

## Capitolo 8 Alimentatori

Nel presente capitolo si prendono in esame le modalità di progettazione degli alimentatori e con essi i trasformatori d'alimentazione di media potenza i circuiti di rettificazione e i filtri d'uscita ad essi associati. Gli alimentatori, oggetto di questo capitolo, sono progettati esclusivamente per essere collegati a reti di energia elettrica a 50, 60 o 400 Hz.

Alcuni di questi dispositivi, con caratteristiche standard, si trovano in commercio e possono soddisfare le prime esigenze nella fase di sperimentazione dei circuiti elettronici analogici, destinati alla costruzione di un' apparecchiatura.

Nella fase successiva di realizzazione di detta apparecchiatura, il più delle volte i prodotti commerciali risultano, elettricamente sovradimensionati o sottodimensionati, o, meccanicamente, troppo ingombranti, non consentendo un impiego corretto nel contesto dell'apparecchiatura finale. Nasce da qui la necessità di progettare a misura l'alimentatore più adatto all'impiego del momento, affinché questo possa dare le migliori garanzie di funzionalità e adattabilità.

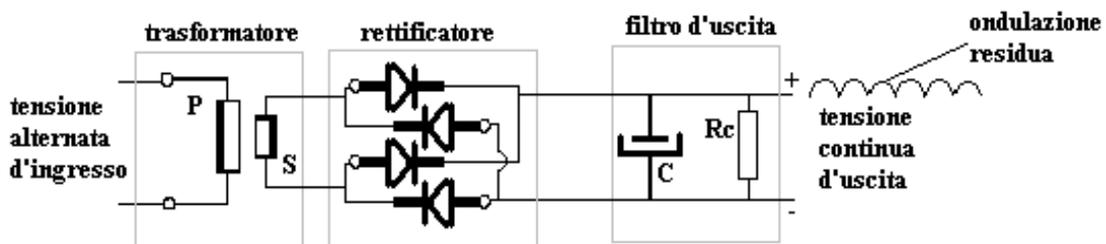
### 8.1 Struttura di un alimentatore monofase

Un alimentatore monofase ha una struttura composta da tre blocchi quali:

- trasformatore
- gruppo rettificatore
- filtro d'uscita

così come riportato in figura 8.1

figura 8.1



Le funzioni svolte da ciascun blocco sono:

-il trasformatore trasferisce al circuito rettificatore la tensione alternata, richiesta affinché sul carico  $R_c$  sia disponibile la tensione continua prevista.

-il rettificatore a ponte provvede al passaggio dei semiperiodi positivi e negativi (rettificazione ad onda intera) della tensione alternata, indirizzandoli rispettivamente ai terminali “+” e “-” dell'uscita dell'alimentatore.

-il filtro capacitivo d'uscita ha il compito di mediare i semiperiodi di tensione provenienti dal rettificatore per ottenere la tensione continua sul carico: il filtro è composto dal condensatore  $C$  e dalla resistenza  $R_c$ , che rappresenta, simbolicamente, tutto il carico collegato all'alimentatore.

Un alimentatore può essere formato, sia come indicato nello schema (fornisce una sola tensione d'uscita), sia da un unico trasformatore a più secondari, ai capi dei quali sono collegati altrettanti blocchi di rettificazione e filtraggio (fornisce molteplici tensioni d'uscita).

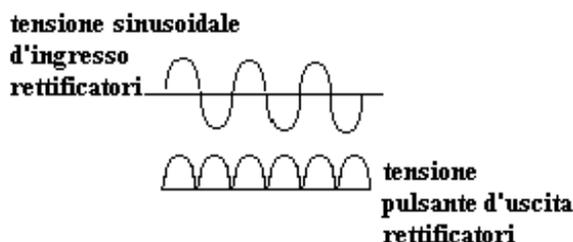
Ciascuna delle funzioni dell'alimentatore deve essere progettata, secondo particolari criteri, mediante l'impiego di un certo numero di variabili che andiamo di seguito ad elencare partendo dall'ultimo blocco:

#### Filtro d'uscita

Il filtro d'uscita riceve dal rettificatore la tensione “pulsante” a doppia semionda, il cui andamento è mostrato in figura 8.2; nella figura è tracciata, in basso, la tensione pulsante, e, in alto, la tensione sinusoidale all'ingresso al rettificatore. La frequenza degli impulsi positivi provenienti dal

rettificatore è il doppio della frequenza della tensione applicata al primario del trasformatore dato che, ad ogni periodo della tensione alternata, si hanno in uscita dal rettificatore a ponte due impulsi di mezza senoide.

figura 8.2



Il compito del filtro è di mediare tra gli impulsi che si susseguono nel tempo, in modo da colmare i minimi di tensione con i massimi ottenendo una tensione continua affetta da una ondulazione più piccola possibile.

I componenti del filtro d'uscita, in tutte le procedure di progetto che seguiremo, dovranno sempre soddisfare la seguente disuguaglianza:

$$2 * \pi * f * C * R_c \geq 100$$

nella quale

f = frequenza ( in Hz) della tensione alternata applicata al primario

C = capacità in Farad del condensatore di filtro

Rc = resistenza di carico dell'alimentatore espressa in ohm

La verifica della disuguaglianza farà sì che l'ondulazione residua d'uscita (Vond), avente una frequenza pari al doppio della frequenza di rete ( 2 \* f ), evidenziata in modo abnorme in figura 8.1, sarà sempre dell'ordine del 1 % della tensione continua d'uscita.

### **Rettificatore**

I quattro diodi del rettificatore dovranno essere dimensionati in modo da avere:

$$I_p < I_f \quad e \quad V_p < V_r$$

dove

I<sub>p</sub> = corrente di picco della tensione alternata applicata

I<sub>f</sub> = Corrente massima di lavoro del diodo

V<sub>p</sub> = Tensione alternata di picco applicata

V<sub>r</sub> = Tensione massima di picco di inversa del diodo

Dovrà inoltre essere presa in considerazione la tensione di conduzione V<sub>g</sub>, ai capi della giunzione, in funzione della corrente I<sub>p</sub>, in modo da valutare le cadute di tensione ai capi dei diodi.

### **Trasformatore**

Le variabili che entrano in gioco per il progetto del trasformatore sono molteplici, vediamole di seguito secondo l'ordine d'impiego richiesto dai calcoli:

V<sub>pe</sub> = tensione applicata al primario ( in volt efficaci)

W<sub>cc</sub> = potenza in corrente continua richiesta dal carico ( in Watt )

$W_p$  = potenza dovuta alle perdite nel trasformatore ( in Watt )  
 $W_t$  = potenza totale richiesta dal trasformatore alla rete d'alimentazione ( in Watt )  
 $B$  = induzione magnetica scelta per il nucleo di ferro ( in Gauss)  
 $S_f$  = sezione del nucleo di ferro ( in cmq)  
 $P_f$  = perdite nel ferro ( in Watt)  
 $K_r$  = coefficiente di riempimento del rocchetto d'avvolgimento del filo (numero puro)  
 $N_p$  = numero delle spire del primario  
 $D_p$  = diametro del conduttore utilizzato nel primario ( in mm)  
 $S_l$  = sezione lorda del rocchetto  
 $S_n$  = sezione netta del rocchetto  
 $S_{ap}$  = sezione netta dell'avvolgimento del primario (in cmq)  
 $S_{me}$  = lunghezza della spira media del primario  
 $R_{fp}$  = resistenza del filo su primario ( in ohm/metro)  
 $R_{fs}$  = resistenza del filo su secondario( in ohm/metro)  
 $R_s$  = resistenza equivalente del primario (in ohm)  
 $R_c$  = resistenza complessiva del carico applicato al trasformatore ( in ohm)  
 $E_{dc}$  = tensione continua ai capi del carico ( in volt )  
 $V_{dd}$  = caduta di tensione ai capi di due diodi  
 $V_{rp}$  = tensione di picco all'ingresso del rettificatore  
 $V_{es}$  = tensione efficace fornita dal secondario  
 $E_p$  = tensione di picco della tensione all'uscita del rettificatore ( in volt)  
 $X_{gr} = ( W_{cc} * R_s ) / ( 2 * V_{pe}^2 )$  variabile per l'impiego del diagramma di calcolo di  $R_s/R_c$  e  $E_{dc}/E_{picco}$   
 $N_{s1}; N_{s2}; .. N_{sn}$  = numero delle spire dei secondari  
 $D_{s1}; D_{s2}; ... D_{sn}$  = diametro dei conduttori utilizzati nei secondari ( in mm)  
 $\Delta t$  = incremento di temperatura del trasformatore ( in gradi centigradi)

## 8.2 Esempio di calcolo del filtro capacitivo

Iniziamo l'esame dei blocchi funzionali dell'alimentatore con un esempio di calcolo del filtro capacitivo. Dato che si deve stabilire quale valore assegnare a C, una volta fissato il valore di  $R_c$ , è più comodo scrivere la disuguaglianza riportata nel paragrafo precedente in una forma diversa:

$$C \geq 100 / ( 2 * \pi * f * R_c )$$

Con questa nuova disuguaglianza eseguiamo l'esercizio:

### ***Dati di base:***

Sia da dimensionare il valore di C, per un filtro capacitivo, da collegare all'uscita di un raddrizzatore a doppia semionda che deve fornire sul carico una tensione di 24 Vcc con una corrente di 0.2 Ac.c. Il primario del trasformatore è alimentato alla frequenza di 60 Hz. La temperatura ambiente potrà raggiungere il valore massimo di 40°.

### ***Dimensionamento di C:***

Per l'applicazione della nuova disuguaglianza dobbiamo anzitutto calcolare il valore di quella che sarà la resistenza di carico  $R_c$ , sulla base della tensione e della corrente richieste:

$$R_c = 24 V_{cc} / 0.2 A = 120 \text{ ohm}$$

Quindi 
$$C \geq 100 / ( 2 * 3.14 * 60 \text{ Hz} * 120 \text{ ohm} ) = 2211 \mu\text{Farad}$$

Un valore standard di C > di 2211  $\mu\text{Farad}$  è individuabile in 2400  $\mu\text{Farad}$ .

### **Caratteristiche del condensatore:**

I condensatori di filtro, date le loro grandi capacità, devono essere necessariamente del tipo elettrolitico. Per questo tipo di condensatori sono accettate tolleranze del +50% ; - 10% sui valori di della capacità date a catalogo.

Si deve porre attenzione nella scelta della tensione di lavoro VL in corrente continua, che deve essere almeno il 20% superiore alla tensione applicata. Nel nostro caso avremo

$$V_L = 24V_{cc} * 1.2 \approx 30 \text{ V}$$

Il condensatore deve poter sopportare la corrente alternata Ico dovuta alla presenza dell'ondulazione d'uscita Vond: tale corrente si calcola mediante l'espressione:

$$I_{co} = V_{ond} * 4 * \pi * f * C * 1.1$$

essendo

$$V_{ond} = 1 \% \text{ di } V_{cc} = 24 V_{cc} * 1 / 100 = 0.24V_{ca}$$

$$f = 60 \text{ Hz}$$

si ha

$$I_{co} = 0.24V_{ca} * 4 * 3.14 * 60 \text{ Hz} * 2400 \mu\text{F} * 1.1 = 0.47 \text{ A}$$

Riassunto delle caratteristiche del condensatore:

Capacità C = 2400  $\mu\text{F}$  +50%; - 10 %

Tensione di lavoro VL = 30Vc.c.

Corrente di ondulazione Ico >> 0.47 A c.a.

Temperatura di lavoro T > 40 °

### **Osservazioni:**

-Dall'esempio si vede come il valore di C, per altri alimentatori, dovrà essere tanto più grande quanto sarà maggiore la potenza erogata al carico.

-Se un alimentatore è progettato per fornire più di una tensione continua, per ciascun blocco di filtro deve essere computato il proprio condensatore sulla scorta dei dati della potenza richiesta.

-Se un alimentatore è progettato per fornire in uscita tensioni continue superiori a 45 V, è necessario adottare alcuni criteri di sicurezza per evitare che, accidentalmente, tali tensioni possano venire a contatto con le persone provocando serie conseguenze.

Si deve tener presente che la tensione continua provoca, a contatto, la formazione di archi voltaici molto pericolosi.

Dato che un alimentatore può essere scollegato dall'utilizzatore, è facile che il condensatore di filtro resti carico anche quando l'alimentatore è stato spento. Questa condizione è oltremodo rischiosa perché a volte, certi che l'alimentatore è stato smorzato, si mettono le mani all'interno con le conseguenze sopra esposte.

Per evitare tali rischi è necessario collegare, in permanenza, un resistore di scarica ( Rsc) in parallelo al condensatore in modo tale che, una volta spento l'alimentatore, in pochi secondi il condensatore si scarichi sulla resistenza di sicurezza passando, in pochi secondi, dal valore di tensione Vcc al valore di sicurezza Vsic. Vediamo come calcolare il valore Rsc nel caso in cui si abbia, ad esempio, un condensatore da 4700  $\mu\text{F}$  caricato con una tensione di 60 Vc.c.:

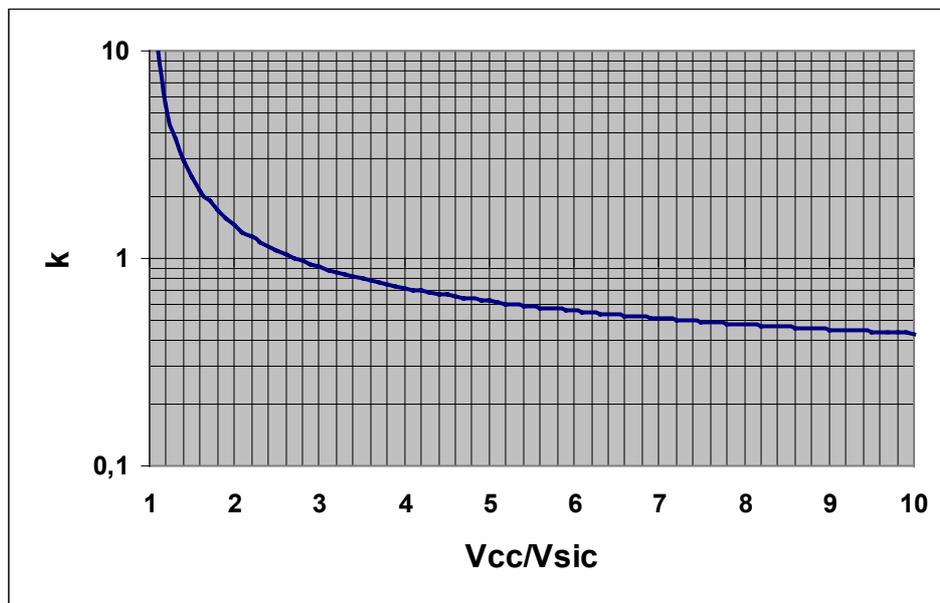
Se vogliamo che il condensatore si scarichi a livelli di tensione non pericolosi entro 5 Sec. , passando da  $V_{cc} = 60V$  a  $V_{sic} = 30 V$ , dobbiamo porre una resistenza che soddisfi alla relazione:

$$R_{sc} = 10^6 * k * t / C$$

dove  $R_{sc}$  è espressa in ohm , t in secondi e C in microFarad

k si ricava dal diagramma di figura 8.3 secondo la seguente procedura:

figura 8.3



si calcola rapporto  $V_{cc}/V_{sic} = 60 V_{cc} / 30 V_{cc} = 2$  , per tale ascissa si determina, in base alla curva, l'ordinata corrispondente:  $k \approx 1.5$ .

Ora non resta che applicare la formula per il calcolo di  $R_{sc}$  per  $t = 5$  Sec e  $C = 4700 \mu F$  e  $k = 1.5$ :

$$R_{sc} = 10^6 k * t / C = 10^6 * 1.5 * 5 \text{ Sec.} / 4700 \mu F = 1595 \text{ ohm (arrotondabile a } 1500 \text{ ohm)}$$

Detta resistenza dovrà poter dissipare una potenza di:

$$W_{rsc} = (60 V_{cc})^2 / R_{sc} = 3600 / 1500 \text{ ohm} = 2.4 \text{ W (da arrotondare per sicurezza a } 5 \text{ W)}$$

Naturalmente se il valore di  $W_{rsc}$  sarà sensibile rispetto alla potenza fornita dall'alimentatore, quest'ultimo dovrà essere sovradimensionato per sopperire a questo ulteriore consumo.

### 8.3 Esempio di calcolo del rettificatore

Proseguiamo l'esame dei blocchi funzionali dell'alimentatore con un esempio di calcolo del rettificatore di potenza.

In questo tipo di alimentatore si preferisce impiegare il rettificatore a ponte per consentire la costruzione del trasformatore con secondari privi della presa intermedia ; ciò implica l'utilizzo di quattro diodi di potenza collegati secondo lo schema di figura 8.1.

Si tenga presente che in commercio si trovano numerosi componenti che racchiudono in un unico contenitore il ponte di diodi già formato, che può sostituire vantaggiosamente i quattro diodi singoli. Un esercizio per la selezione dei diodi mostrerà tutte le problematiche relative a questo componente:

#### ***Dati di base:***

Si debba costruire un ponte di rettificazione a diodi per un alimentatore il cui carico richiede 50 Vcc e 0.5A; il ponte deve lavorare ad una temperatura ambiente di 50°.

Si valuti la caduta di tensione sui diodi per tenerne di conto nella fase di progetto del trasformatore.

#### ***Valutazione della corrente di picco massima:***

Supponiamo che, a seguito di valutazioni sulle caratteristiche del trasformatore e del carico ( questa procedura sarà vista nel contesto del calcolo del trasformatore), la corrente di picco massima che scorre nei diodi risulti 1.2 volte la corrente richiesta dal carico, cioè:

$$I_p = 1.2 * 0.5A = 0.6 A$$

I diodi che andremo a selezionare dovranno avere una corrente  $I_f$  superiore ad  $I_p$ .

#### ***Valutazione della tensione inversa massima:***

Supponiamo che la tensione di picco massima applicata ai diodi sia superiore del 20% della tensione richiesta dal carico, cioè:

$$V_p = 1.2 * 50V_{cc} = 60 V_p$$

I diodi che andremo a selezionare dovranno avere una tensione inversa superiore a 60V.

#### ***Selezione del tipo dei diodi:***

Sulla base della corrente  $I_p$  e della tensione  $V_p$  si può scegliere il tipo di diodo necessario per la formazione del rettificatore a ponte:

sulla base della corrente  $I_p = 0.6A$  e della tensione  $V_p = 60 V$ , si sceglie a catalogo il diodo 1N4002, in contenitore plastico e terminali a saldare, presenta le seguenti caratteristiche:

$$\begin{aligned} I_f &= 1 A > I_p \\ V_r &= 100 V > V_p \end{aligned}$$

#### ***Calcolo della caduta di tensione ai capi dei diodi:***

La valutazione della caduta di tensione è richiesta dai dati di base per il successivo calcolo del trasformatore.

Il diodo presenta una  $V_f$  tipica di 0.9 V a 0.6 A, ne consegue che nel progetto del trasformatore dovrà tenersi conto di una caduta di tensione di

$$2 * 0.9 V = 1.8 V$$

( perdita dovuta a due diodi, dei quattro, durante il loro semiperiodo di conduzione).

**Considerazioni relative alla temperatura:**

La dissipazione  $W_d$  di un diodo durante le fasi di conduzione si può assimilare, per semplicità e per sicurezza, pari al prodotto della  $V_f$  per la corrente di picco  $I_p$ , valutata per la metà del tempo, dato che i diodi conducono a turno per i relativi semiperiodi, nel nostro caso quindi possiamo scrivere:

$$W_d = V_f * I_f / 2$$

dalla quale  $W_d = 0.9 \text{ V} * 0.6 \text{ A} / 2 = 0.27 \text{ W}$

La massima potenza elettrica che un diodo con terminali a filo può dissipare è data dalla relazione:

$$P = (T_j - T_a) / (\theta_{jLa} + \theta_{jLk} + \theta_{jHS})$$

dove

$\theta_{jLa}$  = resistenza termica tra anodo e terminale in °C/w

$\theta_{jLk}$  = resistenza termica tra catodo e terminale in °C/w

$\theta_{jHS}$  = resistenza termica terminali e punti di fissaggio –saldature- in °C/w

$T_j$  = temperatura massima della giunzione in °C

Il catalogo del diodo selezionato indica le seguenti caratteristiche termiche per il diodo 1N4002:

$\theta_{jLa} = 100^\circ \text{ C/w}$

$\theta_{jLk} = 100^\circ \text{ C/w}$

$\theta_{jHS} = 35^\circ \text{ C/w}$  per terminali della lunghezza di circa 12 mm saldati su C.S.

$T_j = 175^\circ$

Con i dati del costruttore e con l'indicazione della temperatura ambiente ( $T_a$ ), fornita nei dati di base, possiamo verificare, con la formula sopra riportata, se il diodo è in grado di dissipare la potenza  $W_d$  calcolata:

$$P = (T_j - T_a) / (\theta_{jLa} + \theta_{jLk} + \theta_{jHS}) = (175^\circ - 50^\circ) / (100^\circ\text{C/w} + 100^\circ\text{C/w} + 50^\circ\text{C/w}) = 0.5 \text{ W}$$

essendo  $P > W_d$  il componente è adatto a dissipare la potenza  $W_d$ .

**Osservazioni:**

Nelle valutazioni sulle caratteristiche di un diodo rettificatore di potenza è di notevole importanza l'esame della dissipazione che, se non attentamente stimata, può provocare la distruzione del componente. Nell'esempio svolto i calcoli hanno mostrato un notevole margine tra la potenza da dissipare  $W_d = 0.22 \text{ W}$  e la capacità di dissipazione del diodo che risulta di  $0.5 \text{ W}$ ; se il calcolo avesse invece portato ad una condizione opposta, ovvero  $P < W_d$ , avremmo dovuto cercare un diodo, forse ancora in contenitore plastico, dalle caratteristiche termiche adatte a sostenere la potenza da dissipare.

Qualora, per ragioni legate alla potenza da smaltire sul diodo, la scelta del semiconduttore dovesse orientarsi sui tipi a contenitore metallico e fissaggio con dado, il calcolo della dissipazione dovrebbe essere sviluppato con le formule già riportate per la dissipazione dei transistori nel paragrafo 3.13.

#### 8.4 Esempio di calcolo del trasformatore

Terminiamo l'esame dei blocchi funzionali dell'alimentatore con un esempio di calcolo del trasformatore di potenza.

Il progetto di questo blocco è il più elaborato dei tre e richiede l'impiego di tabelle, curve e dati caratteristici dei nuclei di ferro che costituiscono la base sulla quale viene dimensionato il trasformatore.

Questi trasformatori saranno sempre collegati a reti di energia elettrica a 50, 60 o 400 Hz e, pertanto, saranno costruiti con nuclei di ferro al silicio; è utile ricordare che i "piccoli trasformatori", invece, dato l'ampio campo di frequenze applicato, sono costruiti con nuclei in ferrite (si veda paragrafo 1.5).

La scelta del nucleo, che segue immediatamente l'esame della potenza richiesta dal carico o dai carichi, non sempre deve essere fatta in base a detta potenza; in alcuni casi, infatti, si può scegliere il nucleo di dimensioni maggiori del necessario per le seguenti ed altre ragioni:

- Si vuole ridurre l'ingombro degli avvolgimenti dei conduttori di rame per ridurre la resistenza ohmica.
- Si desidera ridurre i flussi magnetici dispersi dal nucleo contenendone l'induzione.
- Sono necessari particolari valori d'isolamento tra gli avvolgimenti che richiedono più spazio del normale nel rocchetto dell'avvolgimento.
- Si devono costruire particolari accoppiamenti tra primario e secondari che richiedono il sezionamento del rocchetto d'avvolgimento in un gruppo di sub rocchetti.
- Si devono realizzare schermature elettrostatiche ingombranti tra primario e secondari.
- Si è decisa una standardizzazione delle dimensioni dei nuclei per poter fare acquisti più facili adattandosi alle disponibilità del mercato.

Al di là delle ragioni esposte, c'è sempre un motivo fondamentale che vincola la scelta del nucleo:

l'impossibilità di trovarne sul mercato esattamente corrispondenti alla potenza da trasformare; la scelta, quindi, sarà frutto di ragionevoli compromessi.

Ciò premesso, iniziamo questo esempio cominciando dall'impostazione dei dati caratteristici di base:

##### ***Dati di base:***

Sia da progettare un trasformatore con il primario da collegare alla tensione alternata  $V_{pe} = 220 V_{eff}$ , 50 Hz. Sia richiesta sul carico una tensione  $V_c$  di 26Vcc ed una corrente  $I_c$  di 1.9 A.

Al fine di ridurre il campo magnetico disperso, ad evitare interferenze con circuiti vicini all'alimentatore, si tenga il valore dell'induzione  $B = 15000$  Gauss.

##### ***Calcolo delle potenze:***

**Potenza richiesta da carico:**

$$W_{cc} = V_c * I_c$$

Essendo  $V_c = 26 V_{cc}$ ,  $I_c = 1.9 A$  si ha:

$$W_{cc} = 26 V_{cc} * 1.9 A = 49.4 w$$

**Potenza richiesta dal primario:**

Nel progetto di trasformatori di media potenza si assume, generalmente, un rendimento  $\epsilon = 80 \%$ ; ciò significa che il primario richiederà dalla rete più potenza ( $W_t$ ) di quanto non ne venga fornita al carico. Si deve quindi scrivere:

$$W_t = 1.2 * W_{cc}$$

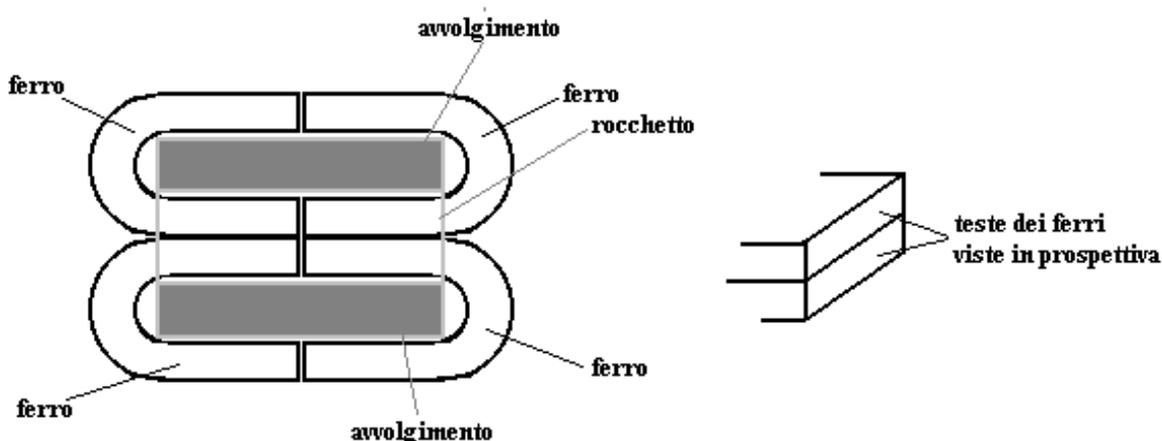
Essendo  $W_{cc} = 49.4 W$  abbiamo:

$$W_t = 1.2 * 49.4W \approx 59 w$$

### Scelta del nucleo di ferro e dell'induzione:

La scelta del nucleo del trasformatore può essere fatta su doppie coppie di ferri al silicio con grani orientati, aventi forme ad U da utilizzare come indicato in figura 8.4.

figura 8.4



La parte sinistra della figura mostra, in sezione longitudinale, la doppia coppia di ferri ad U affacciati l'un l'altro, il rocchetto sul quale avvolgere il primario e il secondario (in tinta grigio chiaro), gli avvolgimenti in filo di rame (in tinta grigio scuro).

La parte destra della figura mostra, in prospettiva, le teste dei ferri la cui superficie è indicata come sezione ( $S_f$ ) del nucleo espressa in cmq.

La scelta delle dimensioni del nucleo deve essere fatta in funzione della potenza elettrica totale richiesta ( $W_t$ ) dall'elenco dei ferri disponibili; supponiamo che l'elenco sia quello sotto riportato, per ferri che possono lavorare con un'induzione massima di  $B = 17000$  Gauss:

Sigla costruttore del tipo di nucleo	Potenza massima W	Sezione cmq	Perdite nel ferro W
T13	41	2.42	0.66
T19	60	3.54	0.98
T25	75	4.66	1.28
T32	95	5.96	1.64

Nell'elenco non troviamo un nucleo con una potenza uguale a quella calcolata di  $W_t = 59$  W, ma uno prossimo a tale valore ( il tipo T19 ) che ha una sezione di 3.54 cmq; la scelta potrebbe cadere su questo ma, data la richiesta dei dati di base di tenere l'induzione  $B = 15000$  Gauss, si sceglie il tipo T25 che, avendo una sezione  $S_f$  superiore al precedente, consente di adottare valori d'induzione inferiori rispetto all'impiego del tipo T19; infatti è possibile tenere più bassa l'induzione, non aumentando il numero delle spire (quindi non incrementando le resistenze di perdita negli avvolgimenti), aumentando in proporzione la sezione del nucleo.

Per un nucleo di queste dimensioni il fornitore indica la sezione (  $S_l$  ) lorda del rocchetto sul quale avvolgere primari e secondari :  $S_l = 828 \text{ mmq}$

Possiamo quindi concludere con l'indicazione dei dati acquisiti:

-Nucleo tipo T25

-Sezione  $S_f = 4.66 \text{ cmq}$

-Induzione  $B = 15000 \text{ Gauss}$

-Sezione lorda del rocchetto  $S_l = 828 \text{ mmq}$

### **Calcolo delle caratteristiche dell'avvolgimento primario:**

#### **Numero spire primario:**

Il calcolo del numero delle spire (  $N_p$  ) del primario si esegue con la formula sotto riportata:

$$N_p = V_{pe} * 10^8 / ( 4.44 * B * f * S_f )$$

dove

$V_{pe}$  in  $V_{eff}$

$B$  in Gauss

$f$  in Hertz

$S_f$  in  $\text{cmq}$

Essendo  $V_{pe} = 220 \text{ V}_{eff}$ ,  $B = 15000 \text{ Gauss}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $S_f = 4.66 \text{ cmq}$  abbiamo::

$$N_p = 220 \text{ V}_{eff} * 10^8 / ( 4.44 * 15000 * 50 \text{ Hz} * 4.66 \text{ cmq} ) \approx 1418 \text{ spire}$$

#### **Sezione netta del rocchetto:**

Per tener conto del fatto che il filo degli avvolgimenti occupa più spazio sul rocchetto di quello corrispondente alla propria sezione, che tra gli strati degli avvolgimenti deve essere interposta, per sicurezza, della carta isolante, che gli avvolgimenti non possono occupare tutta la superficie d'avvolgimento, l'esperienza suggerisce di ridurre a calcolo la sezione lorda, indicata dal costruttore, secondo adatto coefficiente di riempimento.

Assumendo come coefficiente di riempimento (  $k_r = 0.35$  ), valore consolidato per trasformatori di piccole dimensioni, si calcola la sezione netta (  $S_n$  ) disponibile sul rocchetto:

$$S_n = K_r * S_l$$

Essendo  $K_r = 0.35$ ,  $S_l = 828 \text{ cmq}$ , abbiamo:

$$S_n = 0.35 * 828 \text{ mmq} = 289 \text{ mmq}$$

#### **Sezione netta dedicata al primario:**

E' buona norma assegnare la sezione netta disponibile per metà al primario e per l'altra metà ai secondari, abbiamo perciò che la sezione netta del primario sarà :

$$S_{ap} = S_n / 2$$

Essendo  $S_{ap} = 289 \text{ mmq}$  abbiamo:

$$S_{ap} = 289 \text{ mmq} / 2 \approx 145 \text{ mmq}$$

**Diametro del filo per l'avvolgimento del primario:**

Il diametro del filo per l'avvolgimento del primario si calcola con la formula:

$$D_p = 2 * \sqrt{[S_{ap} / (N_p * \pi)]}$$

Essendo  $S_{ap} = 145 \text{ mm}^2$ ,  $N_p = 1418$  spire abbiamo:

$$D_p = 2 * \sqrt{[145 \text{ mm}^2 / (1418 * 3.14)]} = 0.36 \text{ mm} \text{ (da arrotondare a } 0.35 \text{ mm)}$$

**Lunghezza della spira media:**

Il calcolo della lunghezza della spira media è necessario per le successive computazione delle resistenze degli avvolgimenti:

Dalle dimensioni del rocchetto date dal costruttore, facendo la media tra il perimetro della parte inferiore e della parte superiore si ha :

$$S_{me} \approx 15 \text{ cm} = 0.15 \text{ m}$$

**Calcolo dei parametri di progetto per l'avvolgimento secondario :**

I parametri di progetto per l'avvolgimento secondario prevedono nell'ordine il calcolo di:

**Resistenza equivalente degli avvolgimenti:**

La resistenza equivalente ( $R_s$ ) degli avvolgimenti si calcola come se il trasformatore avesse, invece di un primario e i secondari, due avvolgimenti uguali al primario; detta resistenza si computa con la formula:

$$R_s = 2 * S_{me} * N_p * R_{fp}$$

dove  $R_{fp}$  è la resistenza del filo del primario espressa in ohm / metro

$R_{fp}$  si ricava, o dalle tabelle del costruttore del filo, o da una misura eseguita su di uno spezzone di conduttore di alcuni metri; nel nostro caso, per filo del diametro di 3.5 decimi di millimetro, si ha  $R_{fp} = 0.19 \text{ ohm/metro}$ ; con questo dato si calcola infine  $R_s$ .

Essendo  $S_{me} = 0.15 \text{ m}$ ,  $N_s = 1418$  spire,  $R_{fp} = 0.19 \text{ ohm/metro}$ , abbiamo:

$$R_s = 2 * S_{me} * N_p * R_f = 2 * 0.15 \text{ m} * 1418 \text{ spire} * 0.19 \text{ ohm/m} \approx 80 \text{ ohm}$$

**Determinazione del rapporto  $E_{dc}/E_p$ :**

Per il calcolo degli avvolgimenti secondari è necessario conoscere, in base al valore di  $R_s$ , quale rapporto ( $E_{dc}/E_p$ ) si riesce ad ottenere tra la tensione continua, che si vuole ottenere sul carico, dopo il rettificatore, e il picco della tensione alternata disponibile sui secondari.

Per semplificare la determinazione di detto rapporto, invece di formule complicate, è utile l'impiego di un diagramma universale con il quale, in funzione di una variabile ( $X_{gr}$ ), facile da calcolare, si ottengono i valori cercati.

La variabile  $X_{gr}$ , da utilizzare per la determinazione del rapporto  $E_{dc}/E_p$ , è calcolabile con la formula:

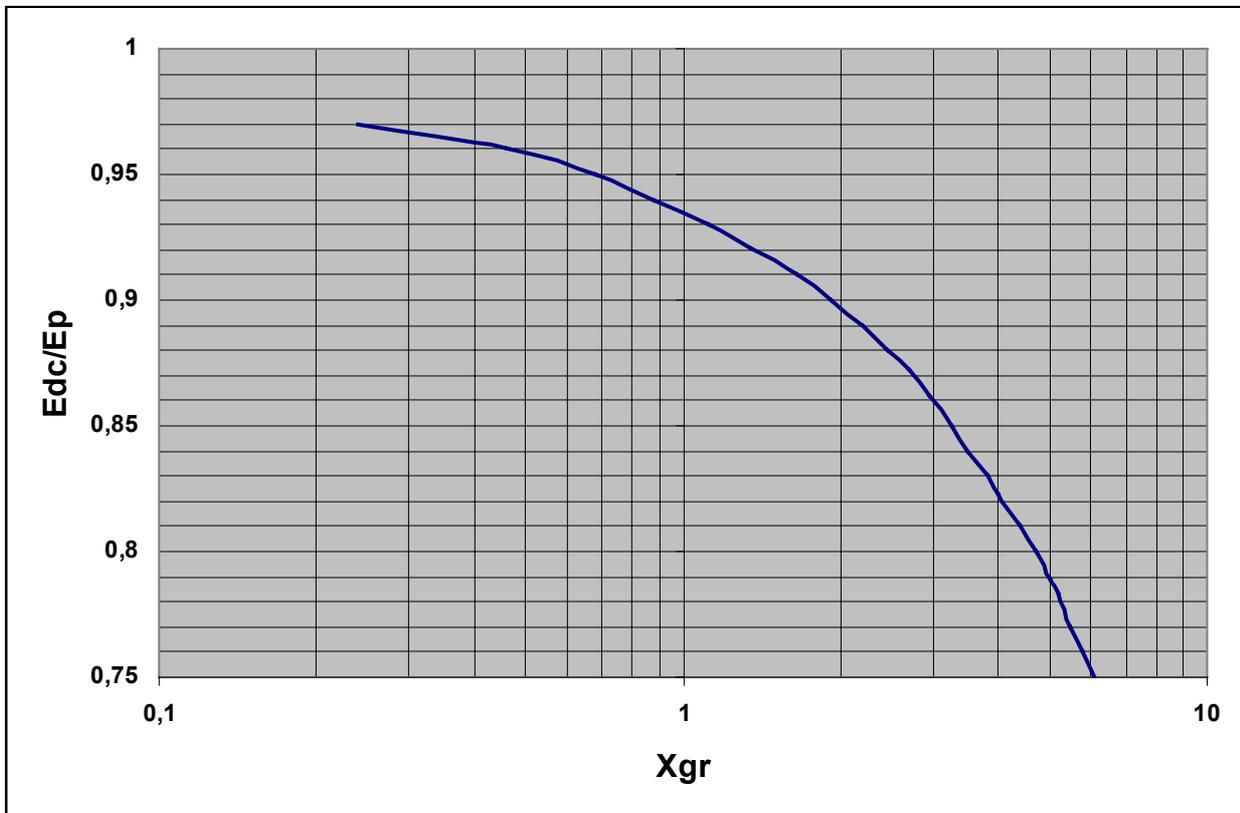
$$X_{gr} = 100 * (W_{cc} * R_s) / (2 * V_{pe}^2)$$

Essendo  $W_{cc} = 49.4 \text{ W}$ ,  $R_s = 80 \text{ ohm}$ ,  $V_{pe} = 220 \text{ V}_{eff}$ , abbiamo:

$$X_{gr} = 100 * (49.4 \text{ W} * 80 \text{ ohm}) / (2 * 220 \text{ V}_{eff}^2) = 4.08$$

Il diagramma al quale abbiamo fatto cenno per la determinazione del rapporto  $E_{dc}/E_p$  è riportato in figura 8.5; ponendo in ascisse il valore di  $X_{gr} = 4.08$  ed alzando la perpendicolare ad intercettare la curva, si ottiene, sulle ordinate, il valore cercato del rapporto  $E_{dc}/E_p = 0.816$ .

figura 8.5



**Osservazioni sul diagramma di figura 8.5:**

Al passo precedente abbiamo impiegato il diagramma di figura 8.5 per la determinazione del rapporto  $E_{dc}/E_p$ ; questa procedura, intimamente legata alle caratteristiche degli alimentatori che impiegano il filtro capacitivo, è applicabile sempre che il valore di  $R_s$  non sia troppo elevato e che di conseguenza il valore di  $X_{gr}$  sia  $X_{gr} < 6$ , ovvero che  $E_{dc}/E_p$  sia  $E_{dc}/E_p > 0.75$ . Qualora queste condizioni non siano verificabili, si può, se indispensabile, estrapolare i dati dal diagramma; meglio ancora sarebbe però cambiare alcuni parametri di progetto, come ad esempio aumentare la sezione del ferro o ridurre la potenza da fornire per riportare  $X_{gr}$  a valori inferiori a 6.

**Calcolo delle caratteristiche del secondario:**

Per il calcolo delle caratteristiche del secondario s’inizia valutando la tensione di picco ( $V_{rp}$ ) che deve essere applicata al rettificatore, detta tensione sarà la somma della tensione continua voluta sul carico più la tensione ( $V_{dd}$ ) che cade ai capi di due diodi, cioè:

$$V_{rp} = V_c + V_{dd}$$

**Calcolo di  $V_{rp}$ :**

Se ipotizziamo che un diodo, sottoposto alla corrente richiesta dal carico, abbia una  $V_r = 0.8 V$ , i due diodi che conducono nei diversi semiperiodi hanno una caduta di tensione  $V_{dd}$  pari a

$$V_{dd} = 2 * V_r$$

$$V_{dd} = 2 * 0.8 = 1.6 \text{ V}$$

Essendo  $V_c = 26 \text{ Vcc}$  la  $V_{rp}$  sarà:

$$V_{rp} = V_c + V_{dd} = 26 \text{ Vcc} + 1.6 \text{ V} = 27.6 \text{ V}$$

**Calcolo della tensione alternata del secondario:**

La tensione efficace ( $V_{es}$ ) che deve essere fornita dal secondario è calcolabile con la formula :

$$V_{es} = 0.707 * V_{rp} / ( E_{dc} / E_p )$$

Essendo  $V_{rp} = 27.6 \text{ Vp}$ ,  $E_{dc}/E_p = 0.816$ , abbiamo:

$$V_{es} = 0.707 * V_{rp} / ( E_{dc} / E_p ) = 0.707 * 27.6 / ( 0.816 ) = 23.9 \text{ Veff}$$

**Calcolo del numero di spire del secondario:**

Il numero delle spire del secondario si determina con la formula:

$$N_s = ( N_p * V_{es} ) / V_{pe}$$

Essendo  $N_p = 1418$  spire,  $V_{es} = 23.9 \text{ Veff}$ ;  $V_{pe} = 220 \text{ Veff}$ , abbiamo:

$$N_s = ( 1418 \text{ spire} * 23.9 \text{ Veff} ) / 220 \text{ Veff} = 154 \text{ spire}$$

**Calcolo della sezione del filo:**

Il diametro  $D_s$  del filo, da attribuire al secondario, è dato dall'espressione:

$$D_s = D_p * \sqrt{ [( W_{cc} / W_t ) * ( V_p / V_{es} ) ]}$$

Essendo  $D_p = 0.35$ ,  $W_{cc} = 49.4 \text{ W}$ ,  $W_t = 59 \text{ W}$ ,  $V_p = 220 \text{ Veff}$ ,  $V_{es} = 23.9 \text{ Veff}$ , si ha:

$$D_s = 0.35 * \sqrt{ [( 49.4 \text{ W} / 59 \text{ W} ) * ( 220 \text{ Veff} / 23.9 \text{ Veff} ) ]} = 0.97 \text{ mm ( da arrotondare a 1 mm)}$$

**Controllo della temperatura di lavoro del trasformatore:**

Dopo il progetto del trasformatore è necessario procedere al controllo della sopraelevazione di temperatura dovuta alle diverse perdite di potenza nel ferro e negli avvolgimenti.

La temperatura di lavoro del trasformatore si calcola come somma tra la temperatura ambiente ( generalmente si assumono  $25^\circ$ ) e la sopraelevazione termica dovuta alle perdite nel ferro e nel rame. È buona norma che la sopraelevazione di temperatura del trasformatore non ecceda i  $50^\circ\text{C}$ .

Il calcolo della sopraelevazione termica inizia dalla valutazione delle perdite:

**Perdite di potenza nel ferro:**

Le perdite nel ferro fornite dal costruttore per il nucleo T25 sono riportate nella tabella utilizzata per la scelta del ferro e risultano  $P_f = 1.28 \text{ W}$ .

**Perdite di potenza negli avvolgimenti:**

Le perdite sull'avvolgimento primario sono date dall'espressione:

$$P_{pr} = ( R_s / 2 ) * ( W_t / V_{pe} )^2$$

Essendo  $R_s = 80 \text{ ohm}$ ,  $W_t = 59 \text{ W}$ ,  $V_{pe} = 220 \text{ Veff}$ , si ha:

$$P_{pr} = ( 80 \text{ ohm} / 2 ) * ( 59 \text{ W} / 220 \text{ V}_{eff} )^2 = 2.87 \text{ W}$$

Le perdite sull'avvolgimento secondario sono date dall'espressione:

$$P_{se} = S_{me} * N_s * R_{fs} * I_c^2$$

dove  $R_{fs}$  è la resistenza del filo del secondario espressa in ohm / metro.

$R_{fs}$  si ricava, o dalle tabelle del costruttore del filo, o da una misura eseguita su di uno spezzone di conduttore di alcuni metri; nel nostro caso, per filo del diametro di 1 millimetro, si ha  $R_{fs} = 0.0229$  ohm/metro.

Essendo  $S_{me} = 0.15$  m/spira,  $N_s = 154$  spire,  $R_{fs} = 0.0229$  ohm/metro,  $I_c = 1.9$  A si ha:

$$P_{se} = 0.15 \text{ m/spira} * 154 \text{ spire} * 0.0229 \text{ ohm/metro} * 1.9 \text{ A}^2 = 1.9 \text{ W}$$

La potenza dissipata totale è la somma delle tre sopra calcolate:

$$P_{dt} = P_f + P_{pr} + P_{se}$$

$$P_{dt} = 1.28 \text{ W} + 2.8 \text{ W} + 1.9 \text{ W} = 5.98 \text{ W}$$

Per la determinazione della sovra elevazione di temperatura del trasformatore è ora necessario utilizzare il diagramma di figura 8.3 dopo aver calcolato il rapporto  $j_k$ :

$$j_k = P_{dt} / ( 2.9 * S_f )$$

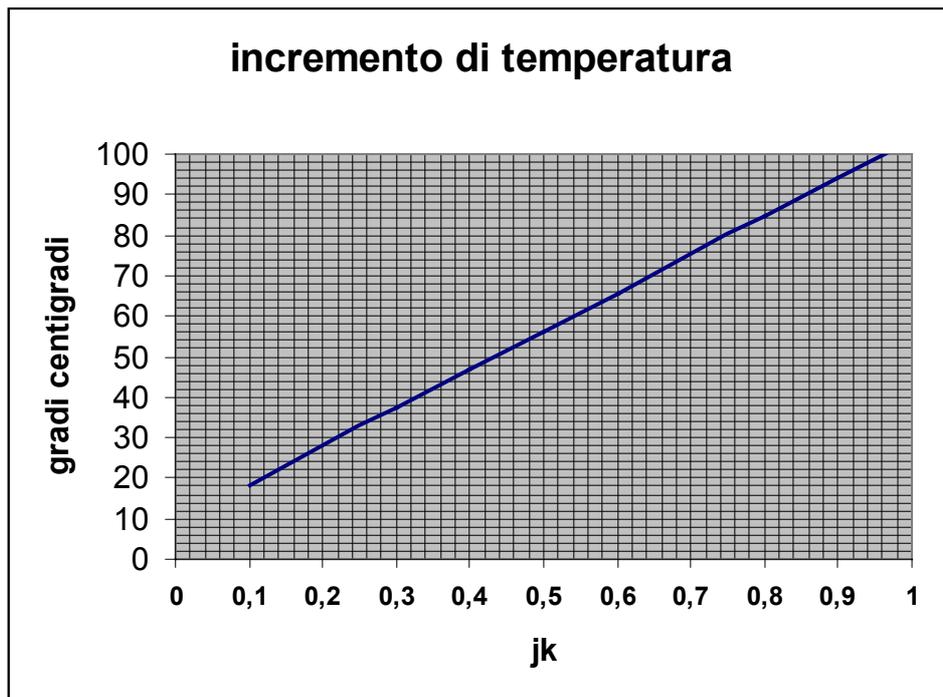
essendo  $S_f = 4.66$  cmq, si ha :

$$j_k = 5.98 \text{ W} / ( 2.9 * 4.66 ) = 0.44$$

Con il valore di  $j_k = 0.44$  posto in ascissa del diagramma di figura 8.6 si ha infine, in ordinata , il valore cercato di  $\Delta t = 50^\circ\text{C}$ ; da questo, sommando la temperatura ambiente  $T_a = 25^\circ\text{C}$  si ha la temperatura complessiva alla quale verrà a trovarsi il trasformatore:

$$T_c = 50^\circ\text{C} + 25^\circ\text{C} = 75^\circ\text{C}$$

figura 8.6



Il valore della temperatura che abbiamo calcolato, pur accettabile, è sensibilmente elevato e si riferisce al trasformatore senza alcun radiatore; essendo il trasformatore fissato ad un supporto metallico la temperatura complessiva sarà senz'altro inferiore, grazie all'effetto radiante dell'appoggio.

Il calcolo della sopraelevazione ( $\Delta t$ ) della temperatura che abbiamo svolto è stato eseguito dopo il progetto del trasformatore; se il valore del  $\Delta t$  fosse risultato molto superiore ai  $50^{\circ}\text{C}$  avremmo dovuto ripetere i calcoli utilizzando un nucleo di ferro a sezione superiore a quella scelta all'inizio. Questa procedura non è molto pratica ma è più sicura di altre che calcolano il  $\Delta t$  inizialmente facendo delle previsioni a volte imprecise.

### 8.5 Esempio di progetto di un alimentatore monofase completo

Ciò che giustifica il progetto e la costruzione di un alimentatore è il soddisfacimento, con un unico manufatto, di tutte le esigenze d'alimentazione richieste dalla circuitazione elettronica che può richiedere una molteplicità e diversità delle tensioni di lavoro per i vari circuiti.

In quest'ottica sviluppiamo un progetto di alimentatore in grado di fornire 6 tensioni continue tramite sei distinti avvolgimenti secondari. Queste e tutti i parametri che li caratterizzano sono contraddistinti da un numero ordinale (n); l'indicazione  $V_{cn}$ , ad esempio, indica una generica tensione continua d'uscita,  $V_{c3}$  indica la tensione continua d'uscita dovuta all'avvolgimento  $n=3$ ,  $I_{c5}$  indica la corrente continua fornita al carico dal circuito connesso con l'avvolgimento  $n=5$ ,  $W_{cc2}$  indica la potenza continua fornita dall'avvolgimento  $n=2$ , ecc.

Il progetto è sviluppato secondo le seguenti specificazioni:

#### **Specificazioni di progetto:**

Sia da progettare un alimentatore avente le seguenti caratteristiche:

Trasformatore con primario e 6 secondari.

Rettificatori a ponte.

Filtri ad ingresso capacitivo.

Tensione di rete al primario  $V_p = 115 V_{eff}$

Frequenza di rete  $f = 60 \text{ Hz}$

$B = 15000 \text{ Gauss}$

Dati delle tensioni e delle correnti fornite ai carichi:

$V_{c1} = 37 V_{cc}$     $I_{c1} = 0.16 \text{ A}$

$V_{c2} = 23 V_{cc}$     $I_{c2} = 0.15 \text{ A}$

$V_{c3} = 23 V_{cc}$     $I_{c3} = 0.15 \text{ A}$

$V_{c4} = 45 V_{cc}$     $I_{c4} = 0.15 \text{ A}$

$V_{c5} = 45 V_{cc}$     $I_{c5} = 0.1 \text{ A}$

$V_{c6} = 26 V_{cc}$     $I_{c6} = 0.06 \text{ A}$

Sovra elevazione di temperatura  $\Delta T < 40^\circ\text{C}$

#### **Calcolo delle potenze:**

**Potenza richiesta dai carichi:**

La potenza richiesta dai 6 carichi si calcola con l'espressione:

$$W_{ccn} = V_{cn} * I_{cn}$$

dove con il pedice  $n = 1; 2; 3; 4; 5; 6$  s'individua il numero ordinale del secondario

$$W_{cc1} = V_{c1} * I_{c1} = 37 V_{cc} * 0.16 \text{ A} \approx 6 \text{ W}$$

$$W_{cc2} = V_{c2} * I_{c2} = 23 V_{cc} * 0.15 \text{ A} \approx 3.5 \text{ W}$$

$$W_{cc3} = V_{c3} * I_{c3} = 23 V_{cc} * 0.15 \text{ A} \approx 3.5 \text{ W}$$

$$W_{cc4} = V_{c4} * I_{c4} = 45 V_{cc} * 0.15 \text{ A} \approx 6.8 \text{ W}$$

$$W_{cc5} = V_{c5} * I_{c5} = 45 V_{cc} * 0.10 \text{ A} \approx 4.5 \text{ W}$$

$$W_{cc6} = V_{c6} * I_{c6} = 26 V_{cc} * 0.06 \text{ A} \approx 1.6 \text{ W}$$

$$\text{Potenza totale sui carichi} \quad W_{cct} = 25.9 \text{ W}$$

**Potenza richiesta dal primario:**

Assumendo un rendimento  $\varepsilon = 80 \%$ , si avrà:

$$W_t = 1.2 * W_{cct} = 1.2 * 25.9 \approx 31 \text{ w}$$

### **Scelta del nucleo di ferro:**

La scelta del nucleo del trasformatore viene fatta su doppie coppie di ferri al silicio con grani orientati, aventi forme ad U da utilizzare come già mostrato in figura 8.2.

La scelta delle dimensioni del nucleo deve essere fatta in funzione della potenza elettrica totale richiesta (  $W_t$  ) dall'elenco dei ferri disponibili; supponiamo che l'elenco sia quello sotto riportato, per ferri che possono lavorare con un'induzione massima di  $B = 17000$  Gauss:

Sigla costruttore del tipo di nucleo	Potenza massima W	Sezione cmq	Perdite nel ferro W
T13	41	2.42	0.66
T19	60	3.54	0.98
T25	75	4.66	1.28
T32	95	5.96	1.64

Al fine di mantenere la sovra elevazione di temperatura sotto il valore indicato nelle specifiche, scegliamo un nucleo con una potenza doppia rispetto alla  $W_t$  calcolata: il tipo T19 che ha una sezione di 3.54 cmq consente una dissipazione massima di 60 W.

Per un nucleo di queste dimensioni il fornitore indica la sezione (  $S_l$  ) lorda del rocchetto sul quale avvolgere primari e secondari :  $S_l = 643$  mmq

Possiamo quindi concludere con l'indicazione dei dati acquisiti:

-Nucleo tipo T19

-Sezione  $S_f = 3.54$  cmq

-Induzione  $B = 15000$  Gauss

-Sezione lorda del rocchetto  $S_l = 643$ mmq

### **Calcolo delle caratteristiche dell'avvolgimento primario:**

#### **Numero spire primario:**

Il calcolo del numero delle spire (  $N_p$  ) del primario si esegue con la formula:

$$N_p = V_{pe} * 10^8 / ( 4.44 * B * f * S_f )$$

Essendo  $V_{pe} = 115$  Veff,  $B = 15000$  Gauss,  $f = 60$  Hz,  $S_f = 3.54$  cmq, abbiamo:

$$N_p = 115 V_{eff} * 10^8 / ( 4.44 * 15000 * 60 \text{ Hz} * 3.54 \text{ cmq} ) \approx 813 \text{ spire}$$

#### **Sezione netta del rocchetto:**

Assumendo come coefficiente di riempimento (  $k_r = 0.35$  ), valore consolidato per trasformatore di piccole dimensioni, si calcola la sezione netta (  $S_n$  ) disponibile sul rocchetto:

Essendo  $K_r = 0.35$ ,  $S_l = 643$  mmq, abbiamo:

$$S_n = 0.35 * 643 \text{ mmq} = 225 \text{ mmq}$$

#### **Sezione netta dedicata al primario:**

E' buona norma assegnare la sezione netta disponibile per metà al primario e per l'altra metà ai secondari; la sezione netta del primario sarà :

$$S_{ap} = S_n / 2$$

Essendo  $S_{ap} = 225 \text{ mmq}$ , abbiamo:

$$S_{ap} = 225 \text{ mmq} / 2 \approx 112 \text{ mmq}$$

**Diametro del filo per l'avvolgimento del primario:**

Il diametro del filo per l'avvolgimento del primario si calcola con la formula:

$$D_p = 2 * \sqrt{[ S_{ap} / ( N_p * \pi )]}$$

Essendo  $S_{ap} = 125 \text{ mmq}$ ,  $N_p = 813$  spire abbiamo:

$$D_p = 2 * \sqrt{[ 125 \text{ mmq} / ( 813 * 3.14 )]} = 0.44 \text{ mm} \text{ (da arrotondare a } 0.45 \text{ mm)}$$

**Lunghezza della spira media:**

Dalle dimensioni del rocchetto date dal costruttore, facendo la media tra il perimetro della parte inferiore e della parte superiore, si ha :

$$S_{me} \approx 15 \text{ cm} = 0.15 \text{ m}$$

**Calcolo dei parametri per la scelta dei rettificatori e il dimensionamento degli avvolgimenti secondari:**

I parametri per la scelta dei rettificatori e per il calcolo degli avvolgimenti secondari prevedono nell'ordine il calcolo di:

**Resistenza equivalente degli avvolgimenti:**

La resistenza equivalente ( $R_s$ ) degli avvolgimenti si calcola come se il trasformatore avesse, invece di un primario e i secondari, due avvolgimenti uguali al primario; detta resistenza si computa con la formula:

$$R_s = 2 * S_{me} * N_p * R_{fp}$$

dove  $R_{fp}$  è la resistenza del filo del primario espressa in ohm / metro

$R_{fp}$  si ricava, o dalle tabelle del costruttore del filo, o da una misura eseguita su di uno spezzone di conduttore di alcuni metri; nel nostro caso, per filo del diametro di 4.5 decimi di millimetro, si ha  $R_{fp} = 0.115 \text{ ohm/metro}$ ; con questo dato si calcola infine  $R_s$ .

Essendo  $S_{me} = 0.15 \text{ m}$ ,  $N_s = 813$  spire,  $R_{fp} = 0.132 \text{ ohm/metro}$ , abbiamo:

$$R_s = 2 * S_{me} * N_p * R_f = 2 * 0.15 \text{ m} * 813 \text{ spire} * 0.132 \text{ ohm/m} \approx 32.2 \text{ ohm}$$

**Determinazione dei rapporti  $E_{dc}/E_p$  e  $R_s/R_c$ :**

Diversamente dal progetto del trasformatore svolto nel paragrafo 8.4 ( il trasformatore aveva un solo secondario), per il presente, che ha molti secondari, è necessario determinare, oltre che il rapporto  $E_{dc}/E_p$ , anche il rapporto  $R_s/R_c$  ; quest'ultimo si ottiene con l'ausilio della curva di figura 8.7. Anche in questo caso è necessario calcolare la variabile  $X_{gr}$  con la formula:

$$X_{gr} = 100 * ( W_{cct} * R_s ) / ( 2 * V_{pe}^2 )$$

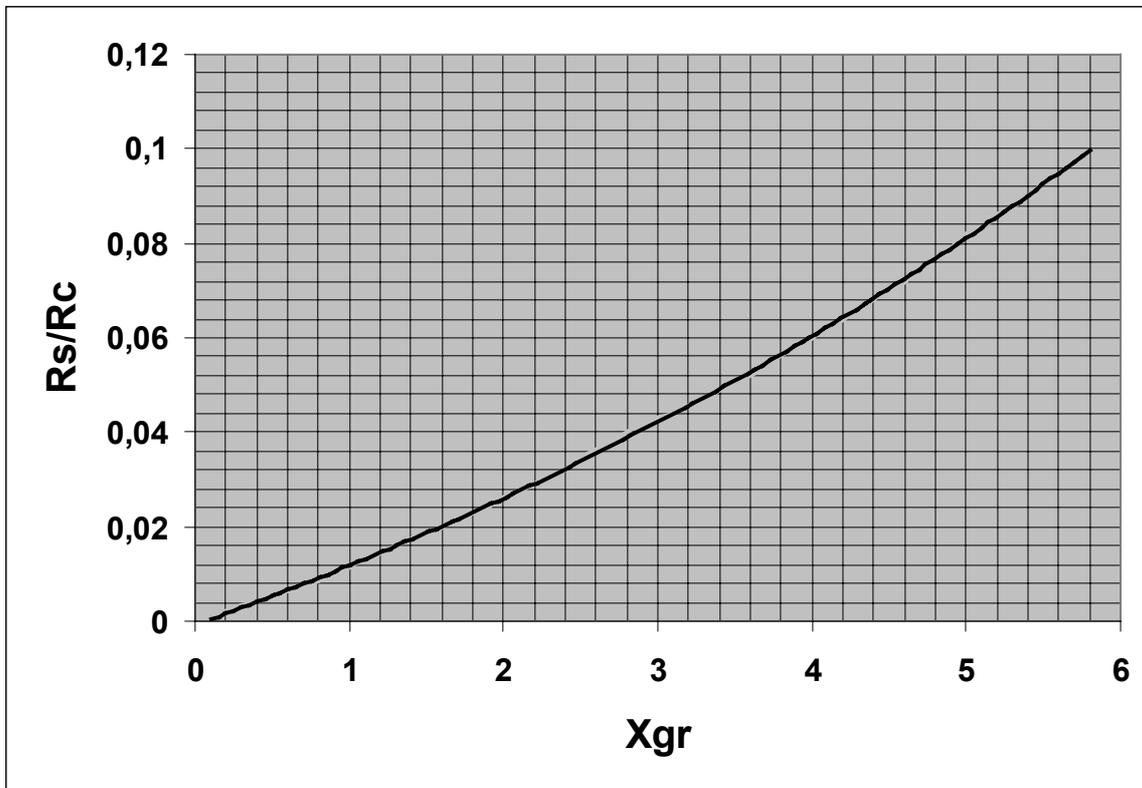
Essendo  $W_{cct} = 25.9 \text{ W}$ ,  $R_s = 32.2 \text{ ohm}$ ,  $V_{pe} = 115 \text{ V}_{eff}$ , abbiamo:

$$X_{gr} = 100 * ( 25.9 \text{ W} * 32.2 \text{ ohm} ) / ( 2 * 115^2 ) = 3.15$$

Per  $X_{gr} = 3.15$  dalla curva di figura 8.5 otteniamo  $E_{dc}/E_p = 0.85$

Per  $X_{gr} = 3.15$  dalla curva di figura 8.7 otteniamo  $R_s/R_c = 0.044$

figura 8.7



### ***Determinazione delle caratteristiche e scelta dei rettificatori:***

Le caratteristiche dei rettificatori dei ponti devono essere determinate secondo la seguente procedura:

#### **Calcolo della corrente di picco massima:**

1) Si elencano le correnti continue ( $I_c$ ) che scorrono nei diodi per i diversi carichi.

$$I_{c1} = 0.16 \text{ A}$$

$$I_{c2} = 0.15 \text{ A}$$

$$I_{c3} = 0.15 \text{ A}$$

$$I_{c4} = 0.15 \text{ A}$$

$$I_{c5} = 0.10 \text{ A}$$

$$I_{c6} = 0.060 \text{ A}$$

2) Si calcolano le correnti medie ( $I_{cm}$ ) dividendo per due le correnti continue dato che i diodi lavorano in un ponte e ciascun ramo conduce per la metà del tempo.

$$I_{cm1} = 0.08 \text{ A}$$

$$I_{cm2} = 0.075 \text{ A}$$

$$I_{cm3} = 0.075 \text{ A}$$

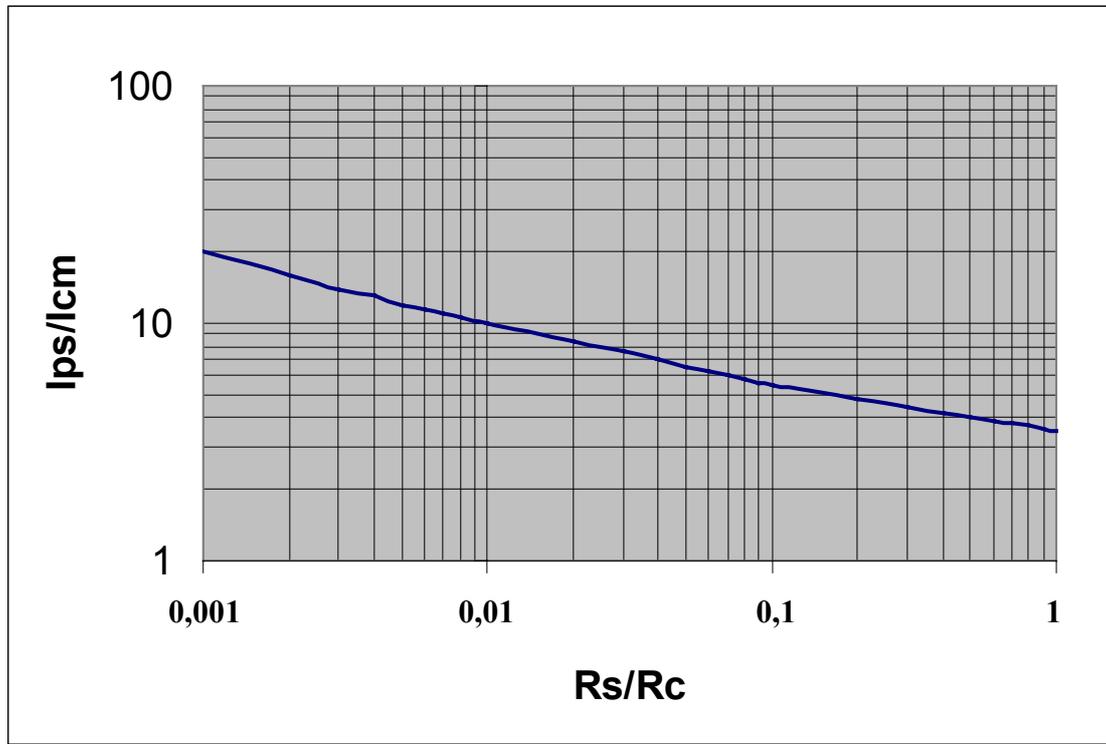
$$I_{cm4} = 0.075 \text{ A}$$

$$I_{cm5} = 0.05 \text{ A}$$

$$I_{cm6} = 0.030 \text{ A}$$

3) In base al valore del rapporto  $R_s/R_c = 0.044$ , ricavato al passo precedente, e mediante la curva di figura 8.8, si ottiene il rapporto  $(I_{ps}/I_{cm}) = 6.8$  tra la corrente di picco e la corrente media  $I_{cm}$ .

figura 8.8



4) Con il valore di  $(I_{ps}/I_{pm})$  si calcolano i valori di picco sui diodi secondo l'elenco:

$$I_{p1} = I_{cm1} * (I_{ps}/I_{pm}) = 0.08 \text{ A} * 6.8 = 0.54 \text{ A}$$

$$I_{p2} = I_{cm2} * (I_{ps}/I_{pm}) = 0.075 \text{ A} * 6.8 = 0.51 \text{ A}$$

$$I_{p3} = I_{cm3} * (I_{ps}/I_{pm}) = 0.075 \text{ A} * 6.8 = 0.51 \text{ A}$$

$$I_{p4} = I_{cm4} * (I_{ps}/I_{pm}) = 0.075 \text{ A} * 6.8 = 0.51 \text{ A}$$

$$I_{p5} = I_{cm5} * (I_{ps}/I_{pm}) = 0.05 \text{ A} * 6.8 = 0.34 \text{ A}$$

$$I_{p6} = I_{cm6} * (I_{ps}/I_{pm}) = 0.030 \text{ A} * 6.8 = 0.20 \text{ A}$$

I diodi che andremo a selezionare dovranno avere una corrente  $I_f$  superiore ad  $I_{pn}$ .

#### Valutazione della tensione inversa massima:

Per calcolare quale tensione alternata inversa sarà applicata ai rettificatori, non considerando al momento la caduta di tensione sui diodi, è necessario prendere in considerazione le tensioni continue applicate ai carichi. Le tensioni alternate di picco  $V_{ca}(\text{picco})_n$  che i secondari dovranno fornire per ottenere le tensioni continue volute sono date da:

$$V_{ca}(\text{picco})_n = V_{cn} / (E_{dc} / E_p)$$

quindi:

$$V_{ca}(\text{picco})_1 = V_{c1} / (E_{dc} / E_p) = 37V_{cc} / 0.915 = 40.4$$

$$V_{ca}(\text{picco})_2 = V_{c2} / (E_{dc} / E_p) = 23V_{cc} / 0.915 = 25.1$$

$$V_{ca}(\text{picco})_3 = V_{c3} / (E_{dc} / E_p) = 23V_{cc} / 0.915 = 25.1$$

$$V_{ca(picco)4} = V_{c4} / ( E_{dc} / E_p ) = 45V_{cc} / 0.915 = 49.1$$

$$V_{ca(picco)5} = V_{c5} / ( E_{dc} / E_p ) = 45V_{cc} / 0.915 = 49.1$$

$$V_{ca(picco)6} = V_{c6} / ( E_{dc} / E_p ) = 26V_{cc} / 0.915 = 28.4$$

I diodi che andremo a selezionare dovranno avere una tensione inversa superiore a  $V_{ca}(\text{picco})_n$ .

#### Selezione del tipo di diodi:

I diodi da impiegare possiamo sceglierli, tra i tanti disponibili a catalogo, nel tipo 1N4002 che presenta le seguenti caratteristiche:

$$I_f = 1 \text{ A} > I_{p1}; I_{p3}; I_{p4}; I_{p5}; I_{p6}$$

$$V_r = 100 \text{ V} > V_{ca(picco)1-6}$$

#### Calcolo della caduta di tensione ai capi dei diodi:

La valutazione della caduta di tensione su due diodi ( $V_{ddn}$ ), necessaria per il successivo calcolo dei secondari del trasformatore, deve essere fatta utilizzando le curve caratteristiche ( $I_p, V_f$ ) date a catalogo; per i diodi selezionati queste risultano:

Per il tipo 1N4002

$$I_{p1} = 0.54 \text{ A}; V_{f1} = 0.7; V_{dd1} = 2 * V_{f1} = 1.4 \text{ V}$$

$$I_{p2} = 0.51 \text{ A}; V_{f2} = 0.7; V_{dd2} = 2 * V_{f2} = 1.4 \text{ V}$$

$$I_{p3} = 0.51 \text{ A}; V_{f3} = 0.7; V_{dd3} = 2 * V_{f3} = 1.4 \text{ V}$$

$$I_{p4} = 0.51 \text{ A}; V_{f4} = 0.7; V_{dd4} = 2 * V_{f4} = 1.4 \text{ V}$$

$$I_{p5} = 0.34 \text{ A}; V_{f5} = 0.6; V_{dd5} = 2 * V_{f5} = 1.2 \text{ V}$$

$$I_{p6} = 0.20 \text{ A}; V_{f5} = 0.6; V_{dd5} = 2 * V_{f5} = 1.2 \text{ V}$$

#### Calcolo delle caratteristiche di secondari:

Per il calcolo delle caratteristiche dei secondari s'inizia valutando le tensioni di picco ( $V_{rpn}$ ) che devono essere applicate ai rettificatori; dette tensioni saranno la somma della tensioni continua voluta sul carico più la tensione ( $V_{ddn}$ ) che cade ai capi di due diodi, cioè:

$$V_{rpn} = V_{cn} + V_{ddn}$$

#### Calcolo di $V_{rpn}$ :

Le cadute di tensione nei diodi dei rettificatori determinate al passo precedente e sono:

$$V_{dd1} = 1.4 \text{ V}$$

$$V_{dd2} = 1.4 \text{ V}$$

$$V_{dd3} = 1.4 \text{ V}$$

$$V_{dd4} = 1.4 \text{ V}$$

$$V_{dd5} = 1.2 \text{ V}$$

$$V_{dd6} = 1.2 \text{ V}$$

Da queste, in base alla formula sopra indicata, abbiamo

$$V_{rp1} = V_{c1} + V_{dd1} = 37 V_{cc} + 1.4 = 38.4 V_p$$

$$V_{rp2} = V_{c2} + V_{dd2} = 23 V_{cc} + 1.4 = 24.4 V_p$$

$$V_{rp3} = V_{c3} + V_{dd3} = 23 V_{cc} + 1.4 = 24.4 V_p$$

$$V_{rp4} = V_{c4} + V_{dd4} = 45 V_{cc} + 1.4 = 46.4 V_p$$

$$V_{rp5} = V_{c5} + V_{dd5} = 45 V_{cc} + 1.2 = 46.2 V_p$$

$$V_{rp6} = V_{c6} + V_{dd6} = 26 V_{cc} + 1.2 = 27.2 V_p$$

#### Calcolo della tensioni alternate dei secondari:

Le tensioni efficaci ( $V_{esn}$ ) che devono essere fornite dai sei secondari sono calcolabili con la formula :

$$V_{esn} = 0.707 * V_{rpn} / ( E_{dc} / E_p )$$

quindi:

$$V_{es1} = 0.707 * V_{rp1} / ( E_{dc} / E_p ) = 0.707 * 38.4 V_p / 0.915 = 29.6 V_{eff}$$

$$V_{es2} = 0.707 * V_{rp2} / ( E_{dc} / E_p ) = 0.707 * 24.4 V_p / 0.915 = 18.8 V_{eff}$$

$$V_{es3} = 0.707 * V_{rp3} / ( E_{dc} / E_p ) = 0.707 * 24.4 V_p / 0.915 = 18.8 V_{eff}$$

$$V_{es4} = 0.707 * V_{rp4} / ( E_{dc} / E_p ) = 0.707 * 46.4 V_p / 0.915 = 35.8 V_{eff}$$

$$V_{es5} = 0.707 * V_{rp5} / ( E_{dc} / E_p ) = 0.707 * 46.2 V_p / 0.915 = 35.6 V_{eff}$$

$$V_{es6} = 0.707 * V_{rp6} / ( E_{dc} / E_p ) = 0.707 * 27.2 V_p / 0.915 = 21 V_{eff}$$

**Calcolo del numero di spire dei secondari:**

Il numero delle spire dei secondari si determina con la formula:

$$N_{sn} = ( N_p * V_{esn} ) / V_{pe}$$

Essendo  $N_p = 813$  spire;  $V_{pe} = 115 V_{eff}$  abbiamo:

$$N_{s1} = ( N_p * V_{es1} ) / V_{pe} = ( 813 \text{ spire} * 29.6 V_{eff} ) / 115 V_{eff} \approx 209 \text{ spire}$$

$$N_{s2} = ( N_p * V_{es2} ) / V_{pe} = ( 813 \text{ spire} * 18.8 V_{eff} ) / 115 V_{eff} \approx 133 \text{ spire}$$

$$N_{s3} = ( N_p * V_{es3} ) / V_{pe} = ( 813 \text{ spire} * 18.8 V_{eff} ) / 115 V_{eff} \approx 133 \text{ spire}$$

$$N_{s4} = ( N_p * V_{es4} ) / V_{pe} = ( 813 \text{ spire} * 35.8 V_{eff} ) / 115 V_{eff} \approx 253 \text{ spire}$$

$$N_{s5} = ( N_p * V_{es5} ) / V_{pe} = ( 813 \text{ spire} * 35.6 V_{eff} ) / 115 V_{eff} \approx 252 \text{ spire}$$

$$N_{s6} = ( N_p * V_{es6} ) / V_{pe} = ( 813 \text{ spire} * 21 V_{eff} ) / 115 V_{eff} \approx 149 \text{ spire}$$

**Calcolo delle sezioni dei fili:**

I diametri  $D_{sn}$  dei fili, da attribuire ai secondari, è dato dall'espressione:

$$D_{sn} = D_p * \sqrt{ [ ( W_{ccn} / W_t ) * ( V_{pe} / V_{esn} ) ] }$$

Essendo  $D_p = 0.42$  mm;  $V_{pe} = 115 V_{eff}$ ;  $W_t = 25.9$  W si ha:

$$D_{s1} = D_p * \sqrt{ [ ( W_{cc1} / W_t ) * ( V_{pe} / V_{es1} ) ] } = 0.42 * \sqrt{ [ ( 6 W / 25.9W ) * ( 115 V_{eff} / 29.6 V_{eff} ) ] } \approx 0.38 \text{ mm}$$

$$D_{s2} = D_p * \sqrt{ [ ( W_{cc2} / W_t ) * ( V_{pe} / V_{es2} ) ] } = 0.42 * \sqrt{ [ ( 3.5 W / 25.9W ) * ( 115 V_{eff} / 18.8 V_{eff} ) ] } \approx 0.38 \text{ mm}$$

$$D_{s3} = D_p * \sqrt{ [ ( W_{cc3} / W_t ) * ( V_{pe} / V_{es3} ) ] } = 0.42 * \sqrt{ [ ( 3.5 W / 25.9W ) * ( 115 V_{eff} / 18.8 V_{eff} ) ] } \approx 0.38 \text{ mm}$$

$$D_{s4} = D_p * \sqrt{ [ ( W_{cc4} / W_t ) * ( V_{pe} / V_{es4} ) ] } = 0.42 * \sqrt{ [ ( 6.8 W / 25.9W ) * ( 115 V_{eff} / 35.8 V_{eff} ) ] } \approx 0.38 \text{ mm}$$

$$D_{s5} = D_p * \sqrt{ [ ( W_{cc5} / W_t ) * ( V_{pe} / V_{es5} ) ] } = 0.42 * \sqrt{ [ ( 4.5 W / 25.9W ) * ( 115 V_{eff} / 35.6 V_{eff} ) ] } \approx 0.30 \text{ mm}$$

$$D_{s6} = D_p * \sqrt{ [ ( W_{cc6} / W_t ) * ( V_{pe} / V_{es6} ) ] } = 0.42 * \sqrt{ [ ( 0.16 W / 25.9W ) * ( 115 V_{eff} / 21 V_{eff} ) ] } \approx 0.1 \text{ mm}$$

Sulla base dei diametri del filo il costruttore indica  $R_{sf}$ /metro:

Filo da 0.38 mm;  $R_{sf}$ /metro = 0.16 ohm

Filo da 0.30 mm;  $R_{sf}$ /metro = 0.26 ohm

Filo da 0.1 mm;  $R_{sf}$ / metro = 2.43 ohm

**Calcolo dei filtri ad ingresso capacitivo:**

L'espressione con la quale calcolare le caratteristiche dei condensatori dei filtri ad ingresso capacitivo è data da:

$$C_n \geq 100 / ( 2 * \pi * f * R_{cn} )$$

dove  $R_{cn}$  è il valore delle sei resistenze di carico.

**Determinazione dei valori delle capacità:**

Si determina il valore delle sei capacità di filtro sulla base dell'elenco delle resistenze di carico:

Essendo:

$$\begin{aligned} V_{c1} &= 37 \text{ Vcc} & I_{c1} &= 0.16 \text{ A} & \text{Si ha } R_{c1} &= V_{c1}/I_{c1} = 37\text{Vcc} / 0.16 \text{ A} = 231.2 \text{ ohm} \\ V_{c2} &= 23 \text{ Vcc} & I_{c2} &= 0.15 \text{ A} & R_{c2} &= V_{c2}/I_{c2} = 23\text{Vcc} / 0.15 \text{ A} = 153.3 \text{ ohm} \\ V_{c3} &= 23 \text{ Vcc} & I_{c3} &= 0.15 \text{ A} & R_{c3} &= V_{c3}/I_{c3} = 23\text{Vcc} / 0.15 \text{ A} = 153.3 \text{ ohm} \\ V_{c4} &= 45 \text{ Vcc} & I_{c4} &= 0.15 \text{ A} & R_{c4} &= V_{c4}/I_{c4} = 45\text{Vcc} / 0.15 \text{ A} = 300 \text{ ohm} \\ V_{c5} &= 45 \text{ Vcc} & I_{c5} &= 0.1 \text{ A} & R_{c5} &= V_{c5}/I_{c5} = 45\text{Vcc} / 0.10 \text{ A} = 450 \text{ ohm} \\ V_{c6} &= 26 \text{ Vcc} & I_{c6} &= 0.06 \text{ A} & R_{c6} &= V_{c6}/I_{c6} = 26\text{Vcc} / 0.6 \text{ A} = 43.3 \text{ ohm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C1 &\geq 100 / (2 * \pi * f * R_{c1}) = 100 / (2 * 3.14 * 60 \text{ Hz} * 231.2 \text{ ohm}) = 1147 \mu\text{F} \\ C2 &\geq 100 / (2 * \pi * f * R_{c2}) = 100 / (2 * 3.14 * 60 \text{ Hz} * 153.3 \text{ ohm}) = 1730 \mu\text{F} \\ C3 &\geq 100 / (2 * \pi * f * R_{c3}) = 100 / (2 * 3.14 * 60 \text{ Hz} * 153.3 \text{ ohm}) = 1730 \mu\text{F} \\ C4 &\geq 100 / (2 * \pi * f * R_{c4}) = 100 / (2 * 3.14 * 60 \text{ Hz} * 300 \text{ ohm}) = 884 \mu\text{F} \\ C5 &\geq 100 / (2 * \pi * f * R_{c5}) = 100 / (2 * 3.14 * 60 \text{ Hz} * 450 \text{ ohm}) = 586 \mu\text{F} \\ C6 &\geq 100 / (2 * \pi * f * R_{c6}) = 100 / (2 * 3.14 * 60 \text{ Hz} * 43.3 \text{ ohm}) = 612 \mu\text{F} \end{aligned}$$

Per la scelta dei valori di capacità è opportuno standardizzarle, per quanto possibile, a pochi valori per semplificarne l'approvvigionamento; si ha perciò:

Capacità uguali da 2200  $\mu\text{F}$  con tensioni di lavoro:

$$V_{l1} = 1.2 * V_{c1} = 37\text{Vcc} * 1.2 = 44.5 \text{ V} \quad (\text{si sceglie } V_l = 60 \text{ V})$$

$$V_{l2} = 1.2 * V_{c2} = 23\text{Vcc} * 1.2 = 27.6 \text{ V} \quad (\text{sceglie } V_l = 40 \text{ V})$$

$$V_{l3} = 1.2 * V_{c3} = 23\text{Vcc} * 1.2 = 27.6 \text{ V} \quad (\text{sceglie } V_l = 40 \text{ V})$$

Capacità uguali da 1000  $\mu\text{F}$  con tensioni di lavoro:

$$V_{l4} = 1.2 * V_{c4} = 45\text{Vcc} * 1.2 = 54 \text{ V} \quad (\text{sceglie } V_l = 60 \text{ V})$$

$$V_{l5} = 1.2 * V_{c5} = 45\text{Vcc} * 1.2 = 54 \text{ V} \quad (\text{sceglie } V_l = 60 \text{ V})$$

$$V_{l6} = 1.2 * V_{c6} = 26\text{Vcc} * 1.2 = 31.2 \text{ V} \quad (\text{sceglie } V_l = 40 \text{ V})$$

#### Calcolo delle correnti d'ondulazione:

I condensatori devono poter sopportare la corrente alternata  $I_{con}$  dovute alla presenza dell'ondulazione d'uscita  $V_{ondn}$ : tale corrente si calcola mediante l'espressione:

$$I_{con} = V_{ondn} * 4 * \pi * f * C_n * 1.1$$

dove  $V_{ondn}$ , per i filtri ad ingresso capacitivo, è:

$$V_{ondn} = 0.01 * V_{cn}$$

si ha quindi:

$$I_{co1} = 0.01 * V_{c1} * 4 * \pi * f * C1 * 1.1 = 0.011 * 37 \text{ Vcc} * 12.56 * 60 \text{ Hz} * 2200 \mu\text{F} = 0.67 \text{ A}$$

$$I_{co2} = 0.01 * V_{c2} * 4 * \pi * f * C2 * 1.1 = 0.011 * 23 \text{ Vcc} * 12.56 * 60 \text{ Hz} * 2200 \mu\text{F} = 0.41 \text{ A}$$

$$I_{co3} = 0.01 * V_{c3} * 4 * \pi * f * C3 * 1.1 = 0.011 * 23 \text{ Vcc} * 12.56 * 60 \text{ Hz} * 2200 \mu\text{F} = 0.41 \text{ A}$$

$$I_{co4} = 0.01 * V_{c4} * 4 * \pi * f * C4 * 1.1 = 0.011 * 45 \text{ Vcc} * 12.56 * 60 \text{ Hz} * 2200 \mu\text{F} = 0.82 \text{ A}$$

$$I_{co5} = 0.01 * V_{c5} * 4 * \pi * f * C5 * 1.1 = 0.011 * 45 \text{ Vcc} * 12.56 * 60 \text{ Hz} * 2200 \mu\text{F} = 0.82 \text{ A}$$

$$I_{co6} = 0.01 * V_{c6} * 4 * \pi * f * C6 * 1.1 = 0.011 * 26 \text{ Vcc} * 12.56 * 60 \text{ Hz} * 2200 \mu\text{F} = 0.47 \text{ A}$$

Dato che i condensatori elettrolitici di filtro, tipo professionale, possono lavorare normalmente con correnti d'ondulazione superiori a 2.5 A, questi saranno tutti adatti per sostenere le correnti d'ondulazione sopra calcolate.

**Verifica della temperatura di lavoro del trasformatore:**

La temperatura di lavoro del trasformatore si calcola come somma tra la temperatura ambiente (generalmente si assumono 25°) e la sopraelevazione termica dovuta alle perdite nel ferro e nel rame.

Il calcolo inizia dalla valutazione delle perdite:

**Perdite di potenza nel ferro:**

Le perdite nel ferro fornite dal costruttore per il nucleo T19 sono riportate nella tabella utilizzata per la scelta del ferro e risultano  $P_f = 0.96W$ .

**Perdite di potenza negli avvolgimenti:**

Le perdite sull'avvolgimento primario sono date dall'espressione:

$$P_{pr} = (R_s / 2) * (W_t / V_{pe})^2$$

Essendo  $R_s = 32.2 \text{ ohm}$ ,  $W_t = 31 \text{ W}$ ,  $V_{pe} = 115 \text{ V eff}$  si ha:

$$P_{pr} = (32.2 \text{ ohm} / 2) * (31 \text{ W} / 115 \text{ V}_{eff})^2 = 1.16 \text{ W}$$

Le perdite sugli avvolgimenti secondari sono date dall'espressione:

$$P_{sen} = S_{me} * N_{sn} * R_{fsn} * I_{cn}^2$$

dove  $R_{fsn}$  è la resistenza del filo del secondario di numero ordinale (n) espressa in ohm / metro.

**Secondario 1**

Filo da 0.38 mm;  $R_{sf}/\text{metro} = 0.16 \text{ ohm}$

Essendo  $S_{me} = 0.15 \text{ m/spira}$ ,  $N_{s1} = 209 \text{ spire}$ ,  $R_{fs1} = 0.16 \text{ ohm/metro}$ ,  $I_{c1} = 0.16 \text{ A}$  si ha:

$$P_{se1} = 0.15 \text{ m/spira} * 209 \text{ spire} * 0.16 \text{ ohm/metro} * 0.16A^2 = 0.13W$$

**Secondari 2 e 3**

Filo da 0.38 mm;  $R_{sf}/\text{metro} = 0.16 \text{ ohm}$

Essendo  $S_{me} = 0.15 \text{ m/spira}$ ,  $N_{s2;3} = 133 \text{ spire}$ ,  $R_{fs2;3} = 0.16 \text{ ohm/metro}$ ,  $I_{c2;3} = 0.15 \text{ A}$ , si ha:

$$P_{se2;3} = 0.15 \text{ m/spira} * 154 \text{ spire} * 0.16 \text{ ohm/metro} * 0.15A^2 = 0.08 \text{ W}$$

**Secondario 4**

Filo da 0.38 mm;  $R_{sf}/\text{metro} = 0.16 \text{ ohm}$

Essendo  $S_{me} = 0.15 \text{ m/spira}$ ,  $N_{s4} = 253 \text{ spire}$ ,  $R_{fs4} = 0.16 \text{ ohm/metro}$ ,  $I_{c4} = 0.15A$ , si ha:

$$P_{se4} = 0.15 \text{ m/spira} * 253 \text{ spire} * 0.16 \text{ ohm/metro} * 0.15A^2 = 0.13W$$

**Secondario 5**

Filo da 0.3 mm;  $R_{sf}/\text{metro} = 0.26 \text{ ohm}$

Essendo  $S_{m5} = 0.15$  m/spira,  $N_{s5} = 252$  spire,  $R_{fs5} = 0.26$  ohm/metro,  $I_{c5} = 0.1$ A, si ha:

$$P_{se5} = 0.15 \text{ m/spira} * 252 \text{ spire} * 0.26 \text{ ohm/metro} * 0.1^2 = 0.09 \text{ W}$$

Secondario 6

Filo da 0.1 mm;  $R_{sf}/\text{metro} = 2.43$  ohm

Essendo  $S_{m6} = 0.15$  m/spira,  $N_{s6} = 149$  spire,  $R_{fs6} = 2.43$  ohm/metro,  $I_{c6} = 0.06$  A, si ha:

$$P_{se6} = 0.15 \text{ m/spira} * 149 \text{ spire} * 2.43 \text{ ohm/metro} * 0.06^2 = 0.19 \text{ W}$$

La potenza dissipata totale è la somma delle sette sopra calcolate:

$$P_{dt} = P_f + P_{pr} + P_{se1} + P_{se2} + P_{se3} + P_{se4} + P_{se5} + P_{se6}$$

$$P_{dt} = 0.96 \text{ W} + 1.16 \text{ W} + 0.13 \text{ W} + 0.08 \text{ W} + 0.08 \text{ W} + 0.13 \text{ W} + 0.09 \text{ W} + 0.19 \text{ W} = 2.8 \text{ W}$$

Per la determinazione della sovra elevazione di temperatura del trasformatore è ora necessario utilizzare il diagramma di figura 8.3 dopo aver calcolato il rapporto  $j_k$ :

$$j_k = P_{dt} / (2.9 * S_f)$$

essendo  $S_f = 3.54$  cmq, si ha :

$$j_k = 2.8 \text{ W} / (2.9 * 3.54) = 0.27$$

Con il valore di  $j_k = 0.27$  posto in ascissa del diagramma di figura 8.6, si ha infine, in ordinata, il valore cercato di  $\Delta t = 34^\circ\text{C}$ ; da questo, sommando la temperatura ambiente  $T_a = 25^\circ\text{C}$ , si ha la temperatura complessiva alla quale verrà a trovarsi il trasformatore:

$$T_c = 34^\circ\text{C} + 25^\circ\text{C} = 59^\circ\text{C}$$

### ***Suggerimenti per la costruzione del trasformatore :***

La costruzione del trasformatore deve essere fatta seguendo, in successione, le sotto indicate norme pratiche:

- 1) Gli avvolgimenti in filo di rame smaltato non devono mai essere fatti alla “rinfusa”; questa pratica non può essere adottata per costruzioni professionali perchè si corre il rischio che spire di filo ad elevato potenziale s’insinuino tra spire a potenziale inferiore mettendo in pericolo gli isolamenti di copertura dei conduttori.
- 2) Gli avvolgimenti devono essere piazzati sul rocchetto, a spire contigue, strato dopo strato, si da riempire, ordinatamente, tutto lo spazio disponibile; tra uno strato e il successivo deve essere interposta una striscia di carta isolante sottile adatta all’uso, che ha il duplice scopo di isolare gli strati l’uno dall’altro e creare una superficie piana sulla quale avvolgere lo strato successivo.

- 3) L'avvolgimento primario, generalmente, deve essere avvolto per primo; finito tale avvolgimento, deve essere posta una striscia sottile di materiale isolante per creare una netta separazione tra primario e secondari.
- 4) Quando è richiesto, non è il caso del nostro progetto, tra primario e secondario deve essere inserito un avvolgimento ad un solo strato con la funzione di schermo elettrostatico.
- 5) Gli estremi degli avvolgimenti devono fuoriuscire dal rocchetto coperti con adatte calze isolanti leggere, fatte di seta o materiali sintetici.
- 6) Gli estremi degli avvolgimenti, che escono dal pacco, devono essere il più lunghi possibile onde agevolare le operazioni di collegamento del trasformatore una volta inserito nel proprio contenitore.
- 7) L'assemblaggio del trasformatore, rocchetto e coppie dei nuclei di ferro, deve essere completato da idonee fascette per serrare energicamente i ferri ad U tra di loro, in modo che le teste dei ferri stessi combacino perfettamente; questa operazione porta alla realizzazione del "pacco di trasformazione".
- 8) Il pacco completato deve essere controllato sotto tensione per vedere se il funzionamento è corretto mediante verifica delle tensioni secondarie. La cosa migliore da fare sarebbe un'anticipazione del collaudo dell'alimentatore relativamente alle sole tensioni continue da eseguire con carichi simulati.  
Questo controllo è fondamentale e non deve essere tralasciato, eventuali errori scoperti in questa fase possono, alcune volte, essere rimediati; una volta passati alle fasi successive eventuali malfunzionamenti costringono al rifacimento del trasformatore con la perdita di tutto il materiale e il lavoro fatto.
- 9) Quando è richiesto, non è il caso del nostro progetto, **all'esterno** del trasformatore, deve essere avvolta una striscia di rame larga quanto è largo il trasformatore, disposta nello stesso senso degli avvolgimenti, per creare una sorta di spira di larga sezione con la funzione di schermo elettromagnetico, detta spira deve essere poi saldata, lembo con lembo, al fine di creare un corto circuito della tensione dovuta all'energia magnetica dispersa.
- 10) Il pacco deve essere impregnato a caldo, con resina isolante liquida, per garantire l'isolamento degli avvolgimenti dagli agenti atmosferici esterni.
- 11) Il pacco completo, ottenuto dopo l'assemblaggio ed il controllo, deve essere sistemato in adatto contenitore di metallo di giusta misura, entro il quale versare una speciale resina liquida che, una volta solidificatasi, servirà da veicolo di trasmissione del calore del trasformatore verso l'eterno; dal contenitore dovranno fuoriuscire, mediante adatti passanti isolanti, i terminali degli avvolgimenti: il primario dovrà uscire da un lato ed i secondari dalla parte opposta.

***Collaudo dell'alimentatore:***

L'alimentatore, a montaggio ultimato, deve essere collaudato eseguendo i seguenti controlli:  
Controllo delle tensioni continue con carichi simulati.  
Controllo dell'ondulazione residua sui carichi.

Controllo dell'incremento di temperatura.  
 Controllo del rendimento.  
 Vediamoli nell'ordine:

**Controllo delle tensioni continue con carichi simulati.**

Si devono collegare all'alimentatore 6 resistenze di carico per poter misurare ai loro capi le tensioni impostate a progetto; i dati rilevati dovranno essere contenuti entro una tolleranza del +/- 5% rispetto ai valori calcolati.

Valori di tensione, di resistenze e potere di dissipazione dei carichi sono riportati nella tabella seguente:

Tensione Secondario	Volt c.c. calcolati	Resistenza di carico in ohm	Potere di dissipazione del carico simulato *	Tolleranze sulle tensioni misurate in Vcc
Vc1	37	230	10W	38.85 - 35.23
Vc2	23	150	5W	21.90 - 24.15
Vc3	23	150	5W	21.90 - 24.15
Vc4	45	300	10W	42.85 - 47.25
Vc5	45	450	10W	42.85 - 47.25
Vc6	26	430	5W	24.76 - 27.3

**\* Il potere di dissipazione del carico simulato deve essere superiore alla potenza fornita dall'alimentatore per non avere eccessive sopraelevazioni termiche sui carichi ad evitare ustioni per contatti accidentali con il corpo.**

Le tensioni devono essere misurate con un voltmetro di precisione controllando, contemporaneamente, che la tensione alternata applicata al primario sia di 115 Veff.

**Controllo dell'ondulazione residua sui carichi:**

Le tensioni di ondulazione sui carichi devono essere misurate con i carichi collegati come al punto precedente, i valori dovranno essere inferiori a quelli riportati nella tabella sottostante:

Tensione Secondario	Ondulazione mVpp
Vc1	400
Vc2	240
Vc3	240
Vc4	500
Vc5	500
Vc6	300

Le misure delle tensioni di ondulazione devono essere misurate con un oscilloscopio disposto con l'ingresso in corrente alternata.

**Controllo dell'incremento di temperatura:**

Il controllo della temperatura del trasformatore deve essere eseguito mediante due misure di resistenza (Rp1 e Rp2) da eseguire sull'avvolgimento primario.

La prima misura si deve eseguire, con alimentatore scollegato dalla rete di alimentazione, quando l'alimentatore è a temperatura ambiente da almeno 12 ore; si annota il valore di Rp1.

Si accende l'alimentatore con tutti i carichi collegati e lo si tiene in funzionamento continuo per 4 ore, al termine del tempo stabilito si scollega dalla rete e si misura nuovamente la resistenza (Rp2) del primario; con i due valori della resistenza si calcola la sopraelevazione di temperatura con la formula:

$$\Delta t = (Rp2 - Rp1) / (Rp1 * 3.9 * 10^{-3})$$

Se ad esempio le due misure di resistenza hanno portato ai seguenti rilievi: Rp1 = 12.5 ohm e Rp2 = 14 ohm, si ha:

$$\Delta t = (Rp2 - Rp1) / (Rp1 * 3.9 * 10^{-3}) = (14 \text{ ohm} - 12.5 \text{ ohm}) / (12.5 \text{ ohm} * 3.9 * 10^{-3}) = 30.7^\circ\text{C}$$

**Controllo del rendimento:**

Il controllo del rendimento richiede la disponibilità di un wattmetro, con il quale, una volta collegati tutti i carichi all'alimentatore, si misura la potenza Wtm assorbita dal primario, che dovrebbe risultare vicina al valore di Wt calcolato in fase di progetto. Il rendimento si calcola con l'espressione:

$$\varepsilon = Wcct / Wtm$$

Se ad esempio la misura della potenza assorbita dal primario ha portato ad un valore di Wtm = 29.8 W, essendo Wcct = 25.9 W, si ha:

$$\varepsilon = Wcct / Wtm = 25.9 \text{ W} / 29.8 \text{ W} = 0.86$$

pari all' 86% .

## 8.6 Esempio di progetto di alimentatore tri-monofase

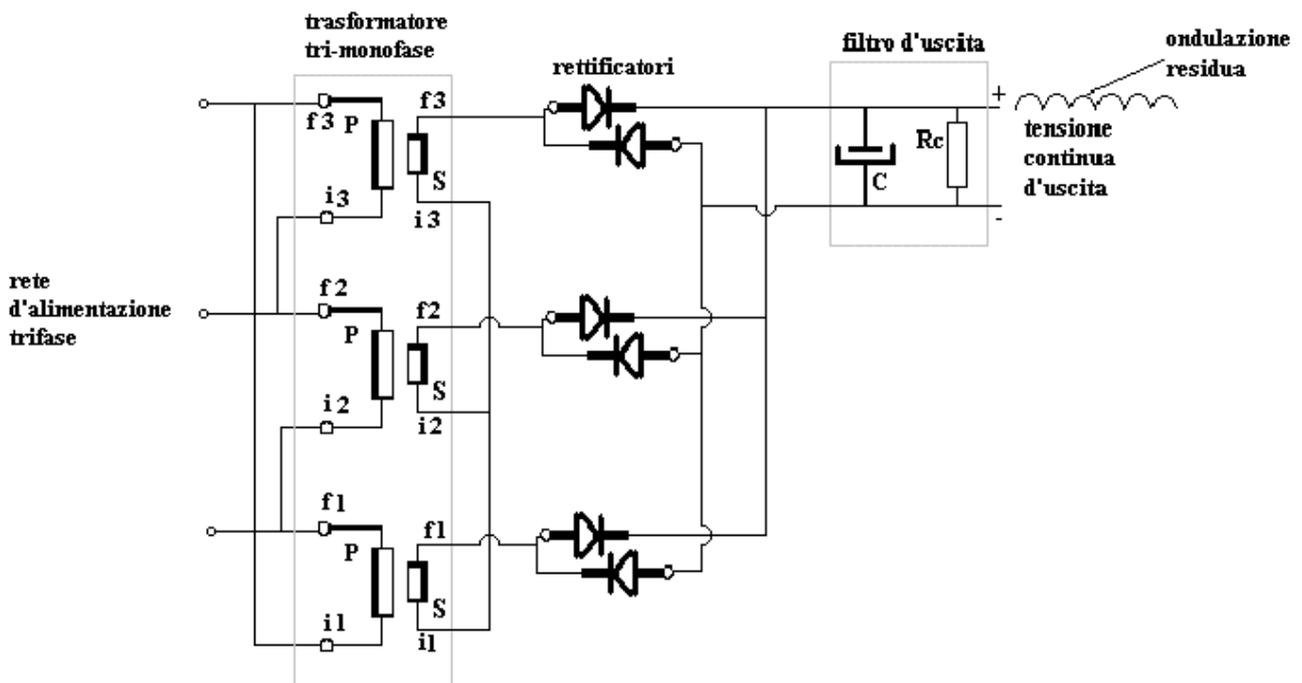
Prima d'iniziare il progetto dell'alimentatore tri-monofase è necessario dare qualche semplice spiegazione sulla sua struttura in modo, poi, da poter richiamare, in fase di calcolo, i diversi componenti che lo costituiscono.

La tecnica costruttiva degli alimentatori tri-monofase consente la realizzazione, al bisogno, di gruppi d'alimentazione in grado di essere collegati a reti primarie trifasi.

La possibilità di realizzare alimentatori di questo tipo, non utilizzando trasformatori trifasi, peraltro non facilmente costruibili se non da specialisti, consente al progettista di sistemi elettronici di avere un ulteriore grado di libertà in più per sviluppare le sue apparecchiature.

Lo schema elettrico di questo tipo di alimentatore è molto diverso da quello monofase mostrato in figura 8.1; vediamone un esempio in figura 8.9.

figura 8.9



Nello schema, a sinistra, è rappresentato il trasformatore tri-monofase composto da tre trasformatori, questi sono del tutto identici a quelli che abbiamo progettato nel paragrafo precedente. I primari dei trasformatori sono collegati a “triangolo” unendo tra loro gli inizi (i) e le fini (f) degli avvolgimenti secondo la sequenza:  $i1 - f3$  ;  $f1 - i2$  ;  $f2 - i3$ .

I secondari dei trasformatori sono collegati a “stella” unendo tra loro gli inizi (i) degli avvolgimenti:  $i1 - i2 - i3$ .

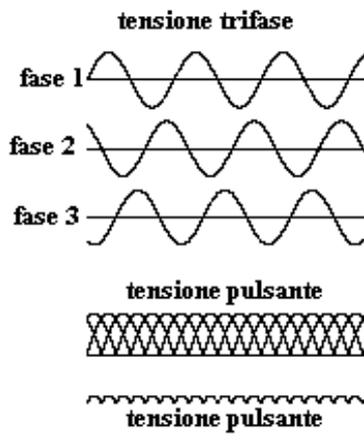
I rettificatori sono disposti, a coppie, all'uscita di ciascuno dei rami a stella dei secondari, tutti i catodi sono collegati assieme e forniscono la tensione pulsante alla cellula di filtro; tutti gli anodi sono collegati tra loro e chiudono il ritorno della cellula.

In questo tipo di alimentatore non è necessario che la cellula soddisfi la disuguaglianza  $\omega RC > 100$ , come invece era indispensabile negli alimentatori monofase con filtro ad ingresso capacitivo.

Il compito della cellula di filtro non è quello di mediare tra i minimi ed i massimi della tensione pulsante d'uscita del rettificatore, come avviene negli alimentatori monofase, ma di attenuare l'ondulazione residua. Infatti, mentre nei primi gli impulsi della tensione pulsante, essendo adiacenti l'uno all'altro, variano da 0 alla tensione di picco, nell'alimentatore tri-monofase, illustrato in figura 8.9, gli impulsi si sovrappongono e la tensione risultante varia tra il livello

minimo ( 0.86 del picco) a quello massimo del picco ( si veda figura 8.10) con un'ondulazione fissa del 15% di  $V_c$ .

figura 8.10



In alto di figura 8.10 sono tracciate le tensioni presenti ai tre secondari, sfasate l'un l'altra di  $120^\circ$ ; di seguito è disegnata la tensione pulsante ottenuta all'uscita dalle tre coppie di diodi rettificatori nella quale sono rese visibili, a scopo dimostrativo, le sovrapposizioni dei diversi impulsi. Infine la forma d'onda reale in uscita dai diodi, senza la grafica dimostrativa della sovrapposizione, mostra l'ondulazione sovrapposta alla tensione continua generata dalla rettificazione esafase.

In questo tipo di circuito la frequenza dell'ondulazione d'uscita è il sestuplo della frequenza della rete trifase d'alimentazione; ciò rappresenta un vantaggio ai fini della riduzione dell'ondulazione stessa, che, a parità di valori di  $C$  e  $R_c$ , viene maggiormente attenuata.

Date le particolari caratteristiche dell'alimentatore tri-monofase, il progetto dello stesso non richiede più il ricorso alle curve per la determinazione di  $E_p/E_{dc}$ ,  $R_s/R_c$ ,  $I_{ps}/I_{cm}$ , ma si articola in modo più semplice come vedremo in seguito.

L'alimentatore, riportato in figura 8.9, è disegnato, per semplicità grafica, con un solo gruppo d'uscita che fornisce tensione continua; in realtà questi alimentatori, così come quelli monofase, possono essere dotati di numerosi gruppi d'uscita aumentando, su ciascuno dei tre trasformatori, il numero dei secondari da collegare a stella; naturalmente ad ogni nuova terna secondaria dovrà far capo un gruppo di sei rettificatori ed un condensatore  $C$  di filtro.

Vista la composizione dell'alimentatore, procediamo al progetto secondo le seguenti specificazioni:

**Specificazioni di progetto:**

Sia da progettare un alimentatore tri-monofase avente le seguenti caratteristiche:

Trasformatori con primario e 1 secondario.

Rettificatore a sei diodi.

Filtro ad ingresso capacitivo.

Tensione di rete al primario  $V_p = 115 V_{eff}$

Frequenza di rete  $f = 60 \text{ Hz}$

$B = 15000 \text{ Gauss}$

Dati della tensione e della corrente fornita al carico:

$V_c = 40 V_{cc}$   $I_c = 1.6 \text{ A}$

Ondulazione massima  $< 0.02 V_{pp}$

Sovra elevazione di temperatura  $\Delta T < 45^\circ\text{C}$

### **Calcolo delle potenze:**

#### **Potenza richiesta dal carico:**

La potenza richiesta dal carico si calcola con l'espressione:

$$W_{cc} = V_c * I_c$$

$$W_{cc} = V_c * I_c = 40 V_{cc} * 1.6 A \approx 64 W$$

#### **Potenza richiesta da ciascun primario:**

Nei trasformatori per alimentatori tri-monofase la potenza totale istantanea ( $W_t$ ) richiesta è suddivisa su due trasformatori. La potenza  $W_{t3}$  su ciascun trasformatore dovrà pertanto essere calcolata non soltanto in funzione della potenza ( $W_{cc}$ ) richiesta dal carico, ma anche tenendo conto della nuova configurazione circuitale che vede la potenza istantanea divisa soltanto su due trasformatori; assumendo un rendimento  $\varepsilon = 80 \%$  la formula per il calcolo di  $W_{t3}$  è la seguente:

$$W_{t3} = 0.6 * W_{cc}$$

quindi si ha:

$$W_{t3} = 0.6 * W_{cc} = 0.6 * 64 \approx 39 W$$

Le procedure di calcolo che seguono si riferiscono sempre ad un solo trasformatore dei tre identici necessari per l'alimentatore tri-monofase.

### **Scelta del nucleo di ferro:**

La scelta del nucleo del trasformatore viene fatta su doppie coppie di ferri al silicio con grani orientati, aventi forme ad U da utilizzare come già mostrato in figura 8.2.

La scelta delle dimensioni dei nuclei deve essere fatta in funzione della potenza elettrica totale richiesta ( $W_{t3}$ ) dall'elenco dei ferri disponibili; supponiamo che l'elenco sia quello sotto riportato, per ferri che possono lavorare con un'induzione massima di  $B = 17000$  Gauss:

Sigla costruttore del tipo di nucleo	Potenza massima W	Sezione Cmq	Perdite nel ferro W
T13	41	2.42	0.66
T19	60	3.54	0.98
T25	75	4.66	1.28
T32	95	5.96	1.64

Al fine di mantenere la sovra elevazione di temperatura sotto il valore indicato nelle specifiche, scegliamo un nucleo con una potenza di poco superiore alla  $W_{t3}$  calcolata: il tipo T19 che ha una sezione di 3.54 cmq consente una dissipazione massima di 60 W.

Per un nucleo di queste dimensioni il fornitore indica la sezione (Sl) lorda del rocchetto sul quale avvolgere primari e secondari :  $Sl = 643 \text{ mmq}$

Possiamo quindi concludere con l'indicazione dei dati acquisiti:

-Nucleo tipo T19

-Sezione  $S_f = 3.54 \text{ cmq}$

-Induzione  $B = 15000 \text{ Gauss}$

-Sezione lorda del rocchetto  $Sl = 643 \text{ mmq}$

**Calcolo delle caratteristiche dell'avvolgimento primario:**

**Numero spire primario:**

Il calcolo del numero delle spire ( $N_p$ ) del primario si esegue con la formula:

$$N_p = V_{pe} * 10^8 / (4.44 * B * f * S_f)$$

Essendo  $V_{pe} = 115 V_{eff}$ ,  $B = 15000$  Gauss,  $f = 60$  Hz,  $S_f = 3.54$  cmq abbiamo:

$$N_p = 115 V_{eff} * 10^8 / (4.44 * 15000 * 60 \text{ Hz} * 3.54 \text{ cmq}) \approx 813 \text{ spire}$$

**Sezione netta del rocchetto:**

Assumendo come coefficiente di riempimento ( $k_r = 0.35$ ), valore consolidato per trasformatori di piccole dimensioni, si calcola la sezione netta ( $S_n$ ) disponibile sul rocchetto:

Essendo  $K_r = 0.35$ ,  $S_l = 643$  mmq, abbiamo:

$$S_n = 0.35 * 643 \text{ mmq} = 225 \text{ mmq}$$

**Sezione netta dedicata al primario:**

E' buona norma assegnare la sezione netta disponibile per metà al primario e per l'altra metà al secondario; la sezione netta del primario sarà :

$$S_{ap} = S_n / 2$$

Essendo  $S_n = 225$  mmq, abbiamo:

$$S_{ap} = 225 \text{ mmq} / 2 \approx 112 \text{ mmq}$$

**Diametro del filo per l'avvolgimento del primario:**

Il diametro del filo per l'avvolgimento del primario si calcola con la formula:

$$D_p = 2 * \sqrt{[ S_{ap} / ( N_p * \pi ) ]}$$

Essendo  $S_{ap} = 112$  mmq,  $N_p = 813$  spire, abbiamo:

$$D_p = 2 * \sqrt{[ 112 \text{ mmq} / ( 813 * 3.14 ) ]} = 0.41 \text{ mm} \text{ (da arrotondare a } 0.40 \text{ mm)}$$

**Lunghezza della spira media:**

Dalle dimensione del rocchetto date dal costruttore, facendo la media tra il perimetro della parte inferiore e della parte superiore, si ha :

$$S_{me} \approx 15 \text{ cm} = 0.15 \text{ m}$$

**Resistenza dell'avvolgimento primario:**

La resistenza dell'avvolgimento primario ( $R_p$ ) si calcola con la formula:

$$R_p = S_{me} * N_p * R_{fp}$$

dove  $R_{fp}$  è la resistenza del filo del primario espressa in ohm / metro

R<sub>fp</sub> si ricava, o dalle tabelle del costruttore del filo, o da una misura eseguita su di uno spezzone di conduttore di alcuni metri; nel nostro caso, per filo del diametro di 4 decimi di millimetro, si ha R<sub>fp</sub> = 0.145 ohm/metro; con questo dato si calcola infine R<sub>p</sub>.

Essendo S<sub>me</sub> = 0.15 m, N<sub>s</sub> = 813 spire, R<sub>fp</sub> = 0.145 ohm/metro abbiamo:

$$R_p = S_{me} * N_p * R_f = 0.15 \text{ m} * 813 \text{ spire} * 0.145 \text{ ohm/m} \approx 18 \text{ ohm}$$

**Caduta di tensione sul primario:**

La caduta di tensione C<sub>dtp</sub> sul primario, dovuta alla resistenza dell'avvolgimento, è data da:

$$C_{dtp} = R_p * W_{t3}/V_p$$

$$C_{dtp} = R_p * W_{t3}/V_p = 18 \text{ ohm} * 39 \text{ W}/115 \text{ V}_{eff} = 6.1 \text{ V}_{eff}$$

Con un rapporto di perdita (rdp) di tensione pari a:

$$rdp = V_p / (V_p - C_{dtp}) = 115 \text{ V}_{eff} / (115 \text{ V}_{eff} - 6.1 \text{ V}_{eff}) = 1.05$$

### ***Determinazione delle caratteristiche e scelta dei rettificatori:***

Le caratteristiche dei rettificatori i devono essere le seguenti:

**Calcolo della corrente di picco massima:**

Nei rettificatori esafase la corrente di picco (I<sub>p</sub>) coincide con la corrente erogata sul carico; abbiamo quindi:

Corrente nel carico I<sub>c</sub> = 1.6 A

$$I_p = I_{cc} = 1.6 \text{ A}$$

I diodi che andremo a selezionare dovranno avere una corrente I<sub>f</sub> superiore ad I<sub>p</sub>.

**Valutazione della tensione inversa massima:**

Per calcolare quale tensione alternata inversa sarà applicata ai rettificatori, non considerando al momento la caduta di tensione sui diodi, è necessario prendere in considerazione la tensione continua applicata al carico. La tensione alternata di picco V<sub>ca(picco)</sub>, che il secondario dovrà fornire per ottenere la tensione continua voluta, è data da:

$$V_{ca(picco)} = k * V_c$$

dove k = 1.15

quindi:

essendo V<sub>c</sub> = 40 V<sub>cc</sub>

$$V_{ca(picco)} = V_c * k = 40V_{cc} * 1.15 = 46V_p$$

I diodi che andremo a selezionare dovranno avere una tensione inversa superiore a V<sub>ca (picco)</sub>.

**Selezione del tipo di diodi:**

I diodi da impiegare possiamo sceglierli, tra i tanti disponibili a catalogo, nel tipo 40266 che presenta le seguenti caratteristiche:

$$I_f = 2 \text{ A} > I_p$$

$$V_r = 100 \text{ V} > V_{ca(picco)}$$

**Calcolo della caduta di tensione ai capi dei diodi:**

La valutazione della caduta di tensione su di un diodo ( $V_f$ ), necessaria per il successivo calcolo dei secondari del trasformatore, deve essere fatta utilizzando le curve caratteristiche ( $I_p, V_f$ ) date a catalogo; per i diodi selezionati queste risultano:

per il tipo 40266 :  $I_p = 1.6 \text{ A}$  ;  $V_f = 0.85 \text{ V}$  ; da queste il calcolo della caduta di tensione  $V_{dd}$  su due diodi:

$$V_{dd} = 2 * V_f = 1.7 \text{ V}$$

**Calcoli preliminari per la definizione delle caratteristiche del secondario:**

Dallo schema di figura 8.9 si vede che la tensione ai rettificatori è fornita da coppie di secondari disposti in serie; è pertanto necessario conoscere, approssimativamente, la caduta di tensione su questi prima di procedere al calcolo degli elementi precisi di un avvolgimento.

La caduta di tensione sui secondari è determinata dalla loro resistenza ohmica  $R_{sa}$  che andiamo ora a calcolare mediante una serie di passaggi:

**Calcolo di  $V_{sa}$ :**

Si calcola la tensione approssimata ( $V_{sa}$ ) che il secondario deve fornire:

- 1) Si ipotizza un rendimento del trasformatore dell'80%
- 2) Si calcola la tensione approssimata  $V_{sa}$  con la formula:

$$V_{sa} = (V_c + V_{dd}) * 0.56$$

Essendo  $V_c = 40 \text{ Vcc}$  e  $V_{dd} = 1.7 \text{ V}$  si ha:

$$V_{sa} = (V_c + V_{dd}) * 0.56 = (40 \text{ Vcc} + 1.7 \text{ V}) * 0.56 = 23.3 \text{ Veff}$$

**Calcolo del diametro approssimato del filo del secondario:**

Per il calcolo del diametro del filo secondario si applica l'espressione:

$$D_s = D_p * \sqrt{[(0.5 * W_{cc} / W_{t3}) * (V_{pe} / V_{sa})]}$$

Essendo  $W_{cc} = 64 \text{ W}$ ;  $W_{t3} = 39 \text{ W}$ ;  $D_p = 0.4 \text{ mm}$ ;  $V_{pe} = 115 \text{ Veff}$ ;  $V_{sa} = 23.3 \text{ Veff}$ , si ha:

$$\begin{aligned} D_s &= D_p * \sqrt{[(0.5 * W_{cc} / W_{t3}) * (V_{pe} / V_{sa})]} = \\ &= 0.4 \text{ mm} * \sqrt{[(0.5 * 64 \text{ W} / 39 \text{ W}) * (115 \text{ Veff} / 23.3 \text{ Veff})]} = 0.8 \text{ mm} \end{aligned}$$

La resistenza del filo ora calcolato, data dal costruttore, risulta:

$$R_{sf} = 0.036 \text{ ohm/metro}$$

**Calcolo del numero approssimato di spire del secondario:**

Si calcola il numero delle spire/volt ( $N_v$ ) secondo l'espressione:

$$N_{sv} = N_p / V_p$$

$$N_v = N_p / V_p = 813 / 115 \text{ Veff} = 7.06 \text{ spire/volt}$$

Quindi il numero ( $N_{sa}$ ) approssimato di spire del secondario:

$$N_{sa} = N_v * V_{sa}$$

Essendo  $N_v = 7.06$  spire/volt;  $V_{esa} = 23.3$  Veff, si ha:

$$N_{sa} = 7.06 \text{ spire/volt} * 23.3 \text{ Veff} \approx 165 \text{ spire}$$

**Calcolo di Rsa:**

Il calcolo della resistenza approssimata del secondario si calcola infine con l'espressione:

$$R_{sa} = S_{me} * N_{sa} * R_{fs}$$

Essendo  $S_{me} = 0.15$  m;  $N_{sa} = 165$  spire;  $R_{sf} = 0.036$

si ha  $R_{sa} = 0.15 \text{ m} * 165 \text{ spire} * 0.036 = 0.88 \text{ ohm}$

**Calcolo della caduta di tensione di due secondari in serie:**

La caduta di tensione ai capi di due secondari in serie si calcola come segue:

$$C_{dts} = 2 * R_{sa} * I_c$$

$$C_{dts} = 2 * 0.88 \text{ ohm} * 1.6 \text{ A} = 2.8 \text{ Vcc}$$

**Calcoli definitivi dell'avvolgimento secondario:**

Con il valore di  $C_{dts}$  e  $V_{dd}$  calcolati in precedenza procediamo ora ai calcoli per la definizione dell'avvolgimento secondario:

**Calcolo della tensione continua  $V_{ncc}$  necessaria per compensare le perdite  $V_{dd}$  e  $C_{dt}$ :**

$$V_{ncc} = V_c + C_{dts} + V_{dd}$$

$$V_{ncc} = V_c + C_{dts} + V_{dd} = 40 \text{ Vcc} + 2.8 \text{ Vcc} + 1.7 \text{ Vcc} = 44.5 \text{ Vcc}$$

**Calcolo di Vse:**

La tensione effettiva  $V_{se}$  che il secondario deve fornire, tenendo conto della caduta di tensione sul primario, è data dalla formula:

$$V_{se} = V_{ncc} * 0.471 * r_{dp}$$

$$V_{se} = 44.5 \text{ Vcc} * 0.471 * 1.05 = 22 \text{ V eff}$$

**Calcolo del numero di spire del secondario:**

Il numero delle spire del secondario si determina con la formula:

$$N_s = (N_p * V_{se}) / V_{pe}$$

Essendo  $N_p = 813$  spire;  $V_{pe} = 115$  Veff;  $V_{se} = 22$  Veff, abbiamo:

$$N_s = (N_p * V_{se}) / V_{pe} = (813 \text{ spire} * 22 \text{ Veff}) / 115 \text{ Veff} \approx 155 \text{ spire}$$

**Calcolo del diametro finale del filo del secondario:**

Per il calcolo del diametro del filo secondario si applica l'espressione:

$$D_s = D_p * \sqrt{[(0.5 * W_{cc} / W_{t3}) * (V_{pe} / V_{se})]}$$

Essendo  $W_{cc} = 64 \text{ W}$ ;  $W_{t3} = 39 \text{ W}$ ;  $D_p = 0.4 \text{ mm}$ ;  $V_{pe} = 115 \text{ Veff}$ ;  $V_{se} = 22 \text{ Veff}$ , si ha:

$$D_s = D_p * \sqrt{[(0.5 * W_{cc} / W_{t3}) * (V_{pe} / V_{se})]} = \\ = 0.4 \text{ mm} * \sqrt{[(0.5 * 64 \text{ W} / 39 \text{ W}) * (115 \text{ Veff} / 22 \text{ Veff})]} = 0.82 \text{ mm}$$

Data la piccola differenza tra  $V_{esa}$  e  $V_{es}$  il diametro calcolato ora coincide, praticamente, con il diametro approssimato calcolato in precedenza.

### **Calcolo del filtro capacitivo:**

Dato che in questo tipo di alimentatore la funzione del filtro capacitivo è indirizzata soltanto all'attenuazione dell'ondulazione possiamo scrivere la formula di calcolo di C come segue:

$$C \approx 0.4 * 10^6 / (f * R_c * pc)$$

Dove

- C = capacità di filtro in  $\mu\text{F}$
- f = frequenza della rete trifase in Hz
- $R_c$  = resistenza di carico in ohm
- pc = percentuale d'ondulazione voluta

Nel nostro progetto le specifiche indicano come tensione d'ondulazione massima  $V_{ond} = 0.02 V_{pp}$  su  $V_c = 40 V_{cc}$  di tensione sul carico; per soddisfare tale dato dobbiamo anzitutto calcolare la percentuale d'ondulazione rispetto a  $V_c$  con l'espressione:

$$pc = 100 * V_{ond} / V_c$$

quindi  $pc = 100 * 0.02 V_{pp} / 40 V_{cc} = 0.05\%$

e di seguito calcolare C:

$$C = 0.4 * 10^6 / (60 \text{ Hz} * 25 \text{ ohm} * 0.05) = 5333 \mu\text{F} \text{ (da arrotondare a } 5600 \mu\text{F)}$$

### **Calcolo della corrente d'ondulazione:**

Il condensatore deve poter sopportare la corrente alternata  $I_{co}$  dovuta alla presenza dell'ondulazione d'uscita  $V_{ond}$ : tale corrente si calcola mediante l'espressione:

$$I_{co} = V_{ond} * 12 * \pi * f * C * 1.1$$

si ha quindi:

$$I_{co} = V_{ond} * 12 * \pi * f * C * 1.1 = 0.02 * 12 * 3.14 * 60 \text{ Hz} * 5600 \mu\text{F} * 1.1 = 0.27 \text{ A}$$

Dato che i condensatori elettrolitici di filtro, tipo professionale, possono lavorare normalmente con correnti d'ondulazione superiori a  $2.5 \text{ A}$ , questi saranno tutti adatti per sostenere le correnti d'ondulazione sopra calcolata.

**Verifica della temperatura di lavoro del trasformatore:**

Per i dati di specifica la sopraelevazione della temperatura di ciascun trasformatore deve essere inferiore a 55° C, verifichiamola:

Il calcolo inizia dalla valutazione delle perdite:

**Perdite di potenza nel ferro:**

Le perdite nel ferro fornite dal costruttore per il nucleo T19 sono riportate nella tabella utilizzata per la scelta del ferro e risultano  $P_f = 0.98W$ .

**Perdite di potenza negli avvolgimenti:**

La dissipazione su ciascun primario viene calcolata sulla potenza media e non sulla potenza istantanea, le perdite si suddividono pertanto su tre trasformatori; assumendo un rendimento  $\varepsilon = 80\%$  la formula per il calcolo di  $P_{pr}$  è la seguente:

$$P_{pr} = R_p * (0.39 * W_{t3} / V_{pe})^2$$

Essendo  $R_p = 18 \text{ ohm}$ ,  $W_{t3} = 39 \text{ W}$ ,  $V_{pe} = 115 \text{ V eff}$ , si ha:

$$P_{pr} = 18 \text{ ohm} * (0.39 * 39 \text{ W} / 115 \text{ Veff})^2 = 0.31 \text{ W}$$

La perdita sull' avvolgimento secondario è data dall'espressione:

$$P_{se} = S_{me} * N_s * R_{fs} * I_c^2$$

Essendo  $S_{me} = 0.15 \text{ m/spira}$ ,  $N_s = 155 \text{ spire}$ ,  $R_{fs} = 0.036 \text{ ohm/metro}$ ,  $I_c = 1.6 \text{ A}$ , si ha:

$$P_{se} = 0.15 \text{ m/spira} * 155 \text{ spire} * 0.036 \text{ ohm/metro} * 1.6A^2 = 2.1W$$

La potenza dissipata totale è la somma delle tre sopra calcolate:

$$P_{dt} = P_f + P_{pr} + P_{se}$$

$$P_{dt} = 0.98W + 0.31 \text{ W} + 2.1 \text{ W} = 3.39 \text{ W}$$

Per la determinazione della sopra elevazione di temperatura del trasformatore è ora necessario utilizzare il diagramma di figura 8.4 dopo aver calcolato il rapporto  $j_k$ :

$$j_k = P_{dt} / (2.9 * S_f)$$

essendo  $S_f = 3.54 \text{ cmq}$ , si ha :

$$j_k = 3.39 \text{ W} / (2.9 * 3.54) = 0.33$$

Con il valore di  $j_k = 0.33$  posto in ascissa del diagramma di figura 8.4 si ha infine, in ordinata, il valore cercato di  $\Delta t = 40^\circ\text{C}$ .

***Suggerimenti per la costruzione del trasformatore :***

La costruzione del trasformatore deve essere fatta seguendo, in successione, le sotto indicate norme pratiche non dimenticando che ne devono essere costruiti tre uguali:

- 1) Gli avvolgimenti del filo di rame smaltato sul rocchetto non devono mai essere fatti alla "rinfusa".
- 2) Gli avvolgimenti devono essere piazzati sul rocchetto, a spire contigue, strato dopo strato, si da riempire, ordinatamente, tutto lo spazio disponibile; tra uno strato e il successivo deve essere interposta una striscia di carta isolante sottile adatta all'uso, che ha il duplice scopo di isolare gli strati l'uno dall'altro e di creare una superficie piana sulla quale avvolgere lo strato successivo.
- 3) L'avvolgimento primario, generalmente, deve essere avvolto per primo; finito tale avvolgimento deve essere posta una striscia sottile di materiale isolante per creare una netta separazione tra primario e secondari.
- 4) Gli estremi degli avvolgimenti devono fuoriuscire dal rocchetto coperti con adatte calze isolanti leggere di seta o di materiali sintetici.
- 5) Gli estremi degli avvolgimenti, che escono dal pacco, devono essere il più lunghi possibile onde agevolare le operazioni di collegamento sia dei tre trasformatori tra loro, sia una volta inseriti i tre pacchi nel contenitore.
- 6) L'assemblaggio del trasformatore, rocchetto e coppie dei nuclei di ferro, deve essere completato da idonee fascette per serrare energicamente i ferri ad U tra di loro in modo che le teste dei ferri stessi combacino perfettamente; questa operazione porta alla realizzazione del "pacco di trasformazione".
- 7) Il pacco completato deve essere controllato sotto tensione per vedere se il funzionamento è corretto mediante verifica della tensione alternata secondaria secondo i dati di progetto.
- 8) Quando è richiesto, non è il caso del nostro progetto, **all'esterno** del trasformatore, deve essere avvolta una striscia di rame larga quanto è largo il trasformatore, disposta nello stesso senso degli avvolgimenti, per creare una sorta di spira di larga sezione con la funzione di schermo elettromagnetico, detta spira deve essere poi saldata, lembo con lembo, per creare un corto circuito della tensione dovuta all'energia magnetica dispersa.
- 9) Il pacco deve essere impregnato a caldo, con una resina isolante liquida, per garantire l'isolamento degli avvolgimenti dagli agenti atmosferici esterni.
- 10) Il tre pacchi completi, ottenuti dopo l'assemblaggio ed il controllo, devono essere sistemati in un unico contenitore di metallo di giusta misura, ed ivi collegati secondo lo schema elettrico di figura 8.9. Dopo il collegamento tra i tre pacchi si deve versare nel contenitore una speciale resina liquida che, una volta solidificatasi, servirà da veicolo di trasmissione del calore dei tre trasformatori verso l'eterno; dal contenitore dovranno fuoriuscire, mediante

adatti passanti isolanti i terminali degli avvolgimenti: il primario dovrà uscire da un lato ed il secondario dalla parte opposta.

**Collaudo dell'alimentatore:**

L'alimentatore, a montaggio ultimato, deve essere collaudato eseguendo i seguenti controlli:

Controllo della tensione continua con carico simulato.

Controllo dell'ondulazione residua sul carico.

Controllo dell'incremento di temperatura.

Vediamoli nell'ordine:

**Controllo delle tensioni continue con carichi simulati.**

Si deve collegare all'alimentatore la resistenza di carico per poter misurare ai suoi capi la tensione impostata a progetto; i dati rilevati dovranno essere contenuti entro una tolleranza del +/- 5% rispetto ai valori calcolati.

Valori di tensione, di resistenza, potere di dissipazione del carico, sono riportati nella tabella seguente:

Tensione Secondario	Volt c.c. calcolati	Resistenza di carico in ohm	Potere di dissipazione del carico simulato *	Tolleranze sulle tensioni misurate in Vcc
Vc	40	25	50W	38 - 42

**\* Il potere di dissipazione del carico simulato deve essere superiore alla potenza fornita dall'alimentatore per non avere eccessive sopraelevazioni termiche sui carichi ad evitare ustioni per contatti accidentali con il corpo.**

La tensione deve essere misurata con un voltmetro di precisione controllando, contemporaneamente, che la tensione alternata trifase applicata al primario sia di 115 Veff.

**Controllo dell'ondulazione residua sul carico:**

La tensione di ondulazione sul carico deve essere misurata con il carico collegato come al punto precedente, il valore dovrà essere inferiore a  $V_{ond} = 0.02 V_{pp}$ .

La misura della tensione di ondulazione deve essere eseguita con un oscilloscopio disposto con l'ingresso in corrente alternata.

**Controllo dell'incremento di temperatura:**

Il controllo della temperatura del trasformatore deve essere eseguito mediante due misure di resistenza (Rp1 e Rp2) da effettuarsi, a piacere, su due fasi qualsiasi dell'avvolgimento primario. Si osservi che nei trasformatori tri-monofasi del tipo progettato la resistenza ohmica Rp1, che si misura tra due fasi, è pari a 2/3 della Rp di un singolo primario ( i tre primari sono collegati a triangolo ) quindi il valore di Rp1 a temperatura ambiente sarà:

$$R_{p1} = 2 * R_p / 3$$

cioè

$$R_{p1} = 2 * 18 \text{ ohm} / 3 = 12 \text{ ohm}$$

La prima misura si deve eseguire, con alimentatore scollegato dalla rete trifase di alimentazione, quando l'alimentatore è a temperatura ambiente da almeno 12 ore; si annota il valore di Rp1. Si accende l'alimentatore con tutti i carichi collegati e lo si tiene in funzionamento continuo per 4 ore, al termine del tempo stabilito si scollega dalla rete e si misura nuovamente la resistenza (Rp2) del primario; con i due valori della resistenza si calcola la sopraelevazione di temperatura con la formula:

$$\Delta t = (R_{p2} - R_{p1}) / (R_{p1} * 3.9 * 10^{-3})$$

Se ad esempio le due misure di resistenza hanno portato ai seguenti rilievi: Rp1 = 12 ohm e Rp2 = 13.6 ohm, si ha:

$$\Delta t = (R_{p2} - R_{p1}) / (R_{p1} * 3.9 * 10^{-3}) = (13.6 \text{ ohm} - 12 \text{ ohm}) / (12 \text{ ohm} * 3.9 * 10^{-3}) = 34.1^{\circ}\text{C}$$