'avvolgimento può essere realizzato come in configurazione C, poi si collega per una sola impedenza di uscita

Sarebbe buona norma realizzare un trasformatore di uscita adattabile ad una sola impedenza di uscita per non ricorrere a queste complicate configurazioni di avvolgimenti secondari. Ma certe volte è necessario avere la possibilità di adattare diverse impedenze di uscita, (per esempio casse acustiche da 4Ω , 8Ω , 16Ω , ecc...) e le cose si complicano un pochino.

Ovviamente noi possiamo scegliere i valori di impedenza che più ci soddisfano, come si vede ad esempio nella configurazione G si possono ottenere impedenze di uscita di $3,9\Omega$, 7Ω , $15,7\Omega$, oppure come indicato fra parentesi si possono ottenere valori di 2Ω , $3,5\Omega$, $7,9\Omega$. Quindi tutto dipende dal valore di impedenza più alta che scegliamo, dopodichè si ottengono di conseguenza anche le impedenze più basse, ma sempre in funzione del rapporto descritto dalla configurazione scelta.

E' buona norma per un corretto dimensionamento e qualità del trasformatore di uscita con secondari multipli, che il numero di spire 'n' calcolato riesca ad occupare lo strato completo, cioè deve coprire perfettamente tutta la larghezza disponibile del rocchetto. Per fare ciò è necessario trovare il diametro di filo giusto, oppure avvolgere in bifilare, trifilare, ecc...

Ogni secondario parziale (quello indicato con 'n') o principale (tutto l'avvolgimento secondario) deve essere composto da un numero intero di spire. Mentre se necessario le spire per strato possono anche non essere in numero intero.

La linea tratteggiata indicata fra gli avvolgimenti rappresenta una parte dell'avvolgimento primario, il secondario parziale indicato con la lettera A è quello più vicino al nucleo ferromagnetico di lamierini.

Si ricorda che l'avvolgimento primario calcolato è solo spezzettato in parti uguali per premettere la stratificazione poi sarà collegato tutto in serie. Nel caso di T.U. Single-Ended tutti gli avvolgimenti primari e secondari sono avvolti nello stesso senso, mentre per T.U. Push-Pull tutti i primari avvolti nella gola di sinistra sono avvolti in senso antiorario, tutti i primari avvolti nella gola di destra sono avvolti in senso orario e tutti i secondari avvolti nella gola di sinistra e di destra sono avvolti in senso antiorario.

La tabella mostra in relazione ad ogni configurazione di avvolgimenti secondari presentata come aumenta in percentuale l'ingombro totale rispetto all'ingombro del singolo avvolgimento calcolato, di come diminuisce la sezione del filo e di come aumenta il numero spire: cioè facendo riferimento ad esempio alla scheda configurazione D si nota che per realizzare la massima impedenza è necessario collegare in parallelo due rami di avvolgimenti collegati in serie; quindi si può utilizzare un filo di metà sezione, l'ingombro aumenta di circa il 5% dovuto al doppio del numero di spire che comporta un aumento dell'isolante da interporre fra gli strati.

Tipo di Configurazione	Ingombro totale avv.sec.	Sezione Filo	Numero spire sec.
A	-	-	-
B	-	-	-
C	-	-	-
D	+5%	metà	doppio
E	+10%	un terzo	triplo
F	+10%	un terzo	triplo
G	+5%	metà	doppio
H	+10%	un terzo	triplo

Tabella Configurazioni Avvolgimenti Secondari

In questa tabella riassuntiva sono visibili tutte le configurazioni di avvolgimenti secondari per trasformatori di uscita Single-Ended e Push-Pull per amplificatori valvolari, che (escluso configurazione A) permettono di utilizzare tutte le spire senza lasciare avvolgimenti a vuoto (senza carico).

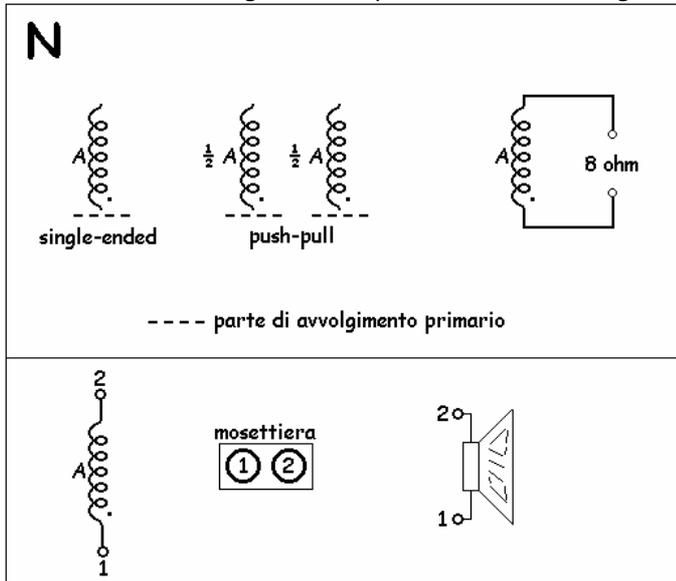
<p>A</p> <p>single-ended push-pull</p>	<p>B</p> <p>single-ended push-pull</p>	<p>C</p> <p>single-ended push-pull</p>
<p>D</p> <p>single-ended push-pull</p>	<p>E</p> <p>single-ended</p>	<p>F</p> <p>single-ended push-pull</p>
<p>G</p> <p>single-ended push-pull</p>	<p>H</p> <p>single-ended push-pull</p>	<p>N</p> <p>single-ended push-pull</p> <p>NOTE</p> <ul style="list-style-type: none"> ● la parte tratteggiata - - - - indica una parte di avvolgimento primario ● la configurazione A necessita di due o più secondari diversi fra loro, combinabili solo in Serie. ● è buona norma iniziare con un avvolgimento primario e terminare con un avvolgimento primario

Il secondario parziale indicato con la lettera A è quello più vicino al nucleo ferromagnetico di lamierini. Si ricorda che l'avvolgimento primario calcolato (indicato in tratteggio) è solo spezzettato in parti uguali per premettere la stratificazione poi sarà collegato tutto in serie. Nel caso di T.U. Single-Ended si utilizza un rocchetto ad una gola, tutti gli avvolgimenti primari e secondari sono avvolti nello stesso senso. Mentre per T.U. Push-Pull si utilizza un rocchetto ad due gole, tutti i primari avvolti nella gola di sinistra sono avvolti in senso antiorario, tutti i primari avvolti nella gola di destra sono avvolti in senso orario e tutti i secondari avvolti nella gola di sinistra e di destra sono avvolti in senso antiorario. Il puntino indicato a fianco dell'avvolgimento rappresenta il punto di 'inizio avvolgimento'.

Configurazione N

La configurazione N rappresenta la soluzione minima è detta anche configurazione base, dopodichè se si vuole si può elaborare l'avvolgimento come descritto nelle altre configurazioni. Questa configurazione prevede una sola impedenza di uscita, di solito è molto utilizzata nei trasformatori di media e bassa qualità. Infatti trova largo impiego in tutti quei casi dove non si richiede una notevole precisione sonora.

Come si vede dalla figura non è previsto intercalare gli avvolgimenti primari e secondari.



Nel Push-Pull si realizzano due avvolgimenti secondari uno per ogni gola, costituiti da metà numero di spire che poi verranno collegati in serie per realizzare l'avvolgimento secondario completo. Come qualità di suono questa configurazione è meglio della configurazione A nella quale alcuni avvolgimenti rimangono a vuoto (senza carico).

In alternativa, per migliorare la qualità, si può scegliere la configurazione C, questo per suddividere gli avvolgimenti primari e secondari intercalandoli fra loro in modo da stratificare maggiormente tutto l'avvolgimento.

I terminali della cassa acustica e tutti gli inizi e fine di ogni avvolgimento secondario vengono collegati nella parte dietro di questa morsettiera a 2 morsetti rispettando il numero del morsetto

come visibile in figura (es. inizio avv. A sul morsetto 1, fine avv. A morsetto 2, altoparlante morsetto 1 e 2).

Esempio pratico: realizziamo un trasformatore di uscita adattabile a casse da 8Ω scegliamo la configurazione N, la quale richiede 1 secondario. Dal calcolo del trasformatore eseguito in precedenza si vede che il numero di spire secondario per 8Ω corrisponde ad esempio a 120spire.

Per Trasformatore di Uscita Single-Ended: si avvolge tutto l' avvolgimento primario e di seguito tutto l'avvolgimento secondario di 120spire.

Per Trasformatore di Uscita Push-Pull si utilizza un rocchetto a 2 gole: si avvolge metà spire avvolgimento primario in senso antiorario in una gola, poi metà spire avvolgimento primario in senso orario nell'altra gola. Successivamente si avvolge metà spire avvolgimento secondario 60spire in senso orario in una gola, poi metà spire avvolgimento secondario 60spire in senso orario nell'altra gola. Di seguito gli avvolgimenti saranno collegati in serie in modo che la somma spire raggiunga il valore delle spire calcolate.

Sia in questa configurazione che in quelle successive descritte di seguito è buona norma seguire le indicazioni già spiegate in precedenza per l'ottimizzazione dell'avvolgimento in modo da completare lo strato con un numero di spire di sezione adeguata. In riferimento alla sezione del filo S_f (mm²) ottenuta dal calcolo si devono eseguire alcuni semplice calcoli manuali per ricercare il diametro del filo isolato ottimale con cui realizzare l'avvolgimento.

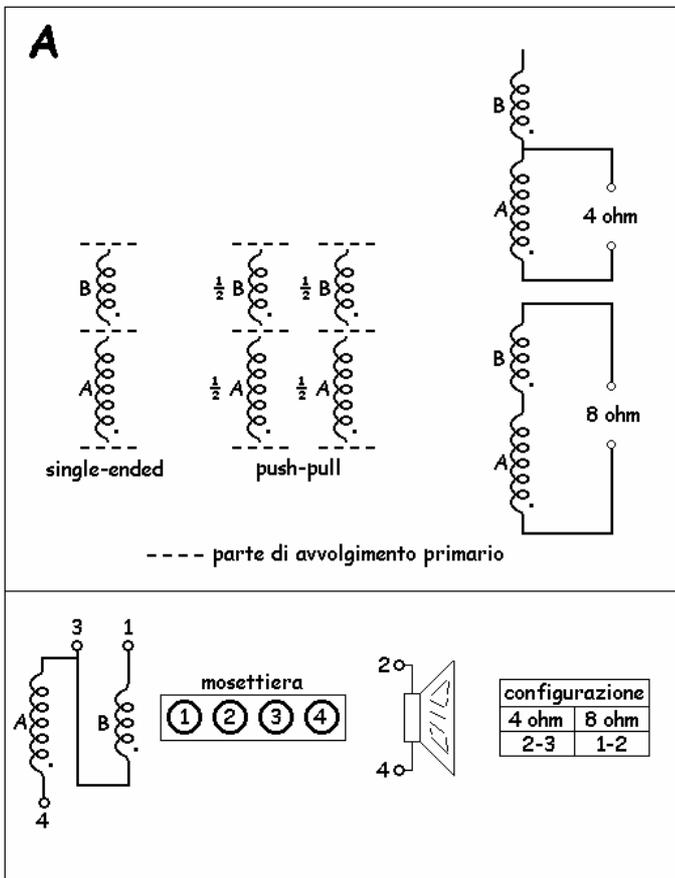
Supponiamo che dal calcolo le 120spire devono essere avvolte con filo $\phi_1=1,08\text{mm}$ $S_f=0,7854\text{mm}^2$, supponiamo che la finestra del rocchetto sia larga 30mm, $\frac{30\text{ mm}}{120\text{ spire}}=0,25\text{ mm}$ questo valore rappresenta il

diametro filo isolato necessario per realizzare le 120 spire su un solo strato. Visto che tale diametro è molto inferiore rispetto a quello previsto si può utilizzare un filo di diametro maggiore, posso moltiplicare tale valore per 3 o anche per 4, $0,25 \cdot 4 = 1\text{ mm}$. Sul mercato si trova del filo $\phi_1=0,97\text{mm}$ $S_f=0,6362\text{mm}^2$, la sezione è leggermente inferiore da quella prevista ma si può tranquillamente utilizzare eseguendo l'avvolgimento in 4 strati.

Essendo la sezione del filo leggermente inferiore, anche gli ingombri avvolgimento saranno leggermente inferiori di quelli calcolati, per cui il rocchetto conterrà comodamente tutte le spire.

Configurazione A

La configurazione A è la più anomala rispetto a tutte le altre presentate di seguito ma è la più diffusa in assoluto nei trasformatori di media e bassa qualità, infatti trova largo impiego in tutti quei casi dove non si richiede una notevole precisione sonora, infatti alcuni avvolgimenti rimangono a vuoto (senza carico). Si ha la possibilità di scegliere le impedenze di uscita desiderate. Le uscite sono realizzate da più avvolgimenti collegati in serie. In quest'esempio il secondario è realizzato da 2 avvolgimenti (A B) che combinati fra loro in serie, oppure utilizzandone solo uno realizzano l'adattamento di impedenza desiderato, per esempio di 8 Ω e di 4 Ω.



Per quel che riguarda il rapporto di trasformazioni fra gli avvolgimenti vale sempre la solita espressione:

$$K = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Per facilitare i collegamenti, in modo da rendere semplice e facile il passaggio da un'impedenza di uscita all'altra è possibile utilizzare una morsettiera a 4 morsetti.

I terminali della cassa acustica e tutti gli inizi e fine di ogni avvolgimento secondario vengono collegati nella parte dietro di questa morsettiera rispettando il numero del morsetto come visibile in figura (es. inizio avv. B sul morsetto 3, fine avv. B morsetto 1, altoparlante morsetto 2 e 4, e via di seguito).

Quindi eseguendo dei semplici passi sul davanti di questa morsettiera come indicato nella tabella 'configurazione' è possibile ottenere in uscita una delle due impedenze desiderate.

Se ad esempio faccio il passo 1-2 corrisponde a 8 Ω, se faccio il passo 2-3 corrisponde un'impedenza di 4 Ω.

Esempio pratico: realizziamo un trasformatore di uscita adattabile a casse sia da 4Ω che da 8Ω scegliamo la configurazione A, la quale richiede 2 secondari parziali collegati in serie. Consideriamo il valore di impedenza più alta 8Ω vediamo nella configurazione che è realizzata collegando in serie gli avvolgimenti A e B. Dal calcolo del trasformatore eseguito in precedenza si vede che il numero di spire secondario per 8Ω (A+B) corrisponde ad esempio a 113spire.

$$K = \sqrt{\frac{Z_A + Z_B}{Z_A}} = \sqrt{\frac{8}{4}} = 1,41$$

Il rapporto di trasformazione è:

$$N_A = \frac{N_{A+B}}{K} = \frac{113}{1,41} = 80 \text{ spire}$$

Numero Spire avvolgimento A :

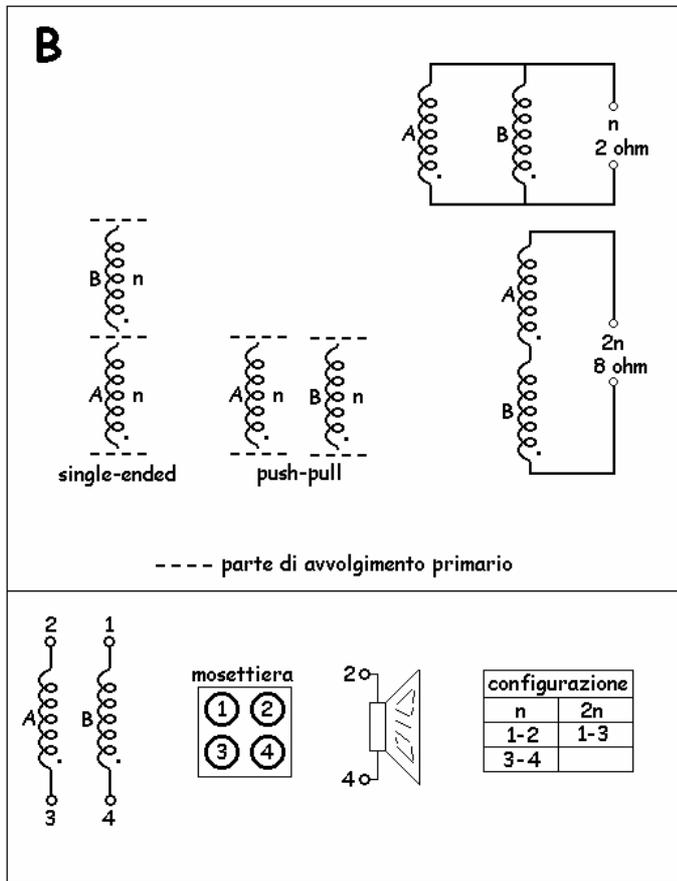
$$\text{Numero Spire avvolgimento B : } N_B = N_{A+B} - N_A = 113 - 80 = 33 \text{ spire}$$

L'avvolgimento A deve essere avvolto con una sezione filo corrispondente a quella indicata dal calcolo per 4Ω.

L'avvolgimento B deve essere avvolto con una sezione filo corrispondente a quella indicata dal calcolo per 8Ω.

Configurazione B

La configurazione B è molto semplice ma poco utilizzata, infatti trova largo impiego solo, nel caso che si voglia stratificare ulteriormente il trasformatore. Normalmente si configura per una sola impedenza di uscita (una fra le due descritte), però da la possibilità di scegliere. Avendo a disposizione due avvolgimenti uguali combinabili fra loro permette a questa configurazione di ottenere una notevole



differenza fra le relative impedenze di uscita rispetto alle altre configurazioni. Il secondario è realizzato da 2 avvolgimenti (n n) che combinati fra loro in n e in 2n realizzano un adattamento di impedenza di 2 Ω e di 8 Ω .

Per quel che riguarda il rapporto di trasformazioni fra gli avvolgimenti vale sempre la solita espressione:

$$K = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Per facilitare i collegamenti, in modo da rendere semplice e facile il passaggio da un impedenza di uscita all'altra è possibile utilizzare una morsettiera a 4 morsetti.

I terminali della cassa acustica e tutti gli inizi e fine di ogni avvolgimento vengono collegati nella parte dietro di questa morsettiera rispettando il numero del morsetto come visibile in figura (es. inizio avv. B sul morsetto 4, fine avv. B morsetto 1, altoparlante morsetto 2 e 4, e via di seguito).

Quindi eseguendo dei semplici passi sul davanti di questa morsettiera come indicato nella tabella 'configurazione' è possibile ottenere in uscita una delle due l'impedenze desiderate.

Se ad esempio faccio il passo 1-3 corrisponde la configurazione 2n che nell'esempio equivale a 8ohm.

Esempio pratico: si vuole realizzare un trasformatore di uscita adattabile a casse sia da 2 Ω che da 8 Ω scegliamo la configurazione B, la quale richiede 2 secondari parziali di n n spire. Consideriamo il valore di impedenza più alta 8 Ω vediamo nella configurazione che è realizzata con 2n. Dal calcolo del trasformatore eseguito in precedenza si vede che il numero di spire secondario per 8 Ω corrisponde ad esempio a 181spire, essendo questo numero non divisibile per 2 (questo perché 2n è la configurazione che dà 8 Ω) proviamo a aumentare o diminuire di qualche spira fino a trovare il valore più vicino al numero calcolato divisibile per 2. Infatti diminuendo di una spira 180:2=90spire, tale valore rappresenta 'n'. Quindi si faranno due secondari parziali di n (90spire).

Il rapporto di trasformazione è: $K = \frac{2n}{n} = \frac{2}{1} = 2$

L'Impedenza è: $Z_n = \frac{Z_{2n}}{K^2} = \frac{8}{2^2} = 2 \Omega$

Impedenze Avvolgimenti : $Z_{2n} = Z_n \cdot 2^2 = 2 \cdot 4 = 8 \Omega$

Numero Spire avvolgimento 2n : $N_{2n} = 180 \text{ spire}$ (come prescritto dal calcolo)

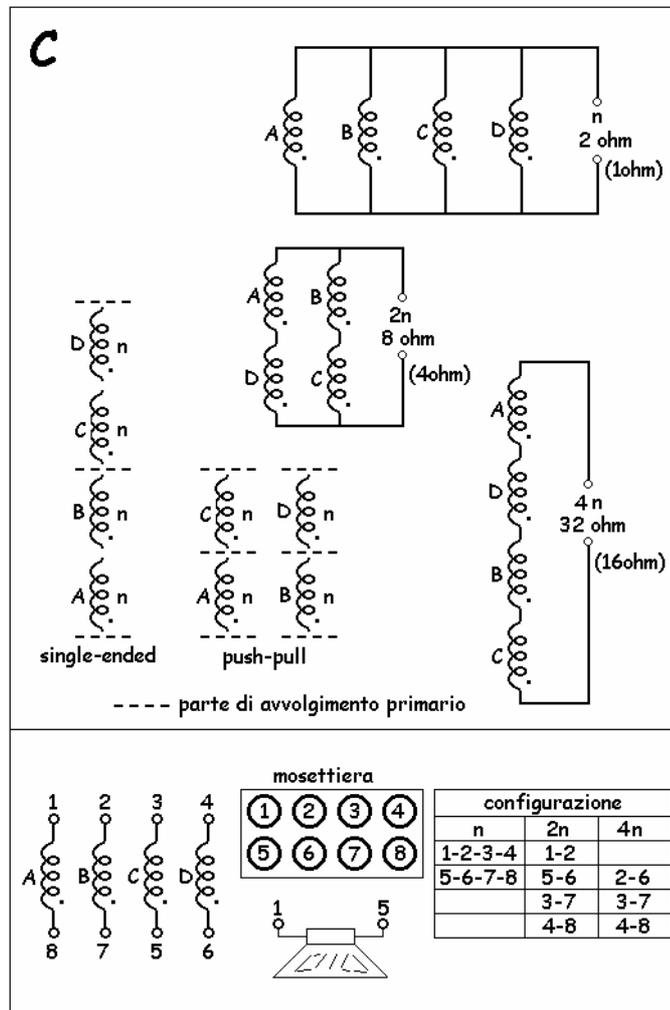
Numero Spire avvolgimento n : $N_n = \frac{N_{2n}}{K} = \frac{180}{2} = 90 \text{ spire}$

L'avvolgimento n deve essere avvolto con una sezione filo corrispondente a quella indicata dal calcolo per 2n.

Configurazione C

La configurazione C è abbastanza semplice e mediamente utilizzata, infatti trova largo impiego solo, nel caso che si voglia stratificare ulteriormente il trasformatore. Normalmente si configura per una sola impedenza di uscita (una fra le tre descritte, meglio quella con tutti gli avvolgimenti in serie). Avendo a disposizione avvolgimenti tutti uguali combinabili fra loro permette a questa configurazione di ottenere una differenza

fra le relative impedenze di uscita molto elevata rispetto alle altre configurazioni. Il secondario è realizzato da 4 avvolgimenti (n n n n) che combinati fra loro in n in 2n ed in 4n realizzano un adattamento di impedenza di 2 Ω di 8 Ω e di 32 Ω .



Per quel che riguarda il rapporto di trasformazioni fra gli avvolgimenti vale sempre la solita espressione:

$$K = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Per facilitare i collegamenti, in modo da rendere semplice e facile il passaggio da un impedenza di uscita all'altra è possibile utilizzare una morsettiera ad 8 morsetti.

I terminali della cassa acustica e tutti gli inizi e fine di ogni avvolgimento vengono collegati nella parte dietro di questa morsettiera rispettando il numero del morsetto come visibile in figura (es. inizio avv. C sul morsetto 5, fine avv. C morsetto 3, e via di seguito).

Quindi eseguendo dei semplici passi sul davanti di questa morsettiera come indicato nella tabella 'configurazione' è possibile ottenere in uscita una delle tre l'impedenze desiderate.

Se ad esempio la configurazione 4n corrisponde a 32ohm si avrà come configurazione 2n un impedenza di 8ohm, e come configurazione n un

impedenza di 2ohm. Oppure se la configurazione 4n corrisponde a 16ohm si avrà come configurazione 2n un impedenza di 4ohm, e come configurazione n un impedenza di 1ohm.

Esempio pratico: si vuole realizzare un trasformatore di uscita adattabile a casse sia da 2 Ω che da 8 Ω e da 32 Ω scegliamo la configurazione C, la quale richiede 4 secondari parziali di n n n n spire. Consideriamo il valore di impedenza più alta 32 Ω vediamo nella configurazione che è realizzata con 4n. Dal calcolo del trasformatore eseguito in precedenza si vede che il numero di spire secondario per 32 Ω corrisponde ad esempio a 182spire, essendo questo numero non divisibile per 4 (questo perché 4n è la configurazione che dà 32 Ω) proviamo a aumentare o diminuire di qualche spira fino a trovare il valore più vicino al numero calcolato divisibile per 4. Infatti diminuendo di due spire 180:4=45spire, tale valore rappresenta 'n'. Quindi si faranno quattro secondari parziali di n (45spire).

Il rapporto di trasformazione è: $K = \frac{4n}{n} = \frac{4}{1} = 4$

L'Impedenza è: $Zn = \frac{Z4n}{K^2} = \frac{32}{4^2} = 2 \Omega$

Impedenze Avvolgimenti : $Z2n = Zn \cdot 2^2 = 2 \cdot 4 = 8 \Omega$

$Z4n = Zn \cdot 4^2 = 2 \cdot 16 = 32 \Omega$

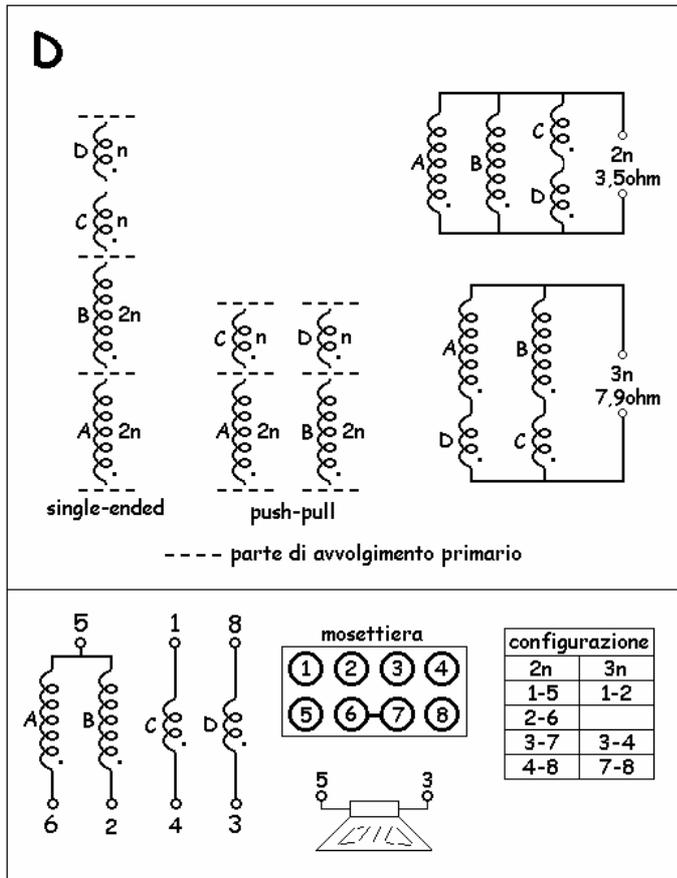
Numero Spire avvolgimento 4n : $N4n = 180 \text{ spire}$ (come prescritto dal calcolo)

Numero Spire avvolgimento n : $Nn = \frac{N4n}{K} = \frac{180}{4} = 45 \text{ spire}$

L'avvolgimento n deve essere avvolto con una sezione filo corrispondente a quella indicata dal calcolo per 4n.

Configurazione D

La configurazione D è fra le più utilizzate nella realizzazione di avvolgimenti secondari a due prese. Il secondario è realizzato da 4 avvolgimenti (2n 2n n n) che combinati fra loro in 2n ed in 3n realizzano un adattamento di impedenza di 3,5Ω e di 7,9Ω .



Per quel che riguarda il rapporto di trasformazioni fra gli avvolgimenti vale sempre la solita espressione:

$$K = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Per facilitare i collegamenti, in modo da rendere semplice e facile il passaggio da un impedenza di uscita all'altra è possibile utilizzare una morsettiera ad 8 morsetti.

I terminali della cassa acustica e tutti gli inizi e fine di ogni avvolgimento vengono collegati nella parte dietro di questa morsettiera rispettando il numero del morsetto come visibile in figura (es. inizio avv. C sul morsetto 4, fine avv. C morsetto 1, e via di seguito).

Quindi eseguendo dei semplici passi sul davanti di questa morsettiera come indicato nella tabella 'configurazione' è possibile ottenere in uscita una delle due l'impedenze desiderate.

Sul dietro della morsettiera dove si ammarano

i terminali degli avvolgimenti è necessario fare un passo fisso 6-7 con un pezzo di filo di rame. Se ad esempio faccio i passi 1-2 3-4 7-8 corrisponde la configurazione 3n che nell'esempio equivale a 7,9ohm.

Esempio pratico: si vuole realizzare un trasformatore di uscita adattabile a casse sia da 4Ω che da 8Ω scegliamo la configurazione D, la quale richiede 4 secondari parziali di 2n 2n n n spire. Consideriamo il valore di impedenza più alta 8Ω vediamo che nella configurazione è realizzata con 3n. Dal calcolo del trasformatore eseguito in precedenza si vede che il numero di spire secondario per 7,9Ω corrisponde ad esempio a 157spire, essendo questo numero non divisibile per 3 (questo perché 3n è la configurazione che dà 7,9Ω) proviamo a aumentare o diminuire di qualche spira fino a trovare il valore più vicino al numero calcolato divisibile per 3. Infatti diminuendo di una spira 156:3=52spire, tale valore rappresenta 'n'. Quindi si faranno due secondari parziali di 2n (104spire) e due secondari parziali di n (52spire).

Il rapporto di trasformazione è: $K = \frac{3n}{n} = \frac{3}{1} = 3$ L'Impedenza è: $Z_n = \frac{Z_{3n}}{K^2} = \frac{7,9}{3^2} = 0,877 \Omega$

Impedenze Avvolgimenti : $Z_{2n} = Z_n \cdot 2^2 = 0,877 \cdot 4 = 3,5 \Omega$ $Z_{3n} = Z_n \cdot 3^2 = 0,877 \cdot 9 = 7,9 \Omega$

Numero Spire avvolgimento 3n : $N_{3n} = 156 \text{ spire}$ (come prescritto dal calcolo)

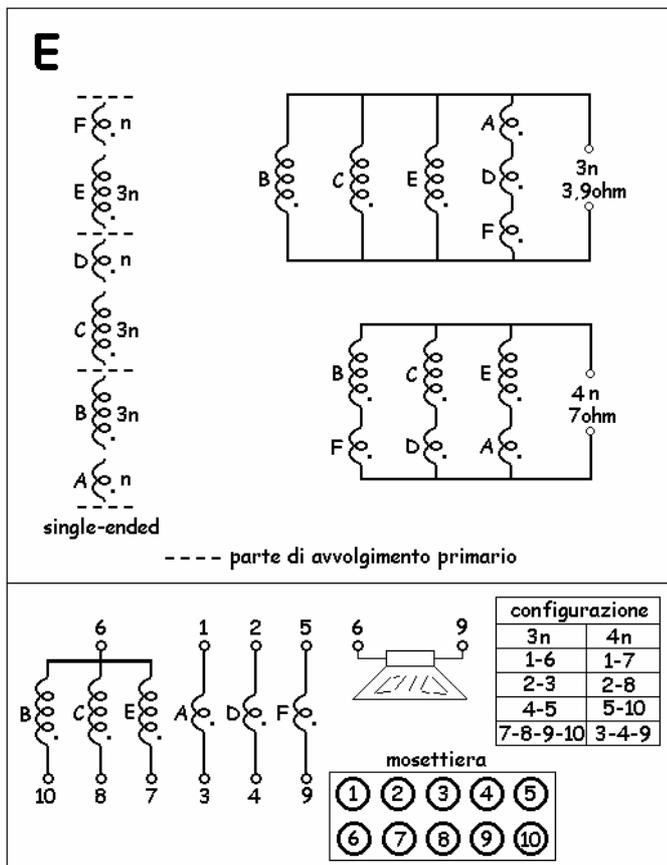
Numero Spire avvolgimento n : $N_n = \frac{N_{3n}}{K} = \frac{156}{3} = 52 \text{ spire}$

Come si vede in figura l'impedenza più alta è realizzata con il collegamento 3n che è ottenuta con due rami di avvolgimenti in parallelo. Questo ci fa capire che gli avvolgimenti devono essere avvolti con un sezione filo corrispondente alla metà di quella indicata dal calcolo per 3n.

Configurazione E (solo per Single-Ended)

La configurazione E è la più complicata nella realizzazione di avvolgimenti secondari a due prese. Avendo a disposizione più avvolgimenti combinabili fra loro permette a questa configurazione di ottenere una differenza fra le relative impedenze di uscita più ridotta rispetto alle precedenti configurazioni.

Il secondario è realizzato da 6 avvolgimenti (n $3n$ $3n$ n $3n$ n) che combinati fra loro in $3n$ ed in $4n$ realizzano un adattamento di impedenza di $3,9 \Omega$ e di 7Ω .



Per quel che riguarda il rapporto di trasformazioni fra gli avvolgimenti vale sempre la solita espressione:

$$K = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Per facilitare i collegamenti, in modo da rendere semplice e facile il passaggio da un'impedenza di uscita all'altra è possibile utilizzare una morsettiera ad 10 morsetti.

I terminali della cassa acustica e tutti gli inizi e fine di ogni avvolgimento vengono collegati nella parte dietro di questa morsettiera rispettando il numero del morsetto come visibile in figura (es. inizio avv. C sul morsetto 8, fine avv. C morsetto 6, e via di seguito).

Quindi eseguendo dei semplici passi sul davanti di questa morsettiera come indicato nella tabella 'configurazione' è possibile ottenere in

uscita una delle due l'impedenze desiderate. Se ad esempio faccio i passi 1-7 2-8 5-10 3-4-9 corrisponde la configurazione $4n$ che nell'esempio equivale a 7ohm .

Esempio pratico: si vuole realizzare un trasformatore di uscita adattabile a casse sia da 4Ω che da 8Ω scegliamo la configurazione E, la quale richiede 6 secondari parziali di n $3n$ $3n$ n $3n$ n spire. Consideriamo il valore di impedenza più alta 8Ω vediamo che nella configurazione è realizzata con $4n$. Dal calcolo del trasformatore eseguito in precedenza si vede che il numero di spire secondario per 7Ω corrisponde ad esempio a 157 spire, essendo questo numero non divisibile per 4 (questo perché $4n$ è la configurazione che dà 7Ω) proviamo a aumentare o diminuire di qualche spira fino a trovare il valore più vicino al numero calcolato divisibile per 4. Infatti diminuendo di una spira $156:4=39$ spire, tale valore rappresenta 'n'. Quindi si faranno tre secondari parziali di $3n$ (117 spire) e tre secondari parziali di n (39 spire).

Il rapporto di trasformazione è: $K = \frac{4n}{n} = \frac{4}{1} = 4$ L'Impedenza è: $Z_n = \frac{Z_{4n}}{K^2} = \frac{7}{4^2} = 0,44 \Omega$

Impedenze Avvolgimenti : $Z_{3n} = Z_n \cdot 3^2 = 0,44 \cdot 9 = 3,9 \Omega$ $Z_{4n} = Z_n \cdot 4^2 = 0,44 \cdot 16 = 7 \Omega$

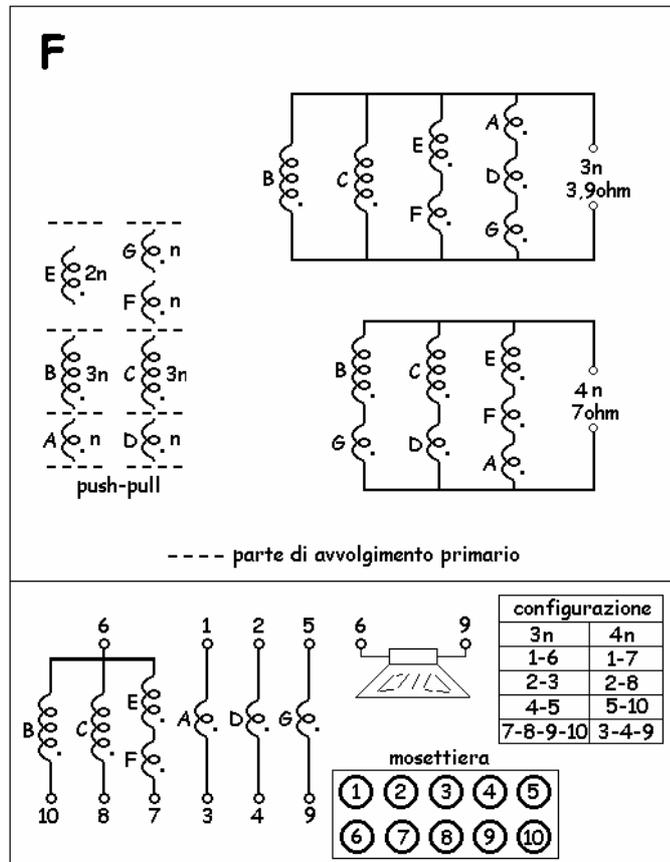
Numero Spire avvolgimento $4n$: $N_{4n} = 156$ spire (come prescritto dal calcolo)

Numero Spire avvolgimento n : $N_n = \frac{N_{4n}}{K} = \frac{156}{4} = 39$ spire

Come si vede in figura l'impedenza più alta è realizzata con il collegamento $4n$ che è ottenuta con tre rami di avvolgimenti in parallelo. Questo ci fa capire che gli avvolgimenti devono essere avvolti con un sezione filo corrispondente ad un terzo di quella indicata dal calcolo per $4n$.

Configurazione F (solo per Push-Pull)

La configurazione F è la più complicata nella realizzazione di avvolgimenti secondari a due prese. Avendo a disposizione più avvolgimenti combinabili fra loro permette a questa configurazione di ottenere una differenza fra le relative impedenze di uscita più ridotta rispetto alle precedenti configurazioni.



Il secondario è realizzato da 7 avvolgimenti (n n 3n 3n 2n n n) che combinati fra loro in 3n ed in 4n realizzano un adattamento di impedenza di 3,9 Ω e di 7 Ω.

Per quel che riguarda il rapporto di trasformazioni fra gli avvolgimenti vale sempre la solita espressione:

$$K = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Per facilitare i collegamenti, in modo da rendere semplice e facile il passaggio da un'impedenza di uscita all'altra è possibile utilizzare una morsettiera ad 10 morsetti.

I terminali della cassa acustica e tutti gli inizi e fine di ogni avvolgimento vengono collegati nella parte dietro di questa morsettiera rispettando il numero del morsetto come visibile in figura (es. inizio avv. C sul morsetto 8, fine avv. C morsetto 6, e via di seguito).

Quindi eseguendo dei semplici passi sul davanti di questa morsettiera come indicato nella

tabella 'configurazione' è possibile ottenere in uscita una delle due impedenze desiderate. Se ad esempio faccio i passi 1-7 2-8 5-10 3-4-9 corrisponde la configurazione 4n che nell'esempio equivale a 7ohm.

Esempio pratico: si vuole realizzare un trasformatore di uscita adattabile a casse sia da 4 Ω che da 8 Ω scegliamo la configurazione F, la quale richiede 7 secondari parziali di n n 3n 3n 2n n n spire. Consideriamo il valore di impedenza più alta 8 Ω vediamo che nella configurazione è realizzata con 4n. Dal calcolo del trasformatore eseguito in precedenza si vede che il numero di spire secondario per 7 Ω corrisponde ad esempio a 157spire, essendo questo numero non divisibile per 4 (questo perché 4n è la configurazione che dà 7 Ω) proviamo a aumentare o diminuire di qualche spira fino a trovare il valore più vicino al numero calcolato divisibile per 4. Infatti diminuendo di una spira 156:4=39spire, tale valore rappresenta 'n'. Quindi si faranno due secondari parziali di 3n (117spire), un secondario parziale di 2n (78spire) e quattro secondari parziali di n (39spire).

Il rapporto di trasformazione è: $K = \frac{4n}{n} = \frac{4}{1} = 4$ L'Impedenza è: $Z_n = \frac{Z_{4n}}{K^2} = \frac{7}{4^2} = 0,44 \Omega$

Impedenze Avvolgimenti : $Z_{3n} = Z_n \cdot 3^2 = 0,44 \cdot 9 = 3,9 \Omega$ $Z_{4n} = Z_n \cdot 4^2 = 0,44 \cdot 16 = 7 \Omega$

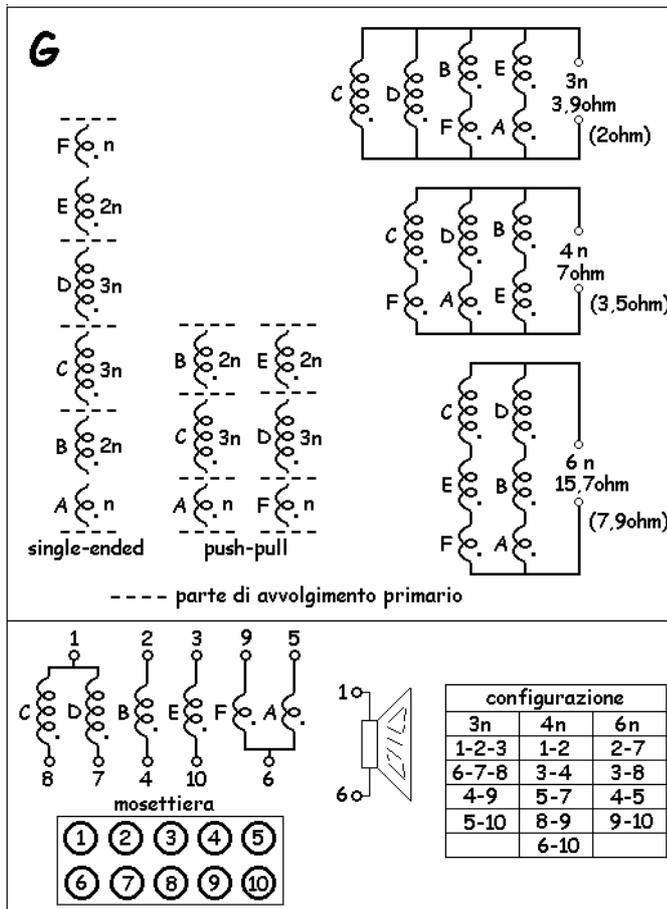
Numero Spire avvolgimento 4n : $N_{4n} = 156 \text{ spire}$ (come prescritto dal calcolo)

Numero Spire avvolgimento n : $N_n = \frac{N_{4n}}{K} = \frac{156}{4} = 39 \text{ spire}$

Come si vede in figura l'impedenza più alta è realizzata con il collegamento 4n che è ottenuta con tre rami di avvolgimenti in parallelo. Questo ci fa capire che gli avvolgimenti devono essere avvolti con un sezione filo corrispondente ad un terzo di quella indicata dal calcolo per 4n.

Configurazione G

La configurazione G è abbastanza complicata, perché necessita di un maggior numero di avvolgimenti, però da la possibilità di scegliere fra 3 impedenze di uscita. Avendo a disposizione molti avvolgimenti combinabili fra loro permette a questa configurazione di ottenere una differenza fra le relative impedenze di uscita più ridotta rispetto alle altre configurazioni. Il secondario è realizzato da 6 avvolgimenti (n 2n 3n 3n 2n n) che



combinati fra loro in 3n in 4n ed in 6n realizzano un adattamento di impedenza di 3,9 Ω di 7 Ω e di 15,7 Ω .

Per quel che riguarda il rapporto di trasformazioni fra gli avvolgimenti vale sempre la solita espressione:

$$K = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Per facilitare i collegamenti, in modo da rendere semplice e facile il passaggio da un impedenza di uscita all'altra è possibile utilizzare una morsettiera ad 10 morsetti.

I terminali della cassa acustica e tutti gli inizi e fine di ogni avvolgimento vengono collegati nella parte dietro di questa morsettiera rispettando il numero del morsetto come visibile in figura (es. inizio avv. C sul morsetto 8, fine avv. C morsetto 1, e via di seguito).

Quindi eseguendo dei semplici passi sul davanti di questa morsettiera come indicato nella tabella 'configurazione' è possibile ottenere in uscita una delle tre l'impedenze desiderate. Se ad esempio faccio i passi 1-2 3-4 5-7 8-9 6-10 corrisponde la configurazione 4n che nell'esempio equivale a 7ohm.

Esempio pratico: si vuole realizzare un trasformatore di uscita adattabile a casse sia da 4 Ω che da 8 Ω e da 16 Ω scegliamo la configurazione G, la quale richiede 6 secondari parziali di n 2n 3n 3n 2n n spire. Consideriamo il valore di impedenza più alta 16 Ω vediamo nella configurazione che è realizzata con 6n. Dal calcolo del trasformatore eseguito in precedenza si vede che il numero di spire secondario per 15,7 Ω corrisponde ad esempio a 182spire, essendo questo numero non divisibile per 6 (questo perché 6n è la configurazione che dà 15,7 Ω) proviamo a aumentare o diminuire di qualche spira fino a trovare il valore più vicino al numero calcolato divisibile per 6. Infatti diminuendo di due spire 180:6=30spire, tale valore rappresenta 'n'. Quindi si faranno due secondari parziali di n (30spire) due secondari parziali di 2n (60spire) e due secondari parziali di 3n (90spire).

Il rapporto di trasformazione è: $K = \frac{6n}{n} = \frac{6}{1} = 6$

L'Impedenza è: $Zn = \frac{Z6n}{K^2} = \frac{15,7}{6^2} = 0,436 \Omega$

$Z3n = Zn \cdot 3^2 = 0,436 \cdot 9 = 3,9 \Omega$

$Z4n = Zn \cdot 4^2 = 0,436 \cdot 16 = 7 \Omega$

$Z6n = Zn \cdot 6^2 = 0,436 \cdot 36 = 15,7 \Omega$

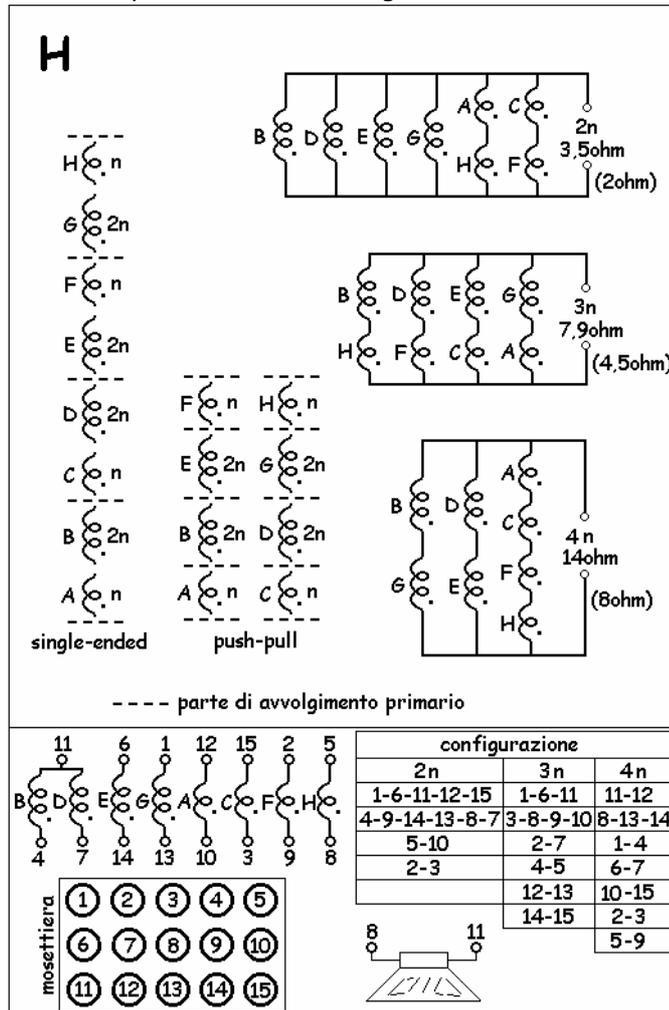
Numero Spire avvolgimento 4n : $N6n = 180 \text{ spire}$ (come prescritto dal calcolo)

Numero Spire avvolgimento n : $Nn = \frac{N6n}{K} = \frac{180}{6} = 30 \text{ spire}$

Come si vede in figura l'impedenza più alta è realizzata con il collegamento 6n che è ottenuta con due rami di avvolgimenti in parallelo. Questo ci fa capire che gli avvolgimenti devono essere avvolti con un sezione filo corrispondente alla metà di quella indicata dal calcolo per 6n.

Configurazione H

La configurazione H è la più complicata, perché necessita di un maggior numero di avvolgimenti, però da la possibilità di scegliere fra 3 impedenze di uscita. Avendo a disposizione molti avvolgimenti combinabili fra loro permette a questa configurazione di ottenere una differenza fra le relative impedenze di uscita più ridotta rispetto alle altre configurazioni. Il secondario è realizzato da 8 avvolgimenti (n 2n n 2n 2n n 2n n) che combinati fra loro in 2n in 3n ed in 4n



che combinati fra loro in 2n in 3n ed in 4n realizzano un adattamento di impedenza di 3,5Ω di 7,9Ω e di 14Ω.

Per quel che riguarda il rapporto di trasformazioni fra gli avvolgimenti vale sempre la solita espressione:

$$K = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Per facilitare i collegamenti, in modo da rendere semplice e facile il passaggio da un impedenza di uscita all'altra è possibile utilizzare una morsettiera ad 15 morsetti.

I terminali della cassa acustica e tutti gli inizi e fine di ogni avvolgimento vengono collegati nella parte dietro di questa morsettiera rispettando il numero del morsetto come visibile in figura (es. inizio avv. C sul morsetto 3, fine avv. C morsetto 15, e via di seguito).

Quindi eseguendo dei semplici passi sul davanti di questa morsettiera come indicato nella tabella 'configurazione' è possibile ottenere in uscita una delle tre l'impedenze desiderate. Se ad esempio faccio i passi 1-6-11-12-15 4-9-14-13-8-7 5-10 2-3 corrisponde la configurazione 2n che nell'esempio equivale a 3,5ohm.

Esempio pratico: si vuole realizzare un trasformatore di uscita adattabile a casse sia da 4Ω che da 8Ω e da 16Ω scegliamo la configurazione H, la quale richiede 8 secondari parziali di n 2n n 2n 2n n 2n n spire. Consideriamo il valore di impedenza più alta 16Ω vediamo nella configurazione che è realizzata con 4n. Dal calcolo del trasformatore eseguito in precedenza si vede che il numero di spire secondario per 14Ω corrisponde ad esempio a 182spire, essendo questo numero non divisibile per 4 (questo perché 4n è la configurazione che dà 14Ω) proviamo a aumentare o diminuire di qualche spira fino a trovare il valore più vicino al numero calcolato divisibile per 4. Infatti diminuendo di due spire 180:4=45spire, tale valore rappresenta 'n'. Quindi si faranno quattro secondari parziali di n (45spire) e quattro secondari parziali di 2n (90spire).

Il rapporto di trasformazione è: $K = \frac{4n}{n} = \frac{4}{1} = 4$

L'Impedenza è: $Z_n = \frac{Z_{4n}}{K^2} = \frac{14}{4^2} = 0,875 \Omega$

$Z_{2n} = Z_n \cdot 2^2 = 0,875 \cdot 4 = 3,5 \Omega$

$Z_{3n} = Z_n \cdot 3^2 = 0,875 \cdot 9 = 7,9 \Omega$

$Z_{4n} = Z_n \cdot 4^2 = 0,875 \cdot 16 = 14 \Omega$

Numero Spire avvolgimento 4n : $N_{4n} = 180 \text{ spire}$ (come prescritto dal calcolo)

Numero Spire avvolgimento n : $N_n = \frac{N_{4n}}{K} = \frac{180}{4} = 45 \text{ spire}$

Come si vede in figura l'impedenza più alta è realizzata con il collegamento 4n che è ottenuta con tre rami di avvolgimenti in parallelo. Questo ci fa capire che gli avvolgimenti devono essere avvolti con un sezione filo corrispondente ad un terzo di quella indicata dal calcolo per 4n.

Dimensionamento di un Trasformatore di Uscita Single-Ended

In questa descrizione ci si limita a fornire qualche indicazione sul dimensionamento dei trasformatori di uscita per amplificatori valvolari single-ended, al fine di inquadrare il problema nei suoi termini generali. Il punto di partenza è quello di individuare il tipo di valvola finale da impiegare e la propria configurazione nel circuito di polarizzazione partendo dai parametri caratteristici da Data-Sheet.

Elementi da prefissare

Conoscendo i seguenti dati di partenza è possibile calcolare un trasformatore di uscita:

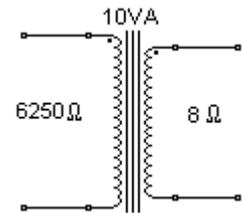
$Z_a = 6250$ impedenza di carico anodico richiesto della valvola in Ω .

$Z_c = 8$ impedenza di carico della cassa acustica in Ω .

$I_a = 0,04$ corrente continua di polarizzazione anodica della valvola in Ampere.

$f_{\min} = 50$ frequenza minima riproducibile a -3dB del trasformatore in Hz.

$B = 0,5$ Induzione Magnetica in Wb/m^2 alla quale si vuole far funzionare il trasformatore.



Se si utilizzano valvole in parallelo è opportuno che le valvole siano tutte uguali, e i parametri iniziali da prefissare subiscono queste variazioni:

L'impedenza Z_a sarà uguale a: all'impedenza di carico anodico richiesta da una singola valvola diviso il numero delle valvole utilizzate. (parallelo delle impedenze)

La corrente I_a sarà uguale a: alla corrente continua di polarizzazione anodica di una valvola moltiplicato per il numero delle valvole utilizzate. (somma delle correnti).

Calcolo dei Parametri di Base

Dai valori di Z_a Z_c I_a è possibile risalire a tutti gli altri dati di massima del trasformatore:

Potenza assorbita dall'avvolgimento primario.

$$P_1 = Z_a \cdot I_a^2 \quad (\text{Watt}) \qquad P_1 = 6250 \cdot 0,040^2 = 10 \text{ Watt}$$

Tensione avvolgimento primario, corrispondente alla tensione di alimentazione del circuito anodico.

$$V_1 = \sqrt{P_1 \cdot Z_a} \quad (\text{Volt}) \qquad V_1 = \sqrt{10 \cdot 6250} = 250 \text{ Volt}$$

Potenza disponibile sull'avvolgimento secondario, tenendo in considerazione il rendimento del trasformatore come si fa per i trasformatori di alimentazione.

$$\eta = 60 + \left(\frac{\log_e (P_1 + 1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (P_1 + 1000)} \right) \quad (\%) \qquad 60 + \left(\frac{\log_e (10 + 1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (10 + 1000)} \right) = 72,8 \quad (\%)$$

$$P_2 = P_1 \cdot \eta \quad (\text{Watt}) \qquad P_2 = 10 \cdot 0,728 = 7,28 \text{ Watt}$$

Tensione disponibile sull'avvolgimento secondario.

$$V_2 = \sqrt{P_2 \cdot Z_c} \quad (\text{Volt}) \qquad V_2 = \sqrt{7,28 \cdot 8} = 7,63 \text{ Volt}$$

Corrente disponibile sull'avvolgimento secondario.

$$I_2 = \sqrt{\frac{P_2}{Z_c}} \quad (\text{Ampere}) \qquad I_2 = \sqrt{\frac{7,28}{8}} = 0,95 \text{ Ampere}$$

Diametro dei Conduttori

Dalla corrente e dalla densità di corrente si trova il diametro del filo di rame nudo, poi dalla tabella filo rame si sceglie il valore più prossimo.

$$\phi_r = 2 \cdot \sqrt{\frac{I}{J \cdot \pi}} \quad (mm) \quad \phi_{r_1} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,04}{2,5 \cdot \pi}} = 0,14 \text{ mm} \quad \phi_{r_2} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,95}{2,5 \cdot \pi}} = 0,69 \text{ mm}$$

Dalla tabella Filo Rame scelgo questi fili con le seguenti misure:

Diametro Filo Nudo ϕ_N (mm)	Diametro Filo Isolato ϕ_I (mm)	Sezione filo rame nudo S_f (mm ²)	n° di Spire in 1 cm di spazio N_{spcm}	Coefficien. di Riempimento K_f	Resistenza di 1m di filo R_f (Ω)	Peso di 1m di filo di rame P_f (gr/m)
0,14	0,167	0,0154	53,54	1,12	1,1433	0,1370
0,65	0,71	0,3318	12,64	1,11	0,0530	2,9533

Formato Lamierino

Tramite questa formula pratica si può trovare la superficie totale del Lamierino più adatto:

$$AxB = 100 \cdot \sqrt{\frac{P_1}{B \cdot f}} \quad (cm^2) \quad AxB = 100 \cdot \sqrt{\frac{10}{0,5 \cdot 50}} = 63,24 \text{ cm}^2$$

Dal valore di AxB ottenuto, utilizzando le formule specifiche del lamierino da noi scelto (vedi tabelle lamierini) si ricava la misura della colonna centrale C, di seguito tutte le altre quote del lamierino.

Dalla Tabella Lamierini scelgo questo lamierino con le seguenti misure:

AxB(cm ²)	A(mm)	B(mm)	C(mm)	D(mm)	E(mm)	F(mm)	G(mm)	Tipo	Gf(Kg/1cm)
58,8	70	84	28	14	42	14	14	EI84	0,360

Sezione del Nucleo

Il valore della Sezione Nucleo Ferromagnetico si calcola in funzione della misura C della colonna centrale del lamierino scelto. Se è possibile è sempre meglio utilizzare un rocchetto e quindi un pacco lamellare a sezione quadrata, perché geometricamente a parità di sezione ha il perimetro minore.

$$S_{fe} = \frac{C^2}{K_s} \quad (cm^2) \quad S_{fe} = \frac{2,8^2}{1,11} = 7,06 \text{ cm}^2$$

Dalla Sezione del Nucleo Ferromagnetico e dalla dimensione C del lamierino si ricava lo Spessore del pacco di lamierini, tenendo in considerazione anche il coefficiente di stipamento lamierini K_s .

$$Sp = \frac{S_{fe}}{C} \cdot K_s \quad (cm) \quad Sp = \frac{7,06}{2,8} \cdot 1,11 = 2,8 \text{ cm}$$

Conoscendo le misure del lamierino e dello spessore pacco è necessario trovare un rocchetto di idonee dimensioni. Da un catalogo scelgo un rocchetto in plastica con le seguenti misure:

Cr=29mm	Spr=29mm	M=12mm	H=39mm
---------	----------	--------	--------

Lo spazio disponibile che offre questo rocchetto per ospitare gli avvolgimenti è dato da:

$$S_{disp} = H \cdot M \quad (mm^2) \quad S_{disp} = 39 \cdot 12 = 468 \text{ mm}^2$$

Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro

Conoscendo lo spessore del singolo lamierino $sl=0,5mm$, e lo spessore del pacco lamellare Sp :

$$N_L = \frac{Sp}{K_s \cdot sl} \quad (\text{lamierini}) \quad N_L = \frac{2,8}{1,11 \cdot 0,05} = 50 \text{ lamierini}$$

Considerando il peso di un centimetro di spessore di pacco lamellare Gf calcolo il peso totale del pacco lamellare:

$$Gl = Gf \cdot Sp \quad (Kg) \quad Gl = 0,36 \cdot 2,8 = 1 \text{ Kg}$$

Conoscendo la cifra di perdita specifica del lamierino $ws = 3W/Kg$ si possono valutare le perdite nel ferro pf del nucleo ferromagnetico:

$$pf = B^2 \cdot ws \cdot Gl \quad (\text{watt}) \quad pf = 0,5^2 \cdot 3 \cdot 1 = 0,75 \text{ watt}$$

Numero Spire

La valutazione del numero delle spire dell'avvolgimento primario e secondario si effettua in relazione ai volt per spira:

$$e = 4,44 \cdot f_{\min} \cdot Sfe \cdot B \cdot 10^{-4} \quad (V) \qquad e = 4,44 \cdot 50 \cdot 7,06 \cdot 0,5 \cdot 10^{-4} = 0,0784V$$

Al secondario si verifica una caduta di tensione % in relazione alla potenza del trasformatore:

$$v\% = \frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{P_1}{2} + 2,72\right)\right)^{1,35}} \quad (\%) \qquad \frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{10}{2} + 2,72\right)\right)^{1,35}} = 15,24 \quad (\%)$$

Si può pertanto scrivere la relazione relativa alla tensione secondaria a vuoto:

$$V_{20} = \left(1 + \frac{v\%}{100}\right) \cdot V_2 \quad (V) \qquad V_{20} = \left(1 + \frac{15,24}{100}\right) \cdot 7,6 = 8,79 V$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento primario

$$N_1 = \frac{V_1}{e} \quad (\text{spire}) \qquad N_1 = \frac{250}{0,0784} = 3188 \text{ spire}$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento secondario, considerando la tensione secondaria a vuoto

$$N_2 = \frac{V_{20}}{e} \quad (\text{spire}) \qquad N_2 = \frac{8,79}{0,0784} = 112 \text{ spire}$$

Spessore del Traferro

Solo nei trasformatori di uscita single-ended è necessario realizzare un traferro per evitare la saturazione magnetica. Utilizzando un lamierino a mantello la misura del traferro va divisa per 2.:

$$Tr = \frac{1,256 \cdot 10^{-3} \cdot N_1 \cdot I_a}{B} \quad (mm) \qquad Tr = \frac{1,256 \cdot 10^{-3} \cdot 3188 \cdot 0,04}{0,5} = 0,32 mm$$

se Lamierino 2 Colonne $T_r = 0,32 (mm)$ se Lamierino a Mantello (tipo EI) $T_r = \frac{T_r}{2} = 0,16 (mm)$

Induttanza del Primario

Questo valore non serve nel calcolo del trasformatore ma è indice del comportamento alle più basse frequenze insieme con la corrente continua di polarizzazione ed il traferro:

$$L_1 = \frac{Z_a}{2 \cdot \pi \cdot f_{\min}} \quad (\text{Henry}) \qquad L_1 = \frac{6250}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 19,9 \text{ Henry}$$

Lunghezza filo avvolgimento e peso del rame

La lunghezza della spira media attorno al rocchetto è:

$$l_{spm} = 2 \cdot (Cr + M) + 2 \cdot (Spr + M) \quad (mm) \qquad l_{spm} = 2 \cdot (29 + 12) + 2 \cdot (29 + 12) = 164 mm$$

La lunghezza totale del filo dell'avvolgimento in relazione al numero di spire:

$$l_{avv} = l_{spm} \cdot N \cdot 10^{-3} \quad (m) \qquad l_{avv1} = 164 \cdot 3188 \cdot 10^{-3} = 523 m$$

$$l_{avv2} = 164 \cdot 112 \cdot 10^{-3} = 18,4 m$$

Considerando il peso di un metro di filo di rame Pf calcolo il peso rame totale degli avvolgimenti:

$$Gr = Pf \cdot l_{avv} \cdot 10^{-3} \quad (Kg) \qquad Gr_1 = 0,137 \cdot 523 \cdot 10^{-3} = 0,07164 Kg$$

$$Gr_2 = 2,953 \cdot 18,4 \cdot 10^{-3} = 0,05431 Kg$$

Resistenza degli avvolgimenti

Considerando la resistenza di un metro di filo di rame Rf calcolo la resistenza totale degli avvolgimenti:

$$R = Rf \cdot l_{avv} \quad (\Omega) \qquad R_1 = 1,1433 \cdot 523 = 597 \Omega \qquad R_2 = 0,0530 \cdot 18,4 = 0,975 \Omega$$

Perdite nel Rame

Determiniamo il nuovo valore di densità di corrente in relazione al filo utilizzato, poi conoscendo il peso del rame avvolgimento calcoliamo la potenza persa nel rame.

$$J = \frac{A}{S_f} \quad (A/mm^2) \quad J_1 = \frac{0,04}{0,0154} = 2,59 \text{ A/mm}^2 \quad J_2 = \frac{0,95}{0,3318} = 2,87 \text{ A/mm}^2$$

In relazione ai conduttori scelti la densità di corrente rientra nei limiti stabiliti, per cui si procede con il calcolo della potenza persa nel rame:

$$pr = 2,4 \cdot J^2 \cdot Gr \quad (\text{watt}) \quad pr_1 = 2,4 \cdot 2,59^2 \cdot 0,07164 = 1,16 \text{ watt}$$

$$pr_2 = 2,4 \cdot 2,87^2 \cdot 0,05431 = 1,07 \text{ watt}$$

Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento

La tabella filo rame fornisce anche il numero delle spire che possono essere contenute assialmente in un centimetro N_{spcm} .

In base all'altezza H della finestra del rocchetto si può stabilire quante spire stanno in uno strato:

$$S_{Str} = H \cdot N_{spcm} \quad (\text{spire} \cdot \text{strato}) \quad S_{Str1} = 3,9 \cdot 53,54 = 208,8 \text{ spire} \cdot \text{strato}$$

$$S_{Str2} = 3,9 \cdot 12,64 = 49,3 \text{ spire} \cdot \text{strato}$$

Considerando le spire totali si possono calcolare anche il numero degli strati necessari

$$N_{Str} = \frac{N}{S_{Str}} \quad (\text{strati}) \quad N_{Str1} = \frac{3188}{208,8} = 15,23 \text{ strati} \quad N_{Str2} = \frac{112}{49,3} = 2,27 \text{ strati}$$

Controllo Ingombri

Calcoliamo l'Ingombro Rame considerando il diametro filo rame isolato come se fosse di sezione quadrata in modo da tenere conto anche degli spazi d'aria fra spira e spira, che moltiplichiamo per il numero di spire e per il coefficiente di riempimento K_f che tiene conto di una certa tolleranza nell'esecuzione dell'avvolgimento.

$$Ing_R = \phi_1^2 \cdot N \cdot K_f \quad (mm^2) \quad Ing_{R1} = 0,167^2 \cdot 3188 \cdot 1,12 = 99,5 \text{ mm}^2$$

$$Ing_{R2} = 0,71^2 \cdot 112 \cdot 1,11 = 62,6 \text{ mm}^2$$

Totale Ingombro Rame

$$Ing_{Rtot} = \Sigma Ing_{Rx} \quad (mm^2) \quad Ing_{Rtot} = 99,5 + 62,6 = 162,1 \text{ mm}^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Strati. Supponendo di interporre fra ogni strato di spire un cartoncino isolante di spessore $I_{st}=0,2mm$,

$$Ing_{IST} = I_{ST} \cdot H \cdot \text{int}(N_{Str}) \quad (mm^2) \quad Ing_{IST1} = 0,2 \cdot 39 \cdot (15) = 117 \text{ mm}^2$$

$$Ing_{IST2} = 0,2 \cdot 39 \cdot (2) = 15,6 \text{ mm}^2$$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Strati:

$$Ing_{ISTtot} = \Sigma Ing_{ISTx} \quad (mm^2) \quad Ing_{ISTtot} = 117 + 15,6 = 132,6 \text{ mm}^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti. Terminata la costruzione alla fine di tutti gli avvolgimenti e fra un avvolgimento e l'altro supponiamo di inserire un cartoncino isolante di spessore $I_{av}=0,5mm$.

$$Ing_{IAV} = I_{AV} \cdot H \quad (mm^2) \quad Ing_{IAV} = 0,5 \cdot 39 = 19,5 \text{ mm}^2$$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti:

Essendo $n^{\circ}AVV$ il numero di avvolgimenti primari e secondari che compongono il trasformatore.

$$Ing_{IAVtot} = Ing_{IAV} \cdot n^{\circ}AVV \quad (mm^2) \quad Ing_{IAVtot} = 19,5 \cdot 2 = 39 \text{ mm}^2$$

Calcoliamo l'ingombro totale maggiorandolo di un coefficiente di ingombro percentuale $K_i=10\%$ che tiene conto delle imperfezioni nella realizzazione dell'avvolgimento e degli eventuali spazi d'aria.

$$Ing_{TOT} = Ing_{Rtot} + Ing_{ISTot} + Ing_{IAVtot} \cdot \left(1 + \frac{K_i\%}{100}\right) \quad (mm^2)$$

$$Ing_{TOT} = 162,1 + 132,6 + 39 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) = 367 \text{ mm}^2$$

Il valore dell'ingombro totale è minore dello spazio offerto dal rocchetto, quindi gli avvolgimenti saranno contenuti nel rocchetto comodamente.

Dimensionamento di un Trasformatore di Uscita Push-Pull

In questa descrizione ci si limita a fornire qualche indicazione sul dimensionamento dei trasformatori di uscita per amplificatori valvolari push-pull, al fine di inquadrare il problema nei suoi termini generali. Il punto di partenza è quello di individuare il tipo di valvola finale da impiegare e la propria configurazione nel circuito di polarizzazione partendo dai parametri caratteristici da Data-Sheet.

Elementi da prefissare

Conoscendo i seguenti dati di partenza è possibile calcolare un trasformatore di uscita:

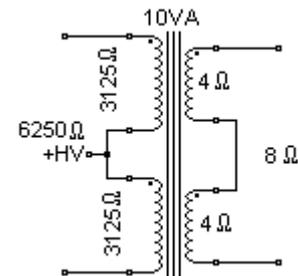
$Z_{aa} = 6250$ impedenza di carico anodo-anodo richiesto delle due valvole in Ω .

$Z_c = 8$ impedenza di carico della cassa acustica in Ω .

$I_a = 0,04$ corrente continua di polarizzazione anodica di una valvola in Ampere.

$f_{min} = 50$ frequenza minima riproducibile a -3dB del trasformatore in Hz.

$B = 0,8$ Induzione Magnetica in Wb/m^2 alla quale si vuole far funzionare il trasformatore.



Se si utilizzano valvole in parallelo è opportuno che le valvole siano tutte uguali, (stesso tipo e stessa marca). Per cui, e i parametri iniziali da prefissare subiscono queste variazioni:

L' impedenza Z_{aa} sarà uguale all'impedenza di carico anodo-anodo richiesta da una coppia di valvole, diviso il numero delle coppie di valvole utilizzate (parallelo delle impedenze).

La corrente I_a sarà uguale alla corrente continua di polarizzazione anodica di una coppia di valvole moltiplicato per il numero delle coppie di valvole utilizzate (somma delle correnti).

Calcolo dei Parametri di Base

Dai valori di Z_{aa} Z_c I_a è possibile risalire a tutti gli altri dati di massima del trasformatore:

Potenza assorbita dall'avvolgimento primario.

$$P_1 = Z_{aa} \cdot I_a^2 \quad (\text{Watt}) \qquad P_1 = 6250 \cdot 0,040^2 = 10 \text{ Watt}$$

Tensione avvolgimento primario, corrispondente alla tensione di alimentazione del circuito anodico.

$$V_1 = \sqrt{P_1 \cdot Z_{aa}} \quad (\text{Volt}) \qquad V_1 = \sqrt{10 \cdot 6250} = 250 \text{ Volt}$$

Potenza disponibile sull'avvolgimento secondario, tenendo in considerazione il rendimento del trasformatore come si fa per i trasformatori di alimentazione.

$$\eta = 60 + \left(\frac{\log_e (P_1 + 1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (P_1 + 1000)} \right) \quad (\%) \qquad 60 + \left(\frac{\log_e (10 + 1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (10 + 1000)} \right) = 72,8 \quad (\%)$$

$$P_2 = P_1 \cdot \eta \quad (\text{Watt}) \qquad P_2 = 10 \cdot 0,728 = 7,28 \text{ Watt}$$

Tensione disponibile sull'avvolgimento secondario.

$$V_2 = \sqrt{P_2 \cdot Z_c} \quad (\text{Volt}) \qquad V_2 = \sqrt{7,28 \cdot 8} = 7,63 \text{ Volt}$$

Corrente disponibile sull'avvolgimento secondario.

$$I_2 = \sqrt{\frac{P_2}{Z_c}} \quad (\text{Ampere}) \qquad I_2 = \sqrt{\frac{7,28}{8}} = 0,95 \text{ Ampere}$$

Diametro dei Conduttori

Dalla corrente e dalla densità di corrente si trova il diametro del filo di rame nudo, poi dalla tabella filo rame si sceglie il valore più prossimo.

$$\phi_r = 2 \cdot \sqrt{\frac{I}{J \cdot \pi}} \quad (mm) \quad \phi_{r_1} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,04}{2,5 \cdot \pi}} = 0,14 \text{ mm} \quad \phi_{r_2} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,95}{2,5 \cdot \pi}} = 0,69 \text{ mm}$$

Dalla tabella Filo Rame scelgo questi fili con le seguenti misure:

Diametro Filo Nudo ϕ_N (mm)	Diametro Filo Isolato ϕ_I (mm)	Sezione filo rame nudo S_f (mm ²)	n° di Spire in 1 cm di spazio N_{spcm}	Coefficien. di Riempimento K_f	Resistenza di 1m di filo R_f (Ω)	Peso di 1m di filo di rame P_f (gr/m)
0,14	0,167	0,0154	53,54	1,12	1,1433	0,1370
0,65	0,71	0,3318	12,64	1,11	0,0530	2,9533

Formato Lamierino

Tramite questa formula pratica si può trovare la superficie totale del Lamierino più adatto:

$$AxB = 100 \cdot \sqrt{\frac{P_1}{B \cdot f}} \quad (cm^2) \quad AxB = 100 \cdot \sqrt{\frac{10}{0,8 \cdot 50}} = 50 \text{ cm}^2$$

Dal valore di AxB ottenuto, utilizzando le formule specifiche del lamierino da noi scelto (vedi tabelle lamierini) si ricava la misura della colonna centrale C, di seguito tutte le altre quote del lamierino.

Dalla Tabella Lamierini scelgo questo lamierino con le seguenti misure:

AxB(cm ²)	A(mm)	B(mm)	C(mm)	D(mm)	E(mm)	F(mm)	G(mm)	Tipo	Gf(Kg/1cm)
4,875	62,5	75	25	12,5	37,5	12,5	12,5	EI75	0,287

Sezione del Nucleo

Il valore della Sezione Nucleo Ferromagnetico si calcola in funzione della misura C della colonna centrale del lamierino scelto. Se è possibile è sempre meglio utilizzare un rocchetto e quindi un pacco lamellare a sezione quadrata, perché geometricamente a parità di sezione ha il perimetro minore.

$$S_{fe} = \frac{C^2}{K_s} \quad (cm^2) \quad S_{fe} = \frac{2,5^2}{1,11} = 5,63 \text{ cm}^2$$

Dalla Sezione del Nucleo Ferromagnetico e dalla dimensione C del lamierino si ricava lo Spessore del pacco di lamierini, tenendo in considerazione anche il coefficiente di stipamento lamierini K_s .

$$Sp = \frac{S_{fe}}{C} \cdot K_s \quad (cm) \quad Sp = \frac{5,63}{2,5} \cdot 1,11 = 2,5 \text{ cm}$$

Conoscendo le misure del lamierino e dello spessore pacco è necessario trovare un rocchetto di idonee dimensioni. Da un catalogo scelgo un rocchetto in plastica a due gole con le seguenti misure:

Cr=26mm	Spr=26mm	M=10,5mm	I=16,75mm	L=16,75mm
---------	----------	----------	-----------	-----------

Lo spazio disponibile che offre questo rocchetto per ospitare gli avvolgimenti è dato da:

$$S_{disp} = I \cdot M \quad (mm^2) \quad S_{disp} = 16,75 \cdot 10,5 = 175,8 \text{ mm}^2$$

$$S_{disp} = L \cdot M \quad (mm^2) \quad S_{disp} = 16,75 \cdot 10,5 = 175,8 \text{ mm}^2$$

Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro

Conoscendo lo spessore del singolo lamierino $sl=0,5mm$, e lo spessore del pacco lamellare Sp :

$$N_L = \frac{Sp}{K_s \cdot sl} \quad (\text{lamierini}) \quad N_L = \frac{2,5}{1,11 \cdot 0,05} = 45 \text{ lamierini}$$

Considerando il peso di un centimetro di spessore di pacco lamellare Gf calcolo il peso totale del pacco lamellare:

$$Gl = Gf \cdot Sp \quad (Kg) \quad Gl = 0,287 \cdot 2,5 = 0,7175 \text{ Kg}$$

Conoscendo la cifra di perdita specifica del lamierino $ws = 3W/Kg$ si possono valutare le perdite nel ferro pf del nucleo ferromagnetico:

$$pf = B^2 \cdot ws \cdot Gl \quad (\text{watt}) \quad pf = 0,8^2 \cdot 3 \cdot 0,7175 = 1,38 \text{ watt}$$

Numero Spire

La valutazione del numero delle spire dell'avvolgimento primario e secondario si effettua in relazione ai volt per spira:

$$e = 4,44 \cdot f_{\min} \cdot Sfe \cdot B \cdot 10^{-4} \quad (V) \qquad e = 4,44 \cdot 50 \cdot 5,63 \cdot 0,8 \cdot 10^{-4} = 0,1V$$

Al secondario si verifica una caduta di tensione % in relazione alla potenza del trasformatore:

$$v\% = \frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{P_1}{2} + 2,72\right)\right)^{1,35}} \quad (\%) \qquad \frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{10}{2} + 2,72\right)\right)^{1,35}} = 15,24 \quad (\%)$$

Si può pertanto scrivere la relazione relativa alla tensione secondaria a vuoto:

$$V_{20} = \left(1 + \frac{v\%}{100}\right) \cdot V_2 \quad (V) \qquad V_{20} = \left(1 + \frac{15,24}{100}\right) \cdot 7,6 = 8,79V$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento primario

$$N_1 = \frac{V_1}{e} \quad (\text{spire}) \qquad N_1 = \frac{250}{0,1} = 2500 \text{ spire}$$

L'avvolgimento primario Z_{aa} va diviso in due creando una presa centrale dove si collega il positivo della tensione anodica. Per ciò si devono realizzare due avvolgimenti identici per le due valvole che poi collegheremo in serie:

$$N_1^x = \frac{N_1}{2} \quad (\text{spire}) \qquad N_1^I = \frac{2500}{2} = 1250 \text{ spire} \qquad N_1^{II} = \frac{2500}{2} = 1250 \text{ spire}$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento secondario, considerando la tensione secondaria a vuoto

$$N_2 = \frac{V_{20}}{e} \quad (\text{spire}) \qquad N_2 = \frac{8,79}{0,1} = 88 \text{ spire}$$

Siccome per facilitare la costruzione si utilizza un rocchetto a due gole anche l'avvolgimento secondario va diviso in due avvolgimenti identici che poi collegheremo in serie:

$$N_2^x = \frac{N_2}{2} \quad (\text{spire}) \qquad N_2^I = \frac{88}{2} = 44 \text{ spire} \qquad N_2^{II} = \frac{88}{2} = 44 \text{ spire}$$

Induttanza del Primario

Questo valore non serve nel calcolo del trasformatore ma è indice del comportamento alle più basse frequenze insieme con la corrente continua di polarizzazione ed il traferro:

$$L_1 = \frac{Z_{aa}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\min}} \quad (\text{Henry}) \qquad L_1 = \frac{6250}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 19,9 \text{ Henry}$$

Lunghezza filo avvolgimento e peso del rame

La lunghezza della spira media attorno al rocchetto è:

$$l_{spm} = 2 \cdot (Cr + M) + 2 \cdot (Spr + M) \quad (mm) \qquad l_{spm} = 2 \cdot (26 + 10,5) + 2 \cdot (26 + 10,5) = 146 \text{ mm}$$

La lunghezza totale del filo dell'avvolgimento in relazione al numero di spire:

$$l_{avv} = l_{spm} \cdot N \cdot 10^{-3} \quad (m) \qquad l_{avv1} = 146 \cdot 2500 \cdot 10^{-3} = 365 \text{ m}$$

$$l_{avv2} = 146 \cdot 88 \cdot 10^{-3} = 12,8 \text{ m}$$

Considerando il peso di un metro di filo di rame Pf calcolo il peso rame totale degli avvolgimenti:

$$Gr = Pf \cdot l_{avv} \cdot 10^{-3} \quad (Kg) \qquad Gr_1 = 0,137 \cdot 365 \cdot 10^{-3} = 0,050 \text{ Kg}$$

$$Gr_2 = 2,953 \cdot 12,8 \cdot 10^{-3} = 0,038 \text{ Kg}$$

Resistenza degli avvolgimenti

Considerando la resistenza di un metro di filo di rame Rf calcolo la resistenza totale degli avvolgimenti:

$$R = R_f \cdot l_{avv} \quad (\Omega) \quad R_1 = 1,1433 \cdot 365 = 417 \Omega \quad R_2 = 0,0530 \cdot 12,8 = 0,68 \Omega$$

Perdite nel Rame

Determiniamo il nuovo valore di densità di corrente in relazione al filo utilizzato, poi conoscendo il peso del rame avvolgimento calcoliamo la potenza persa nel rame.

$$J = \frac{A}{S_f} \quad (A/mm^2) \quad J_1 = \frac{0,04}{0,0154} = 2,59 A/mm^2 \quad J_2 = \frac{0,95}{0,3318} = 2,87 A/mm^2$$

In relazione ai conduttori scelti la densità di corrente rientra nei limiti stabiliti, per cui si procede con il calcolo della potenza persa nel rame:

$$pr = 2,4 \cdot J^2 \cdot Gr \quad (watt) \quad pr_1 = 2,4 \cdot 2,59^2 \cdot 0,050 = 0,805 watt$$

$$pr_2 = 2,4 \cdot 2,87^2 \cdot 0,038 = 0,751 watt$$

Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento

La tabella filo rame fornisce anche il numero delle spire che possono essere contenute assialmente in un centimetro N_{spcm} .

In base all'altezza I e L della finestra del rocchetto si può stabilire quante spire stanno in uno strato. Il calcolo va eseguito per ogni tipo di filo usato e per l'altezza di ogni gola utilizzata per quel filo:

$$S_{Str} = I \cdot N_{spcm} \quad (spire \cdot strato) \quad S_{Str1} = 1,675 \cdot 53,54 = 89,68 \text{ spire} \cdot \text{strato}$$

$$S_{Str} = L \cdot N_{spcm} \quad (spire \cdot strato) \quad S_{Str2} = 1,675 \cdot 12,64 = 21,17 \text{ spire} \cdot \text{strato}$$

Considerando le spire totali si possono calcolare anche il numero degli strati necessari

$$N_{Str} = \frac{N}{S_{Str}} \quad (strati) \quad N_{Str1} = \frac{2500}{89,68} = 27,8 \text{ strati} \quad N_{Str2} = \frac{88}{21,17} = 4,15 \text{ strati}$$

Ovviamente gli strati vanno suddivisi nelle due gole.

Controllo Ingombri

Calcoliamo l'Ingombro Rame considerando il diametro filo rame isolato come se fosse di sezione quadrata in modo da tenere conto anche degli spazi d'aria fra spira e spira, che moltiplichiamo per il numero di spire e per il coefficiente di riempimento K_f che tiene conto di una certa tolleranza nell'esecuzione dell'avvolgimento.

$$Ing_R = \phi_1^2 \cdot N \cdot K_f \quad (mm^2) \quad Ing_{R1} = 0,167^2 \cdot 2500 \cdot 1,12 = 78 mm^2$$

$$Ing_{R2} = 0,71^2 \cdot 88 \cdot 1,11 = 49,2 mm^2$$

Totale Ingombro Rame

$$Ing_{Rtot} = \Sigma Ing_{R_x} \quad (mm^2) \quad Ing_{Rtot} = 78 + 49,2 = 127,2 mm^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Strati. Supponendo di interporre fra ogni strato di spire un cartoncino isolante di spessore $I_{st}=0,2mm$,

$$Ing_{IST} = I_{ST} \cdot H \cdot \text{int}(N_{Str}) \quad (mm^2) \quad Ing_{IST1} = 0,2 \cdot 16,75 \cdot (27) = 90,45 mm^2$$

$$Ing_{IST2} = 0,2 \cdot 16,75 \cdot (4) = 13,4 mm^2$$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Strati:

$$Ing_{ISTtot} = \Sigma Ing_{ISTx} \quad (mm^2) \quad Ing_{ISTtot} = 90,45 + 13,4 = 103,85 mm^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti. Terminata la costruzione alla fine di tutti gli avvolgimenti e fra un avvolgimento e l'altro supponiamo di inserire un cartoncino isolante di spessore $I_{av}=0,5mm$.

$$Ing_{IAV} = I_{AV} \cdot H \quad (mm^2) \quad Ing_{IAV} = 0,5 \cdot 16,75 = 8,375 mm^2$$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti:

Essendo $n^{\circ}AVV$ il numero di avvolgimenti primari e secondari che compongono il trasformatore.

$$Ing_{IAVtot} = Ing_{IAV} \cdot n^{\circ}AVV \quad (mm^2) \qquad Ing_{IAVtot} = 8,375 \cdot 4 = 33,5 \text{ mm}^2$$

Calcoliamo l'ingombro totale maggiorandolo di un coefficiente di ingombro percentuale $Ki=10\%$ che tiene conto delle imperfezioni nella realizzazione dell'avvolgimento e degli eventuali spazi d'aria.

$$Ing_{TOT} = Ing_{Rtot} + Ing_{ISTot} + Ing_{IAVtot} \cdot \left(1 + \frac{Ki\%}{100}\right) \quad (mm^2)$$

$$Ing_{TOT} = 127,2 + 103,85 + 33,5 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) = 291 \text{ mm}^2$$

Essendo gli avvolgimenti suddivisi in parti uguali nelle due gole si ha:

$$Ing_{Gx} = \frac{Ing_{TOT}}{2} \quad (mm^2) \qquad Ing_{G1} = \frac{291}{2} = 145 \text{ mm}^2 \qquad Ing_{G2} = \frac{291}{2} = 145 \text{ mm}^2$$

Il valore dell'ingombro totale è minore dello spazio offerto dal rocchetto, quindi gli avvolgimenti saranno contenuti nel rocchetto comodamente.

Dimensionamento di un Trasformatore di Uscita Push-Pull configurazione D

In questa descrizione ci si limita a fornire qualche indicazione sul dimensionamento dei trasformatori di uscita per amplificatori valvolari push-pull, al fine di inquadrare il problema nei suoi termini generali. Il punto di partenza è quello di individuare il tipo di valvola finale da impiegare e la propria configurazione nel circuito di polarizzazione partendo dai parametri caratteristici da Data-Sheet.

Elementi da prefissare

Conoscendo i seguenti dati di partenza è possibile calcolare un trasformatore di uscita:

$Z_{aa} = 6250$ impedenza di carico anodo-anodo richiesto delle due valvole in Ω .

$Z_c = 8$ impedenza di carico della cassa acustica in Ω .

$I_a = 0,040$ corrente continua di polarizzazione anodica di una valvola in Ampere.

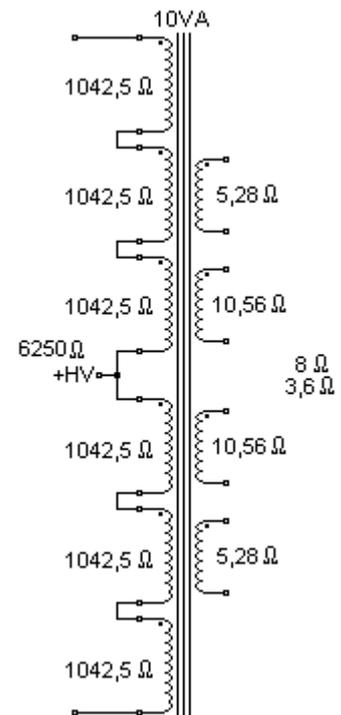
$f_{min} = 50$ frequenza minima riproducibile a -3dB del trasformatore in Hz.

$B = 0,8$ Induzione Magnetica in Wb/m^2 alla quale si vuole far funzionare il trasformatore.

Se si utilizzano valvole in parallelo è opportuno che le valvole siano tutte uguali, (stesso tipo e stessa marca). Per cui, e i parametri iniziali da prefissare subiscono queste variazioni:

L' impedenza Z_{aa} sarà uguale all'impedenza di carico anodo-anodo richiesta da una coppia di valvole, diviso il numero delle coppie di valvole utilizzate (parallelo delle impedenze).

La corrente I_a sarà uguale alla corrente continua di polarizzazione anodica di una coppia di valvole moltiplicato per il numero delle coppie di valvole utilizzate (somma delle correnti).



Calcolo dei Parametri di Base

Dai valori di Z_{aa} Z_c I_a è possibile risalire a tutti gli altri dati di massima del trasformatore:

Potenza assorbita dall'avvolgimento primario.

$$P_1 = Z_{aa} \cdot I_a^2 \quad (Watt) \qquad P_1 = 6250 \cdot 0,040^2 = 10Watt$$

Tensione avvolgimento primario, corrispondente alla tensione di alimentazione del circuito anodico.

$$V_1 = \sqrt{P_1 \cdot Z_{aa}} \quad (Volt) \qquad V_1 = \sqrt{10 \cdot 6250} = 250Volt$$

Potenza disponibile sull'avvolgimento secondario, tenendo in considerazione il rendimento del trasformatore come si fa per i trasformatori di alimentazione.

$$\eta = 60 + \left(\frac{\log_e (P_1 + 1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (P_1 + 1000)} \right) \quad (\%) \qquad 60 + \left(\frac{\log_e (10 + 1)^4 \cdot 9,2}{\log_e (10 + 1000)} \right) = 72,8 (\%)$$

$$P_2 = P_1 \cdot \eta \quad (Watt) \qquad P_2 = 10 \cdot 0,728 = 7,28Watt$$

Tensione disponibile sull'avvolgimento secondario.

$$V_2 = \sqrt{P_2 \cdot Z_c} \quad (Volt) \qquad V_2 = \sqrt{7,28 \cdot 8} = 7,63Volt$$

Corrente disponibile sull'avvolgimento secondario.

$$I_2 = \sqrt{\frac{P_2}{Z_c}} \quad (A) \qquad I_2 = \sqrt{\frac{7,28}{8}} = 0,954 A$$

Diametro dei Conduttori

Nella configurazione D l'impedenza secondaria più alta è ottenuta con due rami di avvolgimenti in parallelo. Per cui la corrente secondaria va suddivisa nei due rami. Quindi ogni avvolgimento secondario può essere avvolto con una sezione filo corrispondente alla metà di quella calcolata:

$$I_2 = \frac{I_2}{2} \quad (A) \qquad I_2 = \frac{0,954}{2} = 0,477 \text{ A}$$

Dalla corrente e dalla densità di corrente si trova il diametro del filo di rame nudo, poi dalla tabella filo rame si sceglie il valore più prossimo.

$$\phi_r = 2 \cdot \sqrt{\frac{I}{J \cdot \pi}} \quad (mm) \qquad \phi_{r1} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,040}{2,5 \cdot \pi}} = 0,14 \text{ mm} \qquad \phi_{r2} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,477}{2,5 \cdot \pi}} = 0,49 \text{ mm}$$

Dalla tabella Filo Rame scelgo questi fili con le seguenti misure:

Diametro Filo Nudo ϕ_N (mm)	Diametro Filo Isolato ϕ_I (mm)	Sezione filo rame nudo S_f (mm ²)	n° di Spire in 1 cm di spazio N_{spcm}	Coefficien. di Riempimento K_f	Resistenza di 1m di filo R_f (Ω)	Peso di 1m di filo di rame P_f (gr/m)
0,14	0,167	0,0154	53,54	1,12	1,1433	0,1370
0,45	0,51	0,1590	17,58	1,12	0,1107	1,4155

Formato Lamierino

Tramite questa formula pratica si può trovare la superficie totale del Lamierino più adatto:

$$AxB = 100 \cdot \sqrt{\frac{P_1}{B \cdot f}} \quad (cm^2) \qquad AxB = 100 \cdot \sqrt{\frac{10}{0,8 \cdot 50}} = 50 \text{ cm}^2$$

Dal valore di AxB ottenuto, utilizzando le formule specifiche del lamierino da noi scelto (vedi tabelle lamierini) si ricava la misura della colonna centrale C, di seguito tutte le altre quote del lamierino.

Dalla Tabella Lamierini scelgo questo lamierino con le seguenti misure:

AxB(cm ²)	A(mm)	B(mm)	C(mm)	D(mm)	E(mm)	F(mm)	G(mm)	Tipo	Gf(Kg/1cm)
4,875	62,5	75	25	12,5	37,5	12,5	12,5	EI75	0,287

Sezione del Nucleo

Il valore della Sezione Nucleo Ferromagnetico si calcola in funzione della misura C della colonna centrale del lamierino scelto. Se è possibile è sempre meglio utilizzare un rocchetto e quindi un pacco lamellare a sezione quadrata, perché geometricamente a parità di sezione ha il perimetro minore.

$$S_{fe} = \frac{C^2}{K_s} \quad (cm^2) \qquad S_{fe} = \frac{2,5^2}{1,11} = 5,63 \text{ cm}^2$$

Dalla Sezione del Nucleo Ferromagnetico e dalla dimensione C del lamierino si ricava lo Spessore del pacco di lamierini, tenendo in considerazione anche il coefficiente di stipamento lamierini K_s .

$$Sp = \frac{S_{fe}}{C} \cdot K_s \quad (cm) \qquad Sp = \frac{5,63}{2,5} \cdot 1,11 = 2,5 \text{ cm}$$

Conoscendo le misure del lamierino e dello spessore pacco è necessario trovare un rocchetto di idonee dimensioni. Da un catalogo scelgo un rocchetto in plastica a due gole con le seguenti misure:

Cr=26mm	Spr=26mm	M=10,5mm	I=16,75mm	L=16,75mm
---------	----------	----------	-----------	-----------

Lo spazio disponibile che offre questo rocchetto per ospitare gli avvolgimenti è dato da:

$$S_{disp} = I \cdot M \quad (mm^2) \qquad S_{disp} = 16,75 \cdot 10,5 = 175,8 \text{ mm}^2$$

$$S_{disp} = L \cdot M \quad (mm^2) \qquad S_{disp} = 16,75 \cdot 10,5 = 175,8 \text{ mm}^2$$

Numero dei Lamierini, Peso del Nucleo e Perdite nel Ferro

Conoscendo lo spessore del singolo lamierino $sl=0,5mm$, e lo spessore del pacco lamellare Sp :

$$N_L = \frac{Sp}{K_s \cdot sl} \quad (\text{lamierini})$$

$$N_L = \frac{2,5}{1,11 \cdot 0,05} = 45 \text{ lamierini}$$

Considerando il peso di un centimetro di spessore di pacco lamellare Gf calcolo il peso totale del pacco lamellare:

$$Gl = Gf \cdot Sp \quad (\text{Kg})$$

$$Gl = 0,287 \cdot 2,5 = 0,7175 \text{ Kg}$$

Conoscendo la cifra di perdita specifica del lamierino $ws = 3\text{W/Kg}$ si possono valutare le perdite nel ferro pf del nucleo ferromagnetico:

$$pf = B^2 \cdot ws \cdot Gl \quad (\text{watt})$$

$$pf = 0,8^2 \cdot 3 \cdot 0,7175 = 1,38 \text{ watt}$$

Numero Spire

La valutazione del numero delle spire dell'avvolgimento primario e secondario si effettua in relazione ai volt per spira:

$$e = 4,44 \cdot f_{\min} \cdot Sfe \cdot B \cdot 10^{-4} \quad (\text{V})$$

$$e = 4,44 \cdot 50 \cdot 5,63 \cdot 0,8 \cdot 10^{-4} = 0,1\text{V}$$

Al secondario si verifica una caduta di tensione % in relazione alla potenza del trasformatore:

$$v\% = \frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{P_1}{2} + 2,72\right)\right)^{1,35}} \quad (\%)$$

$$\frac{40}{\left(\log_e \left(\frac{10}{2} + 2,72\right)\right)^{1,35}} = 15,24 \quad (\%)$$

Si può pertanto scrivere la relazione relativa alla tensione secondaria a vuoto:

$$V_{20} = \left(1 + \frac{v\%}{100}\right) \cdot V_2 \quad (\text{V})$$

$$V_{20} = \left(1 + \frac{15,24}{100}\right) \cdot 7,6 = 8,79\text{V}$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento primario

$$N_1 = \frac{V_1}{e} \quad (\text{spire})$$

$$N_1 = \frac{250}{0,1} = 2500 \text{ spire}$$

Calcoliamo le spire dell'avvolgimento secondario, considerando la tensione secondaria a vuoto

$$N_2 = \frac{V_{20}}{e} \quad (\text{spire})$$

$$N_2 = \frac{8,79}{0,1} = 88 \text{ spire}$$

Avvolgimenti Parziali

L'avvolgimento primario N_1 nella configurazione D va diviso in 6 parti creando una presa centrale (3+3 avvolgimenti) dove si collega il positivo della tensione anodica. Per ciò si devono realizzare 6 avvolgimenti identici da avvolgere nelle rispettive 2 gole del rocchetto dedicati alle due valvole, che poi collegheremo in serie:

$$N_1^x = \frac{N_1}{6} \quad (\text{spire})$$

$$N_1^{I-VI} = \frac{2500}{6} = 417 \text{ spire}$$

Nella configurazione D l'impedenza secondaria più alta è ottenuta con il collegamento 3n, per cui anche l'avvolgimento secondario N_2 va diviso in parti, il cui il numero spire dell'avvolgimento parziale Nn sarà:

$$Nn = \frac{N_2}{3} \quad (\text{spire})$$

$$Nn = \frac{88}{3} = 29 \text{ spire}$$

Nella configurazione D sono previsti anche 2 avvolgimenti parziali di 2n spire:

$$N2n = Nn \cdot 2 \quad (\text{spire})$$

$$N2n = 29 \cdot 2 = 58 \text{ spire}$$

Quindi il secondario sarà composto da 4 avvolgimenti rispettivamente di 58spire, 58spire, 29spire, 29spire, combinabili in serie e parallelo per ottenere le impedenze descritte in configurazione D.

Altri Parametri degli Avvolgimenti Parziali

Anche se non ci interessano alla fine della realizzazione pratica del trasformatore di uscita è utile sapere per meglio capire come calcolare anche gli altri parametri relativi agli avvolgimenti parziali.

Primario

La configurazione D prevede che l'avvolgimento primario venga suddiviso in 6 parti, la tensione di una parte di avvolgimento sarà:

$$V_1^I = N_1^I \cdot e \quad (V) \qquad V_1^I = 417 \cdot 0,1 = 41,7 V$$

Tutte le 6 parti di avvolgimento primario sono collegate in serie, quindi percorsi dalla stessa corrente, da ciò la potenza dell'avvolgimento parziale sarà:

$$P_1^I = V_1^I \cdot I_1 \quad (Watt) \qquad P_1^I = 41,7 \cdot 0,040 = 1,668 Watt$$

L'impedenza che il singolo avvolgimento parziale assume quando è alimentato con la sua tensione V_1^I e con la sua corrente I_1 :

$$Z_1^I = \frac{V_1^{I2}}{P_1^I} \quad (\Omega) \qquad Z_1^I = \frac{41,7^2}{1,668} = 1042,5 \Omega$$

Come già detto collegando gli avvolgimenti in serie si ottiene l'impedenza risultante, per ciò ogni metà primario costituita da 3 avvolgimenti parziali collegati in serie presenta una impedenza di:

$$Z_{a1} = Z_1^I + Z_1^{II} + Z_1^{III} \quad (\Omega) \qquad Z_{a1} = 1042,5 + 1042,5 + 1042,5 = 3127,5 \Omega$$

Secondario

La tensione a vuoto del secondario parziale di n spire sarà:

$$V_{n0} = Nn \cdot e \quad (spire) \qquad V_{n0} = 29 \cdot 0,1 = 2,9 V$$

La tensione disponibile del secondario parziale di n spire sarà

$$V_n = \frac{V_{n0}}{\left(1 + \frac{v\%}{100}\right)} \quad (V) \qquad V_n = \frac{2,9}{\left(1 + \frac{15,24}{100}\right)} = 2,52 V$$

L'impedenza secondaria più alta è ottenuta con due rami di avvolgimenti in parallelo. Per cui la corrente secondaria va suddivisa nei due rami, da ciò la potenza dell'avvolgimento parziale sarà:

$$P_n = V_n \cdot I_n \quad (Watt) \qquad P_n = 2,52 \cdot 0,477 = 1,2 Watt$$

L'impedenza che il singolo avvolgimento n è in grado di alimentare un carico correttamente con la sua tensione V_n e con la sua corrente I_n :

$$Z_n = \frac{V_n^2}{P_n} \quad (\Omega) \qquad Z_n = \frac{2,52^2}{1,2} = 5,28 \Omega$$

Combinando fra loro gli avvolgimenti (in serie e in parallelo) si ottiene l'impedenza risultante. La configurazione D prevede che con il collegamento 3n si ha un'impedenza di 8Ω ed è ottenuta con un collegamento di 2n e n in serie, di 2n e n in serie, ed entrambi collegati in parallelo.

$$Z_{2n} = Z_n + Z_n \quad (\Omega) \qquad Z_{2n} = 5,28 + 5,28 = 10,56 \Omega$$

$$Z_{3n} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{2n} + Z_n} + \frac{1}{Z_{2n} + Z_n}} \qquad Z_{3n} = \frac{1}{\frac{1}{10,56 + 5,28} + \frac{1}{10,56 + 5,28}} = 7,92 \Omega$$

Mentre con il collegamento 2n si ha un'impedenza di $3,5\Omega$ ed è ottenuta con un collegamento di n e n in serie, di 2n, di 2n, poi collegati in parallelo.

$$Z_{3n} = \frac{1}{\frac{1}{Z_n + Z_n} + \frac{1}{Z_{2n}} + \frac{1}{Z_{2n}}}$$

$$Z_{3n} = \frac{1}{\frac{1}{5,28 + 5,28} + \frac{1}{10,56} + \frac{1}{10,56}} = 3,52 \Omega$$

Induttanza del Primario

Questo valore non serve nel calcolo del trasformatore ma è indice del comportamento alle più basse frequenze insieme con la corrente continua di polarizzazione ed il traferro:

$$L_1 = \frac{Z_{aa}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\min}} \quad (\text{Henry})$$

$$L_1 = \frac{6250}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 19,9 \text{ Henry}$$

Lunghezza filo avvolgimento e peso del rame

La lunghezza della spira media attorno al rocchetto è:

$$l_{spm} = 2 \cdot (Cr + M) + 2 \cdot (Spr + M) \quad (\text{mm})$$

$$l_{spm} = 2 \cdot (26 + 10,5) + 2 \cdot (26 + 10,5) = 146 \text{ mm}$$

La lunghezza totale del filo dell'avvolgimento in relazione al numero di spire:

$$l_{avv} = l_{spm} \cdot N \cdot 10^{-3} \quad (\text{m})$$

$$l_{avv1} = 146 \cdot 417 \cdot 10^{-3} = 60,9 \text{ m}$$

$$l_{avv2} = 146 \cdot 29 \cdot 10^{-3} = 4,23 \text{ m}$$

$$l_{avv3} = 146 \cdot 58 \cdot 10^{-3} = 8,46 \text{ m}$$

Considerando il peso di un metro di filo di rame Pf calcolo il peso rame totale degli avvolgimenti:

$$Gr = Pf \cdot l_{avv} \cdot 10^{-3} \quad (\text{Kg})$$

$$Gr_1 = 0,137 \cdot 60,9 \cdot 10^{-3} = 0,0083 \text{ Kg}$$

$$Gr_2 = 1,4155 \cdot 4,23 \cdot 10^{-3} = 0,0059 \text{ Kg}$$

$$Gr_3 = 1,4155 \cdot 8,46 \cdot 10^{-3} = 0,0119 \text{ Kg}$$

Resistenza degli avvolgimenti

Considerando la resistenza di un metro di filo di rame Rf calcolo la resistenza totale degli avvolgimenti:

$$R = Rf \cdot l_{avv} \quad (\Omega)$$

$$R_1 = 1,1433 \cdot 60,9 = 69,61 \Omega$$

$$R_2 = 0,1107 \cdot 4,23 = 0,47 \Omega$$

$$R_3 = 0,1107 \cdot 8,46 = 0,94 \Omega$$

Perdite nel Rame

Determiniamo il nuovo valore di densità di corrente in relazione al filo utilizzato, poi conoscendo il peso del rame avvolgimento calcoliamo la potenza persa nel rame.

$$J = \frac{A}{Sf} \quad (\text{A/mm}^2)$$

$$J_1 = \frac{0,04}{0,0154} = 2,59 \text{ A/mm}^2$$

$$J_2 = \frac{0,477}{0,1590} = 3 \text{ A/mm}^2$$

$$J_3 = \frac{0,477}{0,1590} = 3 \text{ A/mm}^2$$

In relazione ai conduttori scelti la densità di corrente rientra nei limiti stabiliti, per cui si procede con il calcolo della potenza persa nel rame:

$$pr = 2,4 \cdot J^2 \cdot Gr \quad (\text{watt})$$

$$pr_1 = 2,4 \cdot 2,59^2 \cdot 0,0083 = 0,133 \text{ watt}$$

$$pr_2 = 2,4 \cdot 3^2 \cdot 0,0059 = 0,127 \text{ watt}$$

$$pr_3 = 2,4 \cdot 3^2 \cdot 0,0119 = 0,257 \text{ watt}$$

Formazione assiale e radiale dell'avvolgimento

La tabella filo rame fornisce anche il numero delle spire che possono essere contenute assialmente in un centimetro N_{spcm} .

In base all'altezza I e L della finestra del rocchetto si può stabilire quante spire stanno in uno strato. Il calcolo va eseguito per ogni tipo di filo usato e per la larghezza di ogni gola utilizzata per quel filo:

$$S_{Str} = I \cdot N_{spcm} \quad (\text{spire} \cdot \text{strato}) \quad S_{Str1} = 1,675 \cdot 53,54 = 89,68 \text{ spire} \cdot \text{strato}$$

$$S_{Str} = L \cdot N_{spcm} \quad (\text{spire} \cdot \text{strato}) \quad S_{Str2} = 1,675 \cdot 17,58 = 29,44 \text{ spire} \cdot \text{strato}$$

Considerando le spire totali si possono calcolare anche il numero degli strati necessari

$$N_{Str} = \frac{N}{S_{Str}} \quad (\text{strati}) \quad N_{Str1} = \frac{417}{89,68} = 4,64 \text{ strati}$$

$$N_{Str2} = \frac{29}{29,44} = 0,98 \text{ strati}$$

$$N_{Str3} = \frac{58}{29,44} = 1,97 \text{ strati}$$

Ovviamente gli strati vanno suddivisi nelle due gole.

Controllo Ingombri

Calcoliamo l'Ingombro Rame considerando il diametro filo rame isolato come se fosse di sezione quadrata in modo da tenere conto anche degli spazi d'aria fra spira e spira, che moltiplichiamo per il numero di spire e per il coefficiente di riempimento Kf che tiene conto di una certa tolleranza nell'esecuzione dell'avvolgimento.

$$Ing_R = \phi_1^2 \cdot N \cdot Kf \quad (mm^2) \quad Ing_{R1} = 0,167^2 \cdot 417 \cdot 1,12 = 13,02 mm^2$$

$$Ing_{R2} = 0,51^2 \cdot 29 \cdot 1,12 = 8,44 mm^2$$

$$Ing_{R3} = 0,51^2 \cdot 58 \cdot 1,12 = 16,89 mm^2$$

Totale Ingombro Rame considerando che nella configurazione D sono presenti 6 avvolgimenti primari e 2 +2 avvolgimenti secondari:

$$Ing_{Rtot} = \sum Ing_{Rx} \quad (mm^2) \quad Ing_{Rtot} = (13,02 \cdot 6) + (8,44 \cdot 2) + (16,89 \cdot 2) = 128,78 mm^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Strati. Supponendo di interporre fra ogni strato di spire un cartoncino isolante di spessore $Ist=0,2mm$,

$$Ing_{IST} = I_{ST} \cdot H \cdot int(N_{Str}) \quad (mm^2) \quad Ing_{IST1} = 0,2 \cdot 16,75 \cdot (4) = 13,4 mm^2$$

$$Ing_{IST2} = 0,2 \cdot 16,75 \cdot (0) = 0 mm^2$$

$$Ing_{IST3} = 0,2 \cdot 16,75 \cdot (1) = 3,35 mm^2$$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Strati considerando che nella configurazione D sono presenti 6 avvolgimenti primari e 2 +2 avvolgimenti secondari:

$$Ing_{ISTtot} = \sum Ing_{ISTx} \quad (mm^2) \quad Ing_{ISTtot} = (13,4 \cdot 6) + (0 \cdot 2) + (3,35 \cdot 2) = 87,1 mm^2$$

Calcoliamo l'Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti. Terminata la costruzione alla fine di tutti gli avvolgimenti e fra un avvolgimento e l'altro supponiamo di inserire un cartoncino isolante di spessore $Iav=0,5mm$.

$$Ing_{Iav} = I_{AV} \cdot H \quad (mm^2) \quad Ing_{Iav} = 0,5 \cdot 16,75 = 8,375 mm^2$$

Totale Ingombro dell'Isolante fra gli Avvolgimenti:

Essendo $n^{\circ}Avv$ il numero di avvolgimenti primari e secondari che compongono il trasformatore.

$$Ing_{Iavtot} = Ing_{Iav} \cdot n^{\circ}Avv \quad (mm^2) \quad Ing_{Iavtot} = 8,375 \cdot 10 = 83,75 mm^2$$

Calcoliamo l'ingombro totale maggiorandolo di un coefficiente di ingombro percentuale $K_i=10\%$ che tiene conto delle imperfezioni nella realizzazione dell'avvolgimento e degli eventuali spazi d'aria.

$$Ing_{TOT} = Ing_{Rtot} + Ing_{ISTot} + Ing_{IAVtot} \cdot \left(1 + \frac{K_i\%}{100}\right) \quad (mm^2)$$

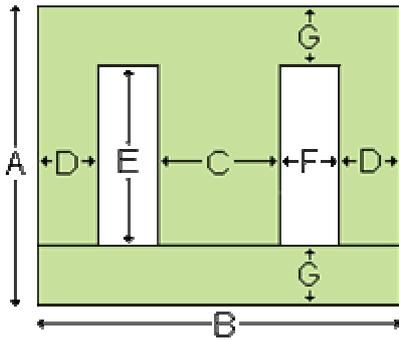
$$Ing_{TOT} = 128,78 + 87,1 + 83,75 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) = 329,5 \text{ mm}^2$$

Essendo gli avvolgimenti suddivisi in parti uguali nelle due gole si ha:

$$Ing_{Gx} = \frac{Ing_{TOT}}{2} \quad (mm^2) \quad Ing_{G1} = \frac{329,5}{2} = 165 \text{ mm}^2 \quad Ing_{G2} = \frac{329,5}{2} = 165 \text{ mm}^2$$

Il valore dell'ingombro totale è minore dello spazio offerto dal rocchetto, quindi gli avvolgimenti saranno contenuti nel rocchetto comodamente.

Tabella Lamierino Tipo EI Standard (MO) Monofase



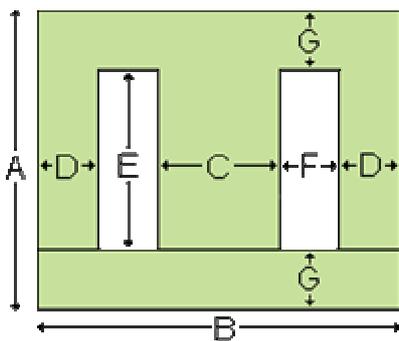
Un solo Rocchetto nella colonna centrale C

$$A = C \cdot 2,5 \qquad B = C \cdot 3 \qquad E = C \cdot 1,5$$

$$C = \sqrt{\frac{AxB}{2,5 \cdot 3}} \qquad D = \frac{C}{2} \qquad F = \frac{C}{2} \qquad G = \frac{C}{2}$$

AxB(cm ²)	A(mm)	B(mm)	C(mm)	D(mm)	E(mm)	F(mm)	G(mm)	Tipo	Gf(Kg/1cm)	Su(cm ²)
10,8	30	36	12	6	18	6	6	EI36	0,066	8,6
14,7	35	42	14	7	21	7	7	EI42	0,090	11,8
19,2	40	48	16	8	24	8	8	EI48	0,118	15,4
24,3	45	54	18	9	27	9	9	EI54	0,149	19,4
30	50	60	20	10	30	10	10	EI60	0,184	24,0
36,3	55	66	22	11	33	11	11	EI66	0,222	29,0
46,875	62,5	75	25	12,5	37,5	12,5	12,5	EI75	0,287	37,5
58,8	70	84	28	14	42	14	14	EI84	0,360	47,0
76,8	80	96	32	16	48	16	16	EI96	0,470	61,4
97,2	90	108	36	18	54	18	18	EI108	0,595	77,8
120	100	120	40	20	60	20	20	EI120	0,735	96,0
151,875	112,5	135	45	22,5	67,5	22,5	22,5	EI135	0,930	121,5
187,5	125	150	50	25	75	25	25	EI150	1,149	150,0
270	150	180	60	30	90	30	30	EI180	1,654	216,0
367,5	175	210	70	35	105	35	35	EI210	2,251	294,0
480	200	240	80	40	120	40	40	EI240	2,941	384,0
607,5	225	270	90	45	135	45	45	EI270	3,722	486,0
750	250	300	100	50	150	50	50	EI300	4,595	600,0

Tabella Lamierino Tipo EI DILDA (MO) Monofase



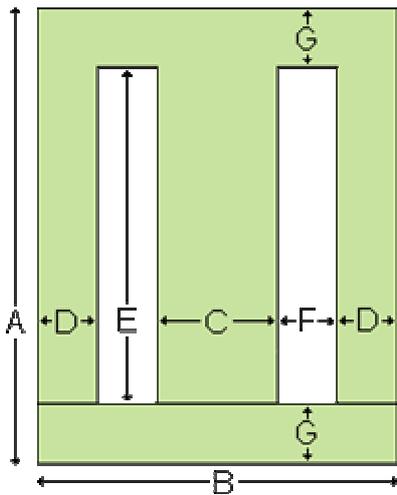
Un solo Rocchetto nella colonna centrale C

$$A = F + F + E \qquad B = E + E \qquad E = E$$

$$C = C \qquad D = F \qquad F = F \qquad G = F$$

AxB(cm ²)	A(mm)	B(mm)	C(mm)	D(mm)	E(mm)	F(mm)	G(mm)	Tipo	Gf(Kg/1cm)	Su(cm ²)
9,86	29	34	10	6	17	6	6	EI34	0,060	7,820
17,325	38,5	45	13	8	22,5	8	8	EI45	0,105	13,725
27,645	48,5	57	17	10	28,5	10	10	EI57	0,168	21,945
46,62	63	74	22	13	37	13	13	EI74	0,283	37,000
78,72	82	96	28	17	48	17	17	EI96	0,478	62,400
131,44	106	124	36	22	62	22	22	EI124	0,798	104,16
201,74	131	154	46	27	77	27	27	EI154	1,226	160,16

Tabella Lamierino Tipo EI Allungato (MA) Monofase



Un solo Rocchetto nella colonna centrale C

$$A = C \cdot 4$$

$$B = C \cdot 3$$

$$E = C \cdot 3$$

$$C = \sqrt{\frac{A \cdot B}{4 \cdot 3}}$$

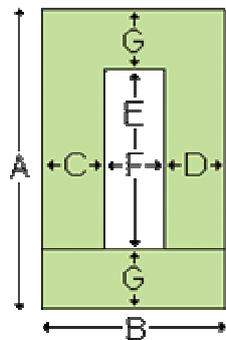
$$D = \frac{C}{2}$$

$$F = \frac{C}{2}$$

$$G = \frac{C}{2}$$

AxB(cm ²)	A(mm)	B(mm)	C(mm)	D(mm)	E(mm)	F(mm)	G(mm)	Tipo	Gf(Kg/1cm)	Su(cm ²)
192	160	120	40	20	120	20	20	EI120/160	1,103	144,0
300	200	150	50	25	150	25	25	EI150/200	1,723	225,0
491,52	256	192	64	32	192	32	32	EI192/256	2,823	368,6
588	280	210	70	35	210	35	35	EI210/280	3,377	441,0
768	320	240	80	40	240	40	40	EI240/320	4,411	576,0
1200	400	300	100	50	300	50	50	EI300/400	6,892	900,0

Tabella Lamierino Tipo UI Monofase a 2 Colonne



Un solo Rocchetto nella colonna C, oppure due rocchetti uguali rispettivamente nelle colonne C e D.

$$A = C \cdot 5$$

$$B = C \cdot 3$$

$$E = C \cdot 3$$

$$C = \sqrt{\frac{A \cdot B}{5 \cdot 3}}$$

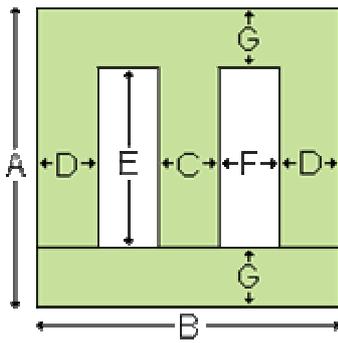
$$D = C$$

$$F = C$$

$$G = C$$

AxB(cm ²)	A(mm)	B(mm)	C(mm)	D(mm)	E(mm)	F(mm)	G(mm)	Tipo	Gf(Kg/1cm)	Su(cm ²)
15	50	30	10	10	30	10	10	UI30	0,069	9,0
25,35	65	39	13	13	39	13	13	UI39	0,116	15,2
38,4	80	48	16	16	48	16	16	UI48	0,176	23,0
60	100	60	20	20	60	20	20	UI60	0,276	36,0
93,75	125	75	25	25	75	25	25	UI75	0,431	56,3
135	150	90	30	30	90	30	30	UI90	0,620	81,0
240	200	120	40	40	120	40	40	UI120	1,103	144,0
375	250	150	50	50	150	50	50	UI150	1,723	225,0
540	300	180	60	60	180	60	60	UI180	2,481	324,0
735	350	210	70	70	210	70	70	UI210	3,377	441,0
960	400	240	80	80	240	80	80	UI240	4,411	576,0

Tabella Lamierino Tipo EI Quadro (TQ) Trifase



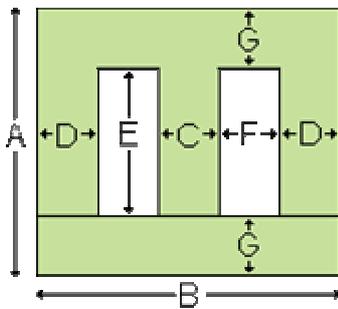
Tre rocchetti uguali rispettivamente nelle colonne D C D.

$$A = C \cdot 5 \qquad B = C \cdot 5 \qquad E = C \cdot 3$$

$$C = \sqrt{\frac{A \cdot B}{5 \cdot 5}} \qquad D = C \qquad F = C \qquad G = C$$

AxB(cm ²)	A(mm)	B(mm)	C(mm)	D(mm)	E(mm)	F(mm)	G(mm)	Tipo	Gf(Kg/1cm)	Su(cm ²)
64	80	80	16	16	48	16	16	EI80	0,372	48,6
100	100	100	20	20	60	20	20	EI100	0,582	76,0
156,25	125	125	25	25	75	25	25	EI125	0,909	118,8
225	150	150	30	30	90	30	30	EI150	1,309	171,0
400	200	200	40	40	120	40	40	EI200	2,328	304,0
625	250	250	50	50	150	50	50	EI250	3,637	475,0
900	300	300	60	60	180	60	60	EI300	5,238	684,0
1225	350	350	70	70	210	70	70	EI350	7,129	931,0
1600	400	400	80	80	240	80	80	EI400	9,312	1216,0
2025	450	450	90	90	270	90	90	EI450	11,785	1539,0
2500	500	500	100	100	300	100	100	EI500	14,550	1900,0

Tabella Lamierino Tipo EI Standard Trifase



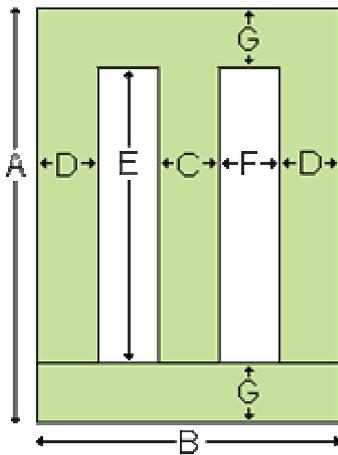
Tre rocchetti uguali rispettivamente nelle colonne D C D.

$$A = C \cdot 4,5 \qquad B = C \cdot 5 \qquad E = C \cdot 2,5$$

$$C = \sqrt{\frac{A \cdot B}{4,5 \cdot 5}} \qquad D = C \qquad F = C \qquad G = C$$

AxB(cm ²)	A(mm)	B(mm)	C(mm)	D(mm)	E(mm)	F(mm)	G(mm)	Tipo	Gf(Kg/1cm)	Su(cm ²)
57,6	72	80	16	16	40	16	16	EI80	0,343	44,8
90	90	100	20	20	50	20	20	EI100	0,536	70,0
140,625	112,5	125	25	25	62,5	25	25	EI125	0,838	109,4
202,5	135	150	30	30	75	30	30	EI150	1,206	157,5
360	180	200	40	40	100	40	40	EI200	2,144	280,0
562,5	225	250	50	50	125	50	50	EI250	3,350	437,5
810	270	300	60	60	150	60	60	EI300	4,824	630,0
1102,5	315	350	70	70	175	70	70	EI350	6,566	857,5
1440	360	400	80	80	200	80	80	EI400	8,577	1120,0
1822,5	405	450	90	90	225	90	90	EI450	10,855	1417,5
2250	450	500	100	100	250	100	100	EI500	13,401	1750,0

Tabella Lamierino Tipo EI Allungato Trifase



Tre rocchetti uguali rispettivamente nelle colonne D C D.

$$A = C \cdot 7$$

$$B = C \cdot 5$$

$$E = C \cdot 5$$

$$C = \sqrt{\frac{A \cdot B}{7 \cdot 5}}$$

$$D = C$$

$$F = C$$

$$G = C$$

AxB(cm ²)	A(mm)	B(mm)	C(mm)	D(mm)	E(mm)	F(mm)	G(mm)	Tipo	Gf(Kg/1cm)	Su(cm ²)
89,6	112	80	16	16	80	16	16	EI80	0,490	64,0
140	140	100	20	20	100	20	20	EI100	0,766	100,0
218,75	175	125	25	25	125	25	25	EI125	1,197	156,3
315	210	150	30	30	150	30	30	EI150	1,723	225,0
560	280	200	40	40	200	40	40	EI200	3,063	400,0
875	350	250	50	50	250	50	50	EI250	4,786	625,0
1260	420	300	60	60	300	60	60	EI300	6,892	900,0
1715	490	350	70	70	350	70	70	EI350	9,381	1225,0
2240	560	400	80	80	400	80	80	EI400	12,252	1600,0
2835	630	450	90	90	450	90	90	EI450	15,507	2025,0
3500	700	500	100	100	500	100	100	EI500	19,144	2500,0

Per tutti modelli di lamierini la Superficie Utile *Su* rappresenta l'area in centimetri quadrati.

$$Su = AxB - 2 \cdot (E \cdot F) \quad (cm^2) \quad \text{Superficie Utile netta del lamierino.}$$

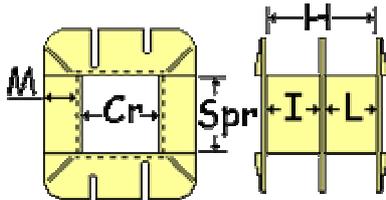
Con questa formula calcoliamo il peso di un pacco lamellare unitario dello spessore di un centimetro *Gf*, considerando il peso specifico del materiale ferromagnetico =8,5 Kg/dm³ e un coefficiente di stipamento *Ks*=1,11.

$$Gf = 8,5 \cdot Su \cdot \frac{Sp}{Ks} \cdot 10^{-3} \quad (Kg) \quad \text{Peso di un pacco lamellare di spessore Sp=1 centimetro.}$$

Rocchetti per Avvolgimenti dei Trasformatori

Le dimensioni dei rocchetti possono essere molteplici e variano in funzione della dimensione e del tipo di lamierino. Per ogni lamierino esistono più tipi di rocchetti differenti in forma e misure, a semplice o doppia gola. La misura *Spr* dello spessore del pacco lamellare non sempre combacia con lo Spessore del Pacco Lamellare *Sp* calcolato, infatti esistono solo poche taglie di *Spr* per ogni tipo di rocchetto adatto a quel dato lamierino. Perciò è opportuno ricercare il rocchetto più vicino alle dimensioni calcolate e poi ricalcolare il trasformatore in funzione del nuovo pacco lamellare scelto.

Indicativamente le misure del rocchetto si riassumono come segue:



Dimensioni del Rocchetto in funzione delle dimensioni del lamierino

$$Cr = C \cdot 1,03 \qquad Spr = Sp \cdot 1,1 \qquad H = \frac{E}{1,09}$$

Le misure di I e L possono essere diverse oppure uguali :

$$I = L = \frac{H}{2} - 0,525 \qquad \text{spessore diaframma } S = 1,05$$

Misura M per Lamierino a 1 rocch. e per Lamierino a 2 o più rocch.:

$$M = \frac{F}{1,29} \qquad M = \frac{F}{2 \cdot 1,29}$$

Come già detto esistono diversi modelli di rocchetti con vastissime dimensioni, possono disporre di una singola gola H oppure due gole I ed L. Alcuni rocchetti hanno le gole di larghezza uguale mentre altri ne hanno una più larga destinata all'avvolgimento di maggior ingombro e una più stretta per l'avvolgimento meno ingombrante. Separare gli avvolgimenti in gole separate contribuisce ad aumentare l'isolamento fra primario e secondario. Le misure di *Cr* e *Spr* sono concordi alle misure di *C* e *Sp* del lamierino, mentre H corrisponde alla E. Di solito la misura di *Spr* può essere da 0,5 a 3 volte la misura di C.

Quando si progetta un trasformatore e buona norma eseguire un calcolo di massima, individuare il pacco lamellare previsto, reperire il rocchetto giusto, ricalcolare nuovamente il trasformatore procedendo in base al nuovo pacco lamellare definito.

Nel caso che sul mercato non riusciamo a trovare il rocchetto plastico necessario alle nostre esigenze bisogna costruirlo con del cartoncino rigido come indicato in figura. Ritagliamo le parti avendo cura di rispettare le misure desiderate che poi incolliamo fino ad ottenere un rocchetto con misure personalizzate

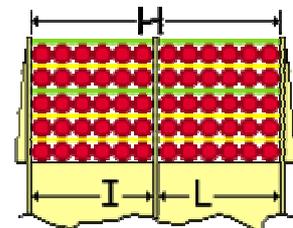
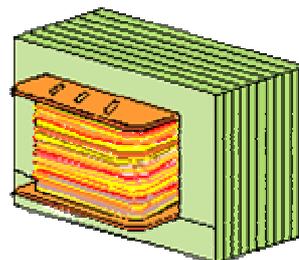
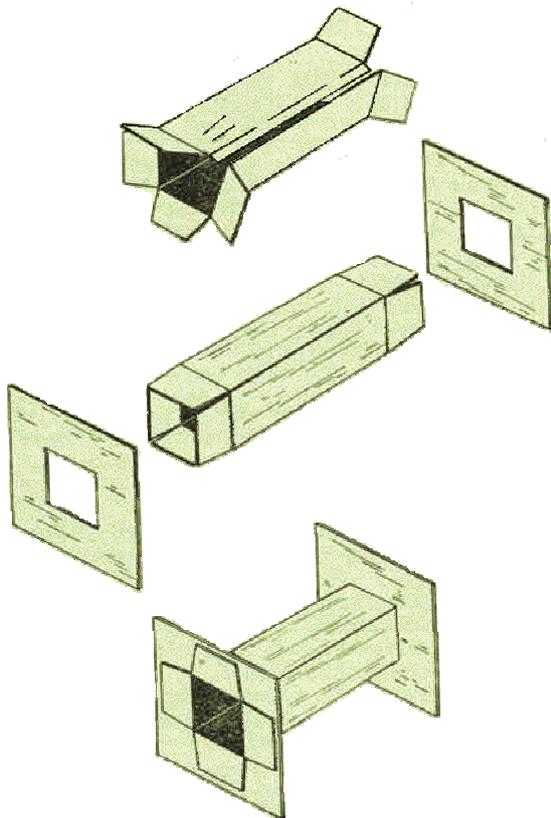
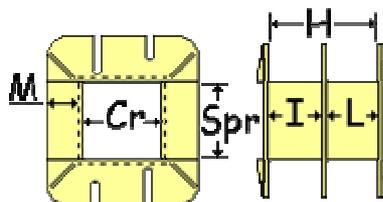
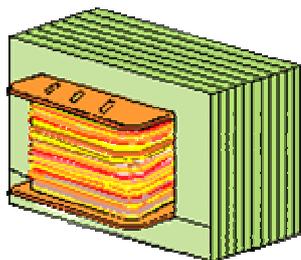


Tabella dei Rocchetti Plastici più comuni per Trasformatori con nucleo a Mantello

Questa tabella elenca le misure in mm di alcuni degli svariati rocchetti plastici per trasformatori:



Rocchetti per Lamierino Standard 35x42 tipo EI42 con colonna centrale C=14

Lam. Tipo	Cr (mm)	Spr (mm)	M (mm)	H (mm)	I (mm)	L (mm)	S (mm)
EI42/14	14,6	14,0	6,2	18,6	7,8	7,8	1,0
EI42/18	14,6	18,0	6,2	18,6	7,8	7,8	1,0

Rocchetti per Lamierino Standard 40x48 tipo EI48 con colonna centrale C=16

Lam. Tipo	Cr (mm)	Spr (mm)	M (mm)	H (mm)	I (mm)	L (mm)	S (mm)
EI48/16	16,5	16	7,25	22	10,7	10,2	0,8
EI48/20	16,5	20	7,25	22	10,7	10,2	0,8
EI48/25	16,5	25	7,25	21,5	10,8	8,5	1,1

Rocchetti per Lamierino Standard 45x54 tipo EI54 con colonna centrale C=18

Lam. Tipo	Cr (mm)	Spr (mm)	M (mm)	H (mm)	I (mm)	L (mm)	S (mm)
EI54/18	18,8	18	7,5	23,8	10,8	10,8	0,7
EI54/28	18,8	28	7,5	23,8	10,8	10,8	0,7

Rocchetti per Lamierino Standard 50x60 tipo EI60 con colonna centrale C=20

Lam. Tipo	Cr (mm)	Spr (mm)	M (mm)	H (mm)	I (mm)	L (mm)	S (mm)
EI60/20	20,5	20	9,25	27	13,6	12,5	1
EI60/25	20,5	25	9,25	27	13,6	12,5	1
EI60/30	20,5	30	9,25	27	13,6	12,5	1
EI60/35	20,8	35,5	8,45	27	13	11,8	1,25
EI60/40	20,8	40,5	8,45	27	13	11,8	1,25
EI60/45	20,8	45,5	8,45	27	13	11,8	1,25

Rocchetti per Lamierino Standard 55x66 tipo EI66 con colonna centrale C=22

Lam. Tipo	Cr (mm)	Spr (mm)	M (mm)	H (mm)	I (mm)	L (mm)	S (mm)
EI66/22	22,8	22,5	9,5	29,8	13,5	14,5	1,35
EI66/25	22,8	25,5	9,5	29,8	13,5	14,5	1,35
EI66/30	22,8	30,5	9,5	29,8	13,5	14,5	1,35
EI66/35	22,8	35,5	9,5	29,8	13,5	14,5	1,35
EI66/40	22,8	40,5	9,5	29,8	13,5	14,5	1,35
EI66/45	22,8	45,5	9,5	29,8	13,75	14,75	1,35
EI66/55	22,8	55,5	9,5	29,8	13,75	14,75	1,35

Rocchetti per Lamierino Standard 62,5x75 tipo EI75 con colonna centrale C=25

Lam. Tipo	Cr (mm)	Spr (mm)	M (mm)	H (mm)	I (mm)	L (mm)	S (mm)
EI75/20	25,8	20,8	10,8	34	14	18	1,5
EI75/25	25,8	25,8	10,8	34	14	18	1,5
EI75/30	25,8	30,8	10,8	34	14	18	1,5
EI75/35	25,8	35,8	10,8	34	14	18	1,5
EI75/40	25,8	40,8	10,8	34	14	18	1,5

Rocchetti per Lamierino Standard 70x84 tipo EI84 con colonna centrale C=28

<i>Lam. Tipo</i>	<i>Cr (mm)</i>	<i>Spr (mm)</i>	<i>M (mm)</i>	<i>H (mm)</i>	<i>I (mm)</i>	<i>L (mm)</i>	<i>S (mm)</i>
EI84/21	28,8	21,8	12,2	38,5	20	16,5	1,5
EI84/28	28,8	28,8	12,2	38,5	20	16,5	1,5
EI84/30	28,8	30,8	12,2	38,5	20	16,5	1,5
EI84/35	28,8	35,8	12,2	38,5	18,5	18,5	1,5
EI84/40	28,8	40,8	12,2	38,5	20	16,5	1,5
EI84/45	28,8	45,8	12,2	38,5	20	16,5	1,5
EI84/50	28,8	50,8	12,2	38,5	20	16,5	1,5

Rocchetti per Lamierino Standard 80x96 tipo EI96 con colonna centrale C=32

<i>Lam. Tipo</i>	<i>Cr (mm)</i>	<i>Spr (mm)</i>	<i>M (mm)</i>	<i>H (mm)</i>	<i>I (mm)</i>	<i>L (mm)</i>	<i>S (mm)</i>
EI96/32	33	32,8	14	44	21	21	1,55
EI96/35	32,7	35,9	14	44	21	21	1,55
EI96/40	32,6	40,8	14	43,7	21	21	1,55
EI96/45	32,6	45,6	14	43,7	21	21	1,55
EI96/50	32,6	50,6	14	43,5	21	21	1,55
EI96/60	32,5	60,8	14	43,7	21	21	1,55
EI96/70	32,8	70,8	14	44,2	21	21	1,55

Rocchetti per Lamierino Standard 90x108 tipo EI108 con colonna centrale C=36

<i>Lam. Tipo</i>	<i>Cr (mm)</i>	<i>Spr (mm)</i>	<i>M (mm)</i>	<i>H (mm)</i>	<i>I (mm)</i>	<i>L (mm)</i>	<i>S (mm)</i>
EI108/38	36,8	38	16,3	49,1	23,5	23,5	1,7
EI108/45	36,8	45,5	16,3	49,1	23,5	23,5	1,7
EI108/50	36,8	50,5	16,3	49,1	23,5	23,5	1,7
EI108/55	36,8	55,5	16,3	49,1	23,5	23,5	1,7
EI108/60	36,8	60,5	16,3	49,1	23,5	23,5	1,7

Rocchetti per Lamierino Standard 95x114 tipo EI114 con colonna centrale C=38

<i>Lam. Tipo</i>	<i>Cr (mm)</i>	<i>Spr (mm)</i>	<i>M (mm)</i>	<i>H (mm)</i>	<i>I (mm)</i>	<i>L (mm)</i>	<i>S (mm)</i>
EI114/38	38,8	38	18,1	54,5	27	25	1,5
EI114/44	38,8	44	18,1	54,5	27	25	1,5
EI114/50	38,8	50	18,1	54,5	27	25	1,5
EI114/60	38,8	60	18,1	54,5	27	25	1,5
EI114/76	38,8	76	18,1	54,5	27	25	1,5

Rocchetti per Lamierino Standard 100x120 tipo EI120 con colonna centrale C=40

<i>Lam. Tipo</i>	<i>Cr (mm)</i>	<i>Spr (mm)</i>	<i>M (mm)</i>	<i>H (mm)</i>	<i>I (mm)</i>	<i>L (mm)</i>	<i>S (mm)</i>
EI120/30	41	30	18	56	26,5	26,5	1,6
EI120/35	41	35	18	56	26,5	26,5	1,6
EI120/40	41	40	18	56	26,5	26,5	1,6
EI120/45	41	45	18	56	26,5	26,5	1,6
EI120/50	41	50	18	56	26,5	26,5	1,6
EI120/55	41	55	18	56	26,5	26,5	1,6
EI120/60	41	60	18	56	26,5	26,5	1,6
EI120/65	41	65	18	56	26,5	26,5	1,6
EI120/70	41	70	18	56	26,5	26,5	1,6
EI120/80	41	80	18	56	26,5	26,5	1,6

Rocchetti per Lamierino Standard 105x126 tipo EI126 con colonna centrale C=43

<i>Lam. Tipo</i>	<i>Cr (mm)</i>	<i>Spr (mm)</i>	<i>M (mm)</i>	<i>H (mm)</i>	<i>I (mm)</i>	<i>L (mm)</i>	<i>S (mm)</i>
EI126/43	43,1	42	19,2	58,3	28	28	1,6
EI126/50	43,1	50	19,2	58,3	28	28	1,6
EI126/60	43,1	60	19,2	58,3	28	28	1,6
EI126/70	43,1	70	19,2	58,3	28	28	1,6
EI126/80	43,1	80	19,2	58,3	28	28	1,6

Rocchetti per Lamierino Standard 112,5x135 tipo EI135 con colonna centrale C=45

<i>Lam. Tipo</i>	<i>Cr (mm)</i>	<i>Spr (mm)</i>	<i>M (mm)</i>	<i>H (mm)</i>	<i>I (mm)</i>	<i>L (mm)</i>	<i>S (mm)</i>
EI135/45	45,7	45	21,7	63	31,6	28,2	1,8
EI135/60	45,7	60	21,7	63	31,6	28,2	1,8
EI135/90	45,7	90	21,7	63	31,6	28,2	1,8

Rocchetti per Lamierino Standard 125x150 tipo EI150 con colonna centrale C=50

<i>Lam. Tipo</i>	<i>Cr (mm)</i>	<i>Spr (mm)</i>	<i>M (mm)</i>	<i>H (mm)</i>	<i>I (mm)</i>	<i>L (mm)</i>	<i>S (mm)</i>
EI150/50	51	51	22,8	69	35,5	30,5	2
EI150/55	51	55,5	22,8	69	35,5	30,5	2
EI150/60	51	61	22,8	69	35,5	30,5	2
EI150/70	51	71	22,8	69	35,5	30,5	2
EI150/80	51	81	22,8	69	35,5	30,5	2
EI150/90	51	91	22,8	69	35,5	30,5	2
EI150/100	51	101	22,8	69	35,5	30,5	2
EI150/110	51	111	22,8	69	35,5	30,5	2

Rocchetti per Lamierino Standard 150x180 tipo EI180 con colonna centrale C=60

<i>Lam. Tipo</i>	<i>Cr (mm)</i>	<i>Spr (mm)</i>	<i>M (mm)</i>	<i>H (mm)</i>	<i>I (mm)</i>	<i>L (mm)</i>	<i>S (mm)</i>
EI180/60	61	60	28,5	83	42,5	38,5	2,35
EI180/70	61	70	28,5	83	42,5	38,5	2,35
EI180/80	61	80	28,5	83	42,5	38,5	2,35
EI180/90	61	90	28,5	83	42,5	38,5	2,35
EI180/100	61	99,5	28,5	83	42,5	38,5	2,35
EI180/110	61	110	28,5	83	42,5	38,5	2,35
EI180/120	61	119,5	28,5	83	42,5	38,5	2,35

Rocchetti per Lamierino Standard 160x192 tipo EI192 con colonna centrale C=64

<i>Lam. Tipo</i>	<i>Cr (mm)</i>	<i>Spr (mm)</i>	<i>M (mm)</i>	<i>H (mm)</i>	<i>I (mm)</i>	<i>L (mm)</i>	<i>S (mm)</i>
EI192/60	65,5	60	30	89,7			2,3
EI192/64	65,5	64	30	89,8			2,3
EI192/70	65,5	70	30	90			2,2
EI192/80	65,5	80	30	90			2,2
EI192/90	65,5	90	30	90			2,2
EI192/100	65,5	100	30	90			2,2
EI192/110	65,5	110,5	30	89,7			2,2
EI192/120	65,5	120,5	30	89,7			2,2
EI192/130	65,5	130	30	89,7			2,2
EI192/150	65,5	149,5	30	89,7			2,2

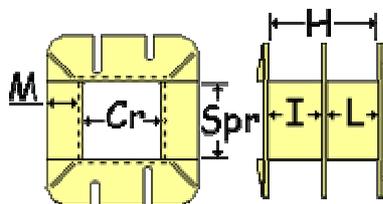
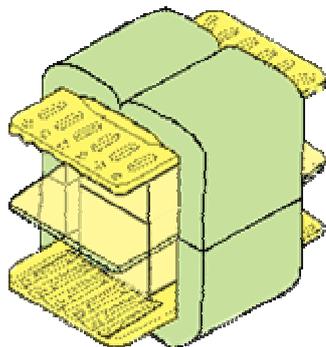
Rocchetti per Lamierino Standard 200x240 tipo EI240 con colonna centrale C=80

<i>Lam. Tipo</i>	<i>Cr (mm)</i>	<i>Spr (mm)</i>	<i>M (mm)</i>	<i>H (mm)</i>	<i>I (mm)</i>	<i>L (mm)</i>	<i>S (mm)</i>
EI240/30	81,5	30	37,8	113	54,5	54,5	2,2
EI240/40	81,4	40	37,8	113	54,5	54,5	2,2
EI240/50	81,5	50	37,8	113	54,5	54,5	2,2

EI240/60	81,5	60	37,8	113	54,5	54,5	2,2
----------	------	----	------	-----	------	------	-----

Tabella dei Rocchetti Plastici più comuni per Trasformatori con nuclei C a un rocchetto

Questa tabella elenca le misure in mm di alcuni degli svariati rocchetti plastici per trasformatori:

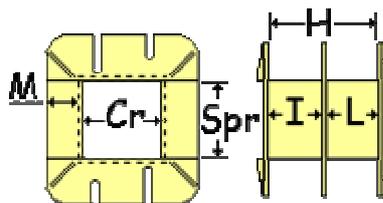
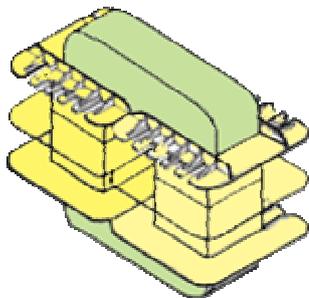


Rocchetti per Lamierino C ad un Rocchetto

Lam. Tipo	Cr (mm)	Spr (mm)	M (mm)	H (mm)	I (mm)	L (mm)	S (mm)
30/12	23	20,5	15	46			1,5
30/16	22,5	26,6	15	46			1,5
30/20	22,5	33,5	15	46			1,5
50/14	28,5	23,5	22	56			2
50/18	29	31	21,5	56			2
50/24	29	39	21,5	56			2
50/32	29	53	21,8	56			2
70/18	35	31	27,5	67,4			2,3
70/24	35	40	27,5	67,4			2,3
70/32	35	53	27,5	67			2,5
90/44	42	72	32,5	81			2,5

Tabella dei Rocchetti Plastici più comuni per Trasformatori con nuclei C a due rocchetti

Questa tabella elenca le misure in mm di alcuni degli svariati rocchetti plastici per trasformatori:

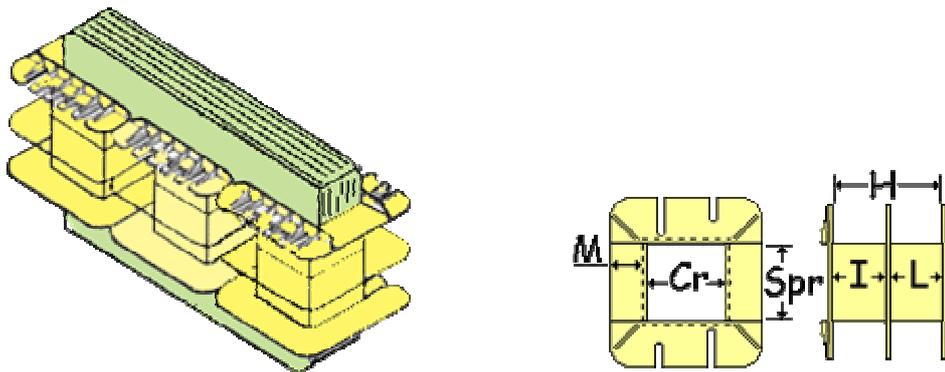


Rocchetti per Lamierino C a due Rocchetto

Lam. Tipo	Cr (mm)	Spr (mm)	M (mm)	H (mm)	I (mm)	L (mm)	S (mm)
SU60B	21	30	9	57			1,4
SU90A	31	30	14	85,5	42	42	1,5
SU90B	31	50	14	85,5	42	42	1,5
SU150A	51	50	23,5	143,6	70,7	70,7	2,2
SU150B	51	80	23,5	143,6	81	60	2,2
SU180B	61	80	28,5	173	88	85	2,5
SU210A	72,2	72	33,7	199,8			4
SU210B	72,2	102	33,7	199,8			4
SU210C	72,2	132	33,7	199,8			4
SU240A	81,7	82	38,9	229			4
SU240B	81,7	110	38,9	229			4
SU240C	81,7	140	38,9	229			4

Tabella dei Rocchetti Plastici più comuni per Trasformatori con nucleo Trifase

Questa tabella elenca le misure in mm di alcuni degli svariati rocchetti plastici per trasformatori:



Rocchetti per Lamierino Trifase 100x100 tipo UI60 con colonna centrale C=20

Lam. Tipo	Cr (mm)	Spr (mm)	M (mm)	H (mm)	I (mm)	L (mm)	S (mm)
UI60/21	20,8	21	9,1	56,6	27,5	27,5	1,2
UI60/30	20,8	30	9,1	56,6	27,5	27,5	1,2
UI60/40	20,8	40	9,1	56,6	27,5	27,5	1,2
UI60/50	20,8	50	9,1	56,6	27,5	27,5	1,2

Rocchetti per Lamierino Trifase 125x125 tipo UI75 con colonna centrale C=25

Lam. Tipo	Cr (mm)	Spr (mm)	M (mm)	H (mm)	I (mm)	L (mm)	S (mm)
UI75/25	26	26	11,8	71,5			1,5
UI75/25	26	31	11,8	71,5			1,5
UI75/25	26	41	11,8	71,5			1,5
UI75/25	26	51	11,8	71,5	35	35	1,5

Rocchetti per Lamierino Trifase 150x150 tipo UI90 con colonna centrale C=30

Lam. Tipo	Cr (mm)	Spr (mm)	M (mm)	H (mm)	I (mm)	L (mm)	S (mm)
UI90/30	31	30	14	85,5	42	42	1,5
UI90/35	31	35	14	85,5	42	42	1,5
UI90/40	31	40	14	85,5	42	42	1,5
UI90/45	31	45	14	85,5	42	42	1,5
UI90/50	31	50	14	85,5	42	42	1,5
UI90/55	31	55	14	85,5	42	42	1,5
UI90/60	31	60	14	85,5	42	42	1,5
UI90/75	31	75	14	85,5	42	42	1,5

Rocchetti per Lamierino Trifase 200x180 tipo UI100 con colonna centrale C=40

Lam. Tipo	Cr (mm)	Spr (mm)	M (mm)	H (mm)	I (mm)	L (mm)	S (mm)
UI100/40	41	40	16	94,5			1,8
UI100/50	41	50	16	94,5			1,8
UI100/60	41	60	16	94,5			1,8
UI100/70	41	70	16	94,5			1,8
UI100/100	41	100	16	94,5			1,8

Rocchetti per Lamierino Trifase 200x200 tipo UI120 con colonna centrale C=40

Lam. Tipo	Cr (mm)	Spr (mm)	M (mm)	H (mm)	I (mm)	L (mm)	S (mm)
UI120/40	41	40	18,5	115,4	58	55,5	1,8
UI120/50	41	50	18,5	115,4	56	54	1,8
UI120/60	41	60	18,5	115,4	58	55,5	1,8
UI120/75	41	75	18,5	115,4	58	55,5	1,8

UI120/80	41	80	18,5	115,4	72	38,5	1,8
----------	----	----	------	-------	----	------	-----

Rocchetti per Lamierino Trifase 250x225 tipo UI125 con colonna centrale C=50

Lam. Tipo	Cr (mm)	Spr (mm)	M (mm)	H (mm)	I (mm)	L (mm)	S (mm)
UI125/50	51	50	23,5	119			2

Rocchetti per Lamierino Trifase 250x250 tipo UI150 con colonna centrale C=50

Lam. Tipo	Cr (mm)	Spr (mm)	M (mm)	H (mm)	I (mm)	L (mm)	S (mm)
UI150/50	51	50	23,5	145,3	70,7	70,7	2
UI150/60	51	60	23,5	145,3	76	65,3	2
UI150/65	51	65	23,5	145,3	76	65,3	2
UI150/70	51	70	23,5	145,3	76	65,3	2
UI150/80	51	80	23,5	145,3	81,6	60	2
UI150/90	51	90	23,5	145,3	76	68,2	2
UI150/100	51	100	23,5	145,3			2

Rocchetti per Lamierino Trifase 270x300 tipo UI180/C con colonna centrale C=60

Lam. Tipo	Cr (mm)	Spr (mm)	M (mm)	H (mm)	I (mm)	L (mm)	S (mm)
UI180C/60	61,5	60	28,3	142,5	91	51	2,2
UI180C/70	61,5	70	28,3	142,5	91	51	2,2
UI180C/80	61,5	80	28,3	142,5	91	51	2,2
UI180C/105	61,5	105	28,3	142,5	91	51	2,2

Rocchetti per Lamierino Trifase 300x300 tipo UI180 con colonna centrale C=60

Lam. Tipo	Cr (mm)	Spr (mm)	M (mm)	H (mm)	I (mm)	L (mm)	S (mm)
UI180/60	61	60	28,5	173	88	85	2,5
UI180/70	61	70	28,5	173	88	85	2,5
UI180/80	61	80	28,5	173	88	85	2,5
UI180/90	61	90	28,5	173	88	85	2,5
UI180/100	61,5	100	28,3	170,5			4
UI180/110	61,5	110	28,3	170,5			4
UI180/120	61,5	120	28,3	170,5			4
UI180/130	61,5	130	28,3	170,5			4
UI180/140	61,5	140	28,3	170,5			4
UI180/150	61,5	150	28,3	170,5			4

Rocchetti per Lamierino Trifase 350x350 tipo UI210 con colonna centrale C=70

Lam. Tipo	Cr (mm)	Spr (mm)	M (mm)	H (mm)	I (mm)	L (mm)	S (mm)
UI210/72	72,2	72	33,7	199,8			4
UI210/80	72,2	80	33,7	199,8			4
UI210/90	72,2	90	33,7	199,8			4
UI210/102	72,2	102	33,7	199,8			4
UI210/110	72,2	110	33,7	199,8			4
UI210/120	72,2	120	33,7	199,8			4
UI210/132	72,2	132	33,7	199,8			4
UI210/140	72,2	140	33,7	199,8			4
UI210/150	72,2	150	33,7	199,8			4

Rocchetti per Lamierino Trifase 400x400 tipo UI240 con colonna centrale C=80

Lam. Tipo	Cr (mm)	Spr (mm)	M (mm)	H (mm)	I (mm)	L (mm)	S (mm)
UI240/82	81,7	82	38,7	229			4
UI240/90	81,7	90	38,7	229			4
UI240/100	81,7	100	38,7	229			4

UI240/110	81,7	110	38,7	229			4
UI240/120	81,7	120	38,7	229			4
UI240/130	81,7	130	38,7	229			4
UI240/140	81,7	140	38,7	229			4
UI240/150	81,7	150	38,7	229			4
UI240/160	81,7	160	38,7	229			4

Rocchetti per Lamierino Trifase 500x500 tipo UI300 con colonna centrale C=100

<i>Lam. Tipo</i>	<i>Cr (mm)</i>	<i>Spr (mm)</i>	<i>M (mm)</i>	<i>H (mm)</i>	<i>I (mm)</i>	<i>L (mm)</i>	<i>S (mm)</i>
UI300/100	102	100	48,5	291			4
UI300/110	102	110	48,5	291			4
UI300/120	102	120	48,5	291			4
UI300/130	102	130	48,5	291			4
UI300/140	102	140	48,5	291			4
UI300/150	102	150	48,5	291			4
UI300/160	102	160	48,5	291			4
UI300/170	102	170	48,5	291			4
UI300/180	102	180	48,5	291			4

Tabella Filo Rame Smaltato per Avvolgimenti di Trasformatori

Diametro Filo Nudo ϕ_N (mm)	Diametro Filo Isolato ϕ_I (mm)	Sezione filo rame nudo S_f (mm ²)	n° di Spire in 1 cm di spazio N_{spcm}	Coefficien. di Riempimento K_f	Resistenza di 1m di filo R_f (Ω)	Peso di 1m di filo di rame P_f (gr/m)
0,05	0,062	0,0020	144,09	1,12	8,9636	0,0175
0,06	0,073	0,0028	122,39	1,12	6,2247	0,0252
0,07	0,083	0,0038	107,66	1,12	4,5733	0,0343
0,08	0,094	0,0050	95,07	1,12	3,5014	0,0447
0,09	0,105	0,0064	85,12	1,12	2,7665	0,0566
0,1	0,116	0,0079	77,05	1,12	2,2409	0,0699
0,11	0,128	0,0095	69,84	1,12	1,8520	0,0846
0,12	0,138	0,0113	64,78	1,12	1,5562	0,1007
0,14	0,167	0,0154	53,54	1,12	1,1433	0,1370
0,16	0,189	0,0201	47,32	1,12	0,8754	0,1789
0,18	0,21	0,0254	42,60	1,12	0,6916	0,2265
0,2	0,23	0,0314	38,90	1,12	0,5602	0,2796
0,22	0,25	0,0380	35,79	1,12	0,4630	0,3383
0,25	0,28	0,0491	31,96	1,12	0,3585	0,4369
0,28	0,32	0,0616	27,98	1,12	0,2858	0,5480
0,3	0,34	0,0707	26,34	1,12	0,2490	0,6291
0,35	0,39	0,0962	22,97	1,12	0,1829	0,8563
0,4	0,45	0,1257	19,91	1,12	0,1401	1,1184
0,45	0,51	0,1590	17,58	1,12	0,1107	1,4155
0,5	0,56	0,1963	16,01	1,12	0,0896	1,7475
0,55	0,61	0,2376	14,71	1,11	0,0741	2,1145
0,6	0,66	0,2827	13,60	1,11	0,0622	2,5164
0,65	0,71	0,3318	12,64	1,11	0,0530	2,9533
0,7	0,76	0,3848	11,81	1,11	0,0457	3,4251
0,8	0,87	0,5027	10,33	1,11	0,0350	4,4736
0,9	0,97	0,6362	9,27	1,11	0,0277	5,6619
1	1,08	0,7854	8,33	1,11	0,0224	6,9900
1,1	1,19	0,9503	7,56	1,11	0,0185	8,4580
1,2	1,29	1,1310	6,98	1,11	0,0156	10,0657
1,4	1,49	1,5394	6,05	1,11	0,0114	13,7005
1,6	1,69	2,0106	5,34	1,11	0,0088	17,8945
1,7	1,9	2,2698	4,75	1,11	0,0078	20,2012
2	2,08	3,1416	4,34	1,11	0,0056	27,9602
2,2	2,29	3,8013	3,95	1,11	0,0046	33,8318
2,5	2,59	4,9087	3,49	1,11	0,0036	43,6878
2,8	2,89	6,1575	3,13	1,10	0,0029	54,8019
3	3,09	7,0686	2,93	1,10	0,0025	62,9104

I conduttori di rame possono avere isolamento semplice, doppio, triplo. La lega di rame può avere diverse caratteristiche rispetto a quelle indicate in tabella che si riferiscono ad: una resistività del rame $\rho = 0,0176 (\Omega \cdot m)$ alla temperatura di 20°C ed un peso specifico $P_{SPEC} = 8,9 (gr \cdot cm^3)$.

Conoscendo la misura del diametro filo nudo ϕ_N e del diametro filo isolato ϕ_I mediante queste formule ricaviamo gli altri parametri caratteristici del filo di rame.

$$K_f = 1,32 + \frac{1}{\left(\frac{\log_{10}(\phi_I + 1)}{\log_e(5)} \right) - 5} \quad \text{coefficiente di riempimento } K_f \text{ del filo rame.}$$

$$N_{spcm} = \frac{10}{\phi_I \cdot K_f} \quad (Sp/cm) \quad \text{n° spire contenute assialmente in 10 millimetri di spazio.}$$

$$S_f = \pi \cdot \left(\frac{\phi_N}{2}\right)^2 \quad (mm^2)$$

Sezione Filo Rame Nudo.

$$R_f = 0,0176 \cdot \frac{l}{S_f} \quad (\Omega)$$

Resistenza di 1 metro di filo di rame ($l = 1$).

$$P_f = 8,9 \cdot l \cdot S_f \quad (gr \cdot m)$$

Peso di 1 metro di filo di rame ($l = 1$).

Grafico Coefficiente di Riempimento Kf

Coefficiente di riempimento K_f del filo rame isolato

$$K_f = 1,32 + \frac{1}{\left(\frac{\log_{10}(\phi_l + 1)}{\log_e(5)}\right)^{-5}}$$

