

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 $V_p = 115 \text{ V}_{eff}$

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

$B = 15000 \text{ Gauss}$

Dati delle tensioni e delle correnti fornite ai carichi:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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:

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

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 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:

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

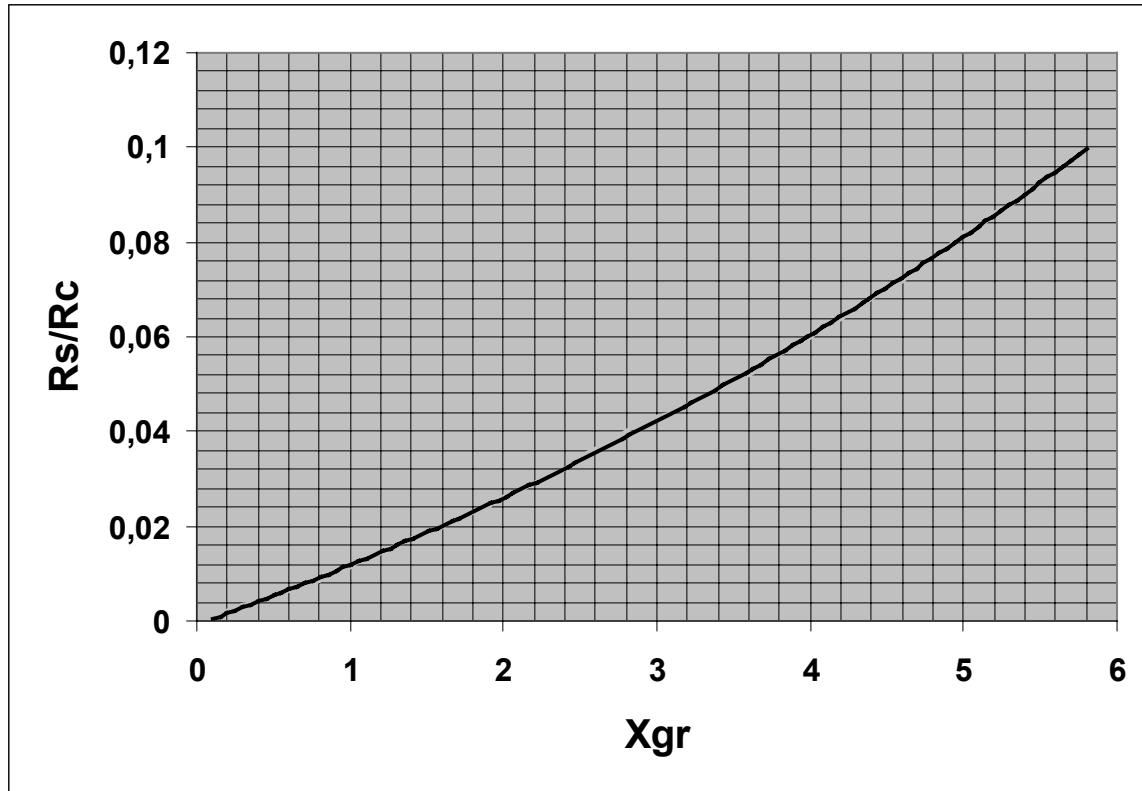
Essendo $W_{cct} = 25.9 \text{ W}$, $R_s = 32.2 \text{ ohm}$, $V_{pe} = 115 \text{ V}_{eff}$, abbiamo:

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

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.

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

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

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

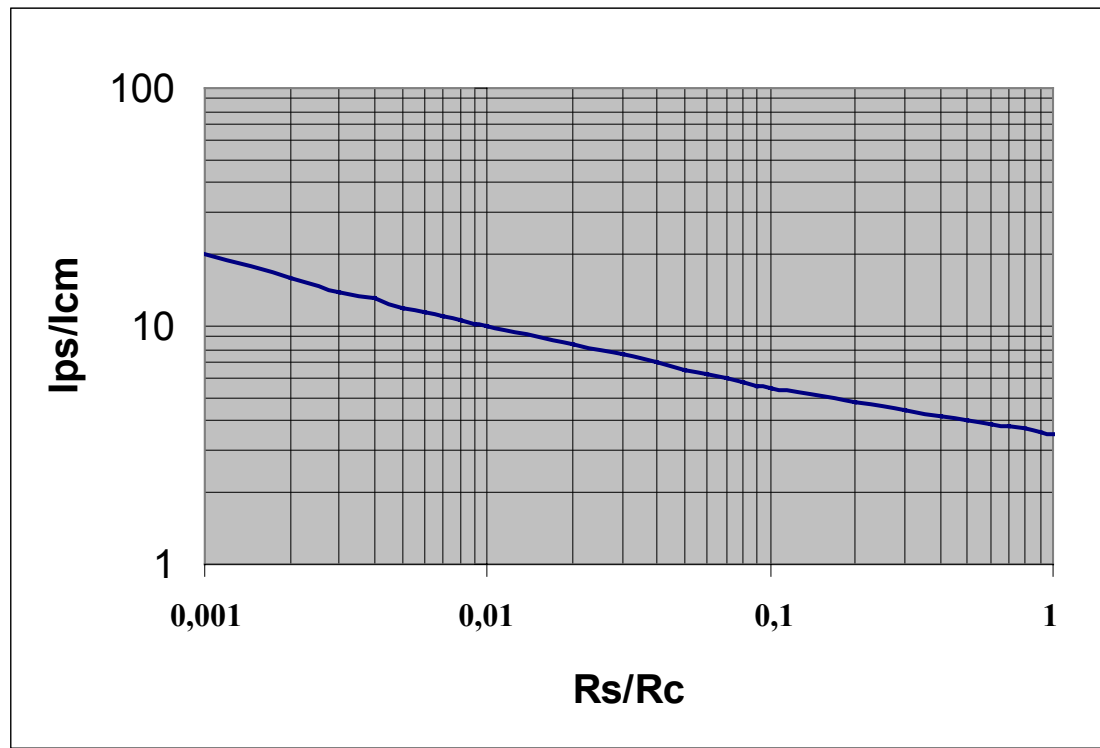
$$I_{cm4} = 0.075 \text{ A}$$

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

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

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_{mc} .

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 $V_{ca(picco)n}$.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 μF 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 μF 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:

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

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:

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

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:

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

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'esterno; 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:

$$\varepsilon = W_{cct} / W_{tm}$$

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:

$$\varepsilon = W_{cct} / W_{tm} = 25.9 \text{ W} / 29.8 \text{ W} = 0.86$$

pari all' 86% .