

ELETTRONICA INDUSTRIALE DI POTENZA

Esercitazione 4

PROGETTO CONVERTITORE C.A.-C.C. TRIFASE

Si chiede il dimensionamento di un convertitore c.a.-c.c. con collegamento a ponte, avente le seguenti caratteristiche:

- ✓ Tensione di alimentazione concatenata: $V_{1n} = 2000 \text{ V}$
- ✓ Tensione teorica continua (raddrizzata media a vuoto): $V_{do} = 450 \text{ V}$
- ✓ Corrente continua nominale: $I_{dn} = 1000 \text{ A}$
- ✓ Ciclo di carico I.E.C. tipo IV (vedere figura)
- ✓ Temperatura dell'aria di raffreddamento: $\theta_a = 50 \text{ }^\circ\text{C}$
- ✓ Sovracorrente di guasto: $I_{surge} = 7 \cdot I_{dn}$; $\Delta t_{surge} = 2 \text{ ms}$

Caratteristiche delle valvole disponibili:

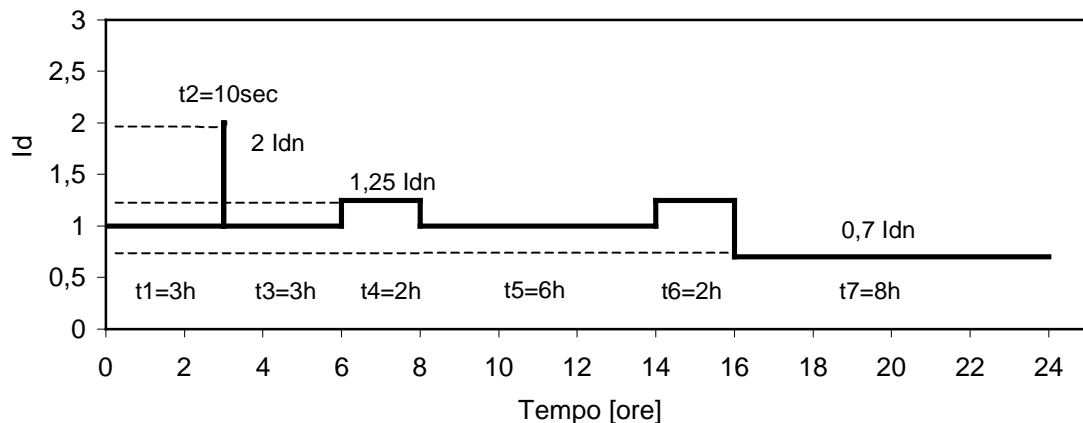
tipo	300/50	300/80	300/120	300/160
$V_{RWM}=V_{RRM}$	500	800	1200	1600
V_{RSM}	600	960	1440	1900

Altre caratteristiche: vedere esercitazione n°2

Caratteristiche del dissipatore: $R_{CA} = 0,15 \text{ }^\circ\text{C/W}$; $T_D = 500 \text{ s}$

Diagramma di carico:

Ciclo di carico I.E.C. tipo IV

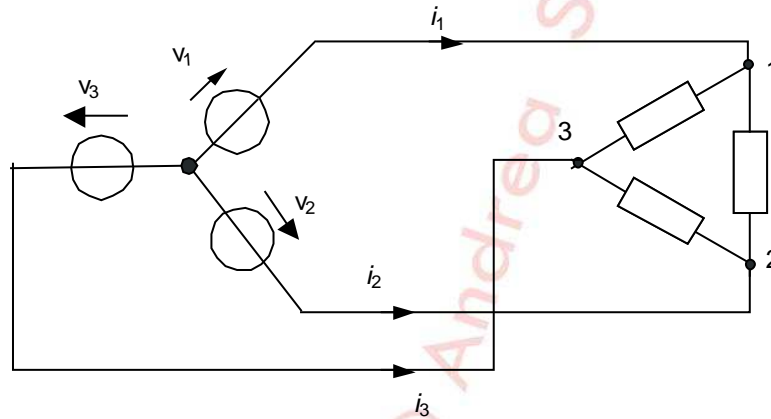


PUNTO 1)

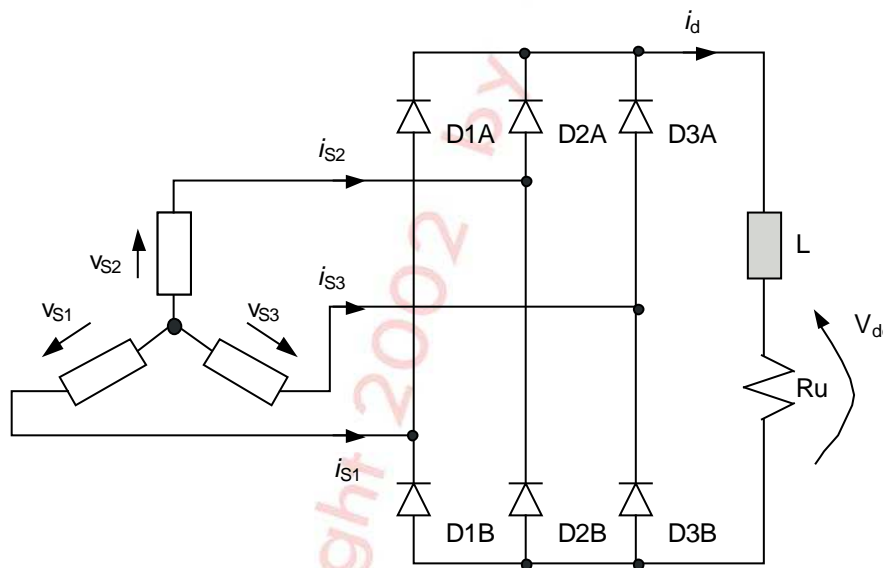
Determinare le forme d'onda delle correnti di fase di ingresso e di uscita del trasformatore

Possiamo dividere il convertitore in due lati, quello costituito dalla terna simmetrica di alimentazione e dal primario del trasformatore ed il lato formato dal secondario del trasformatore e dal raddrizzatore a ponte trifase.

Schema circuitale del lato primario:



Schema circuitale del lato secondario:



Gli avvolgimenti che nel trasformatore sono avvolti sulla stessa colonna, nello schema sono raffigurati con ugual inclinazione.

Le ipotesi che si faranno per lo studio del circuito sono:

- ✓ Induttanza L del carico di valore considerevole in modo da rispettare la condizione:

$$\frac{L}{R_u} \gg T_{rete}$$

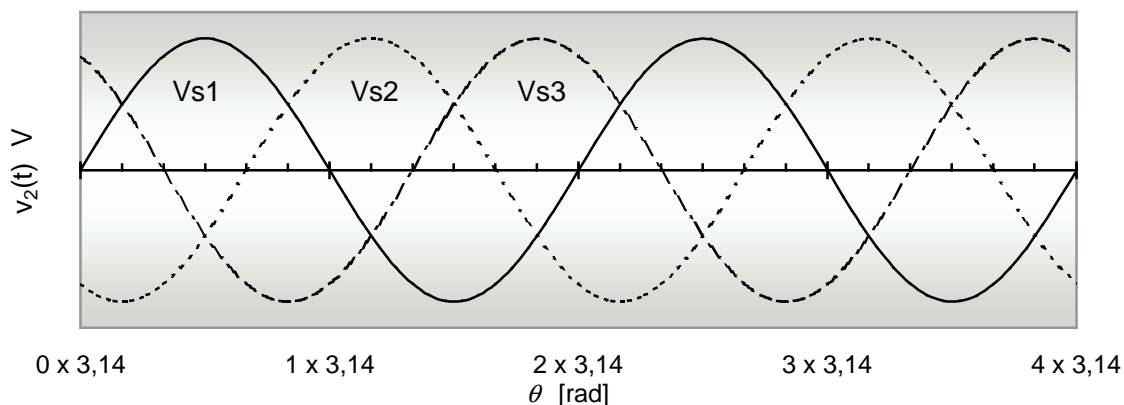
- ✓ In questo modo la corrente si può ritenere praticamente "spianata";
- ✓ Trasformatore ideale, ossia senza perdite e con rapporto di spire unitario;
- ✓ I diodi siano ideali, ossia non presentino caduta di tensione;
- ✓ L'alimentazione di rete sia una terna trifase simmetrica, quindi le tensioni sono uguali in modulo e sfasate fra di loro di 120° .

Per le ipotesi si può facilmente tracciare l'andamento delle tensioni stellate secondarie:

$$V_{s1}(t) = V_s \cdot \text{sen}(t)$$

$$V_{s2}(t) = V_s \cdot \text{sen}(t - \frac{2}{3}\pi)$$

$$V_{s3}(t) = V_s \cdot \text{sen}(t + \frac{2}{3}\pi)$$

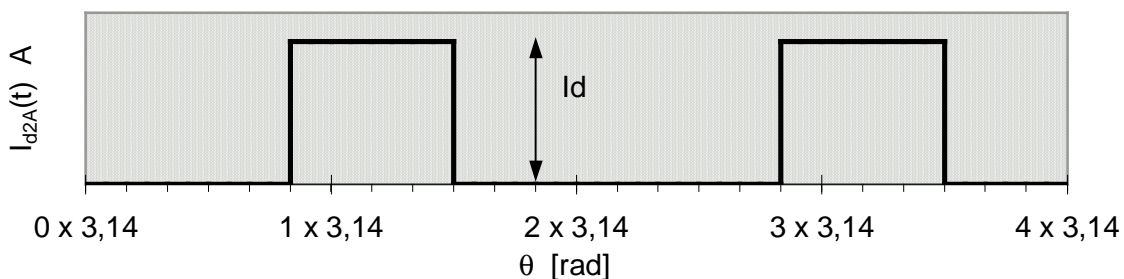
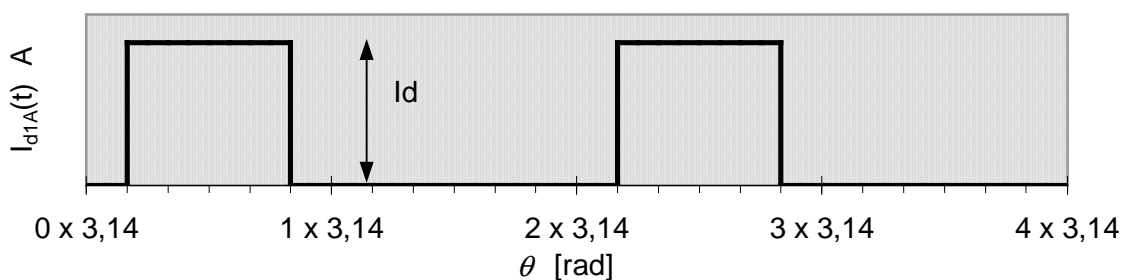


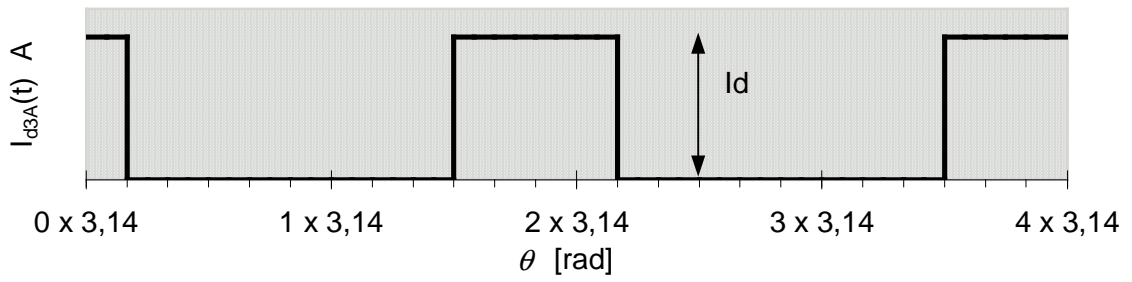
Per capire il funzionamento e ricavare le varie correnti nel convertitore si può pensare il circuito a ponte trifase come due raddrizzatori trifasi a semplice semionda collegati in serie.

La tensione fra il centro stella del secondario e il catodo dei diodi alti (quelli segnati con il pedice "A") è pari all'involuppo superiore delle sinusoidi, mentre invece la tensione fra il catodo dei diodi bassi (quelli contrassegnati con il pedice "B") e il centro stella è pari all'involuppo inferiore delle sinusoidi, entrambe le tensioni sono a periodicità 3 ma la seconda è sfasata di 60° rispetto alla prima. La *tensione applicata al carico* (V_d) è la somma istante per istante delle due precedenti, di conseguenza avrà periodicità 6 e valore efficace somma dei due valori efficaci.

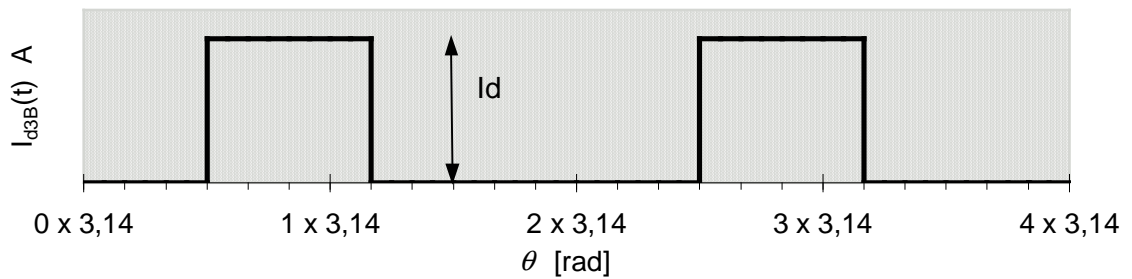
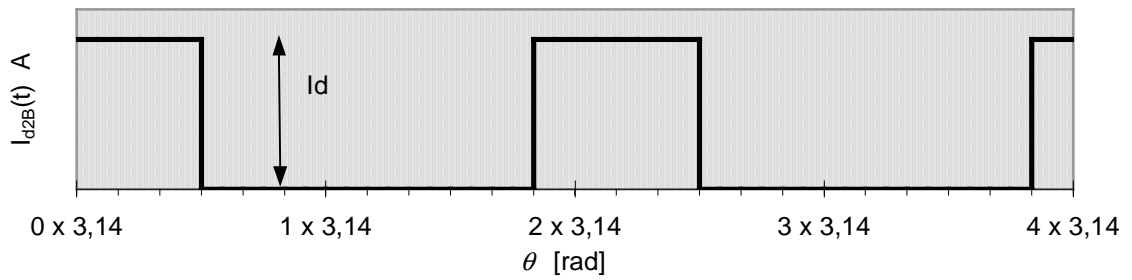
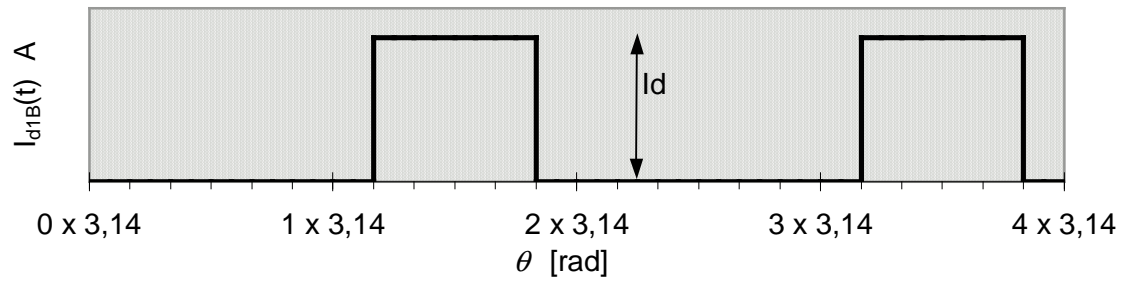
Analizziamo ora l'andamento delle correnti nei vari rami. Le correnti del ramo superiore si ricavano osservando che entra in conduzione il diodo al cui anodo è applicata la tensione maggiore in quell'istante, per i diodi del ramo inferiore il ragionamento è duale, ossia entra in conduzione il diodo a tensione catodica minore.

Correnti nei diodi del ramo alto:





Correnti nei diodi del ramo basso:

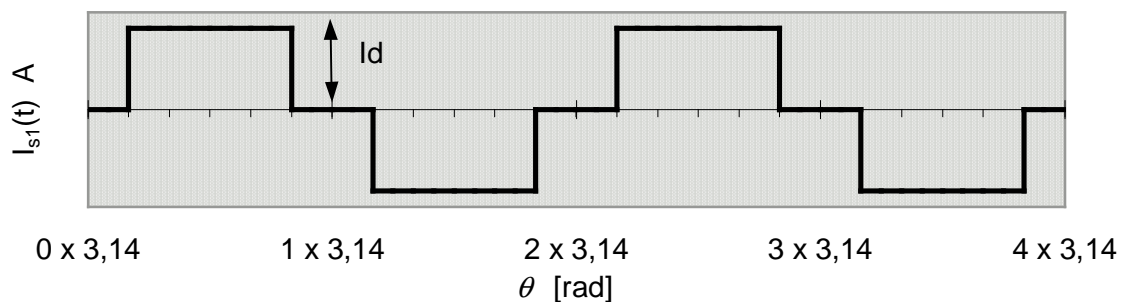


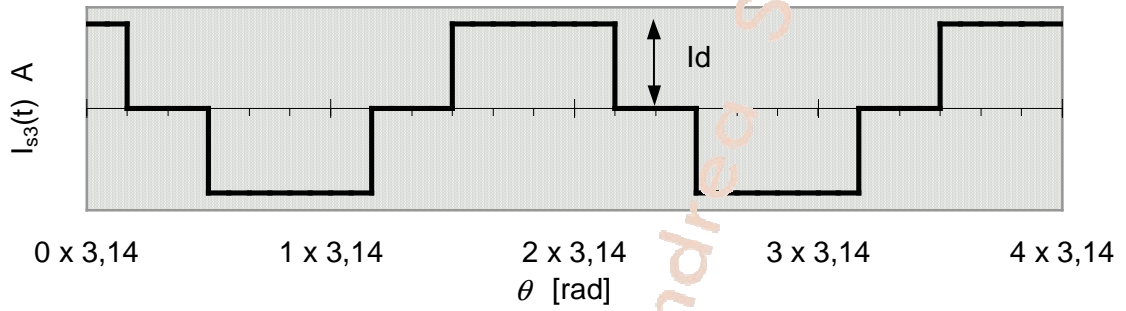
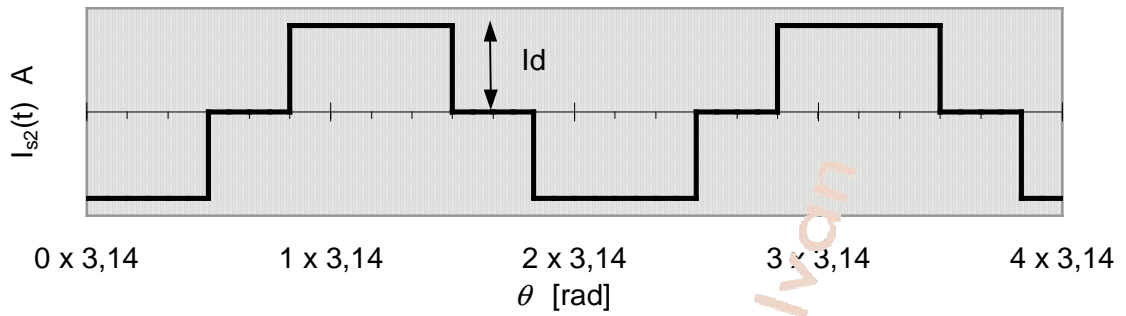
Correnti nel secondario del trasformatore:

$$i_{s1}(t) = i_{d1A}(t) - i_{d1B}(t)$$

$$i_{s2}(t) = i_{d2A}(t) - i_{d2B}(t)$$

$$i_{s3}(t) = i_{d3A}(t) - i_{d3B}(t)$$



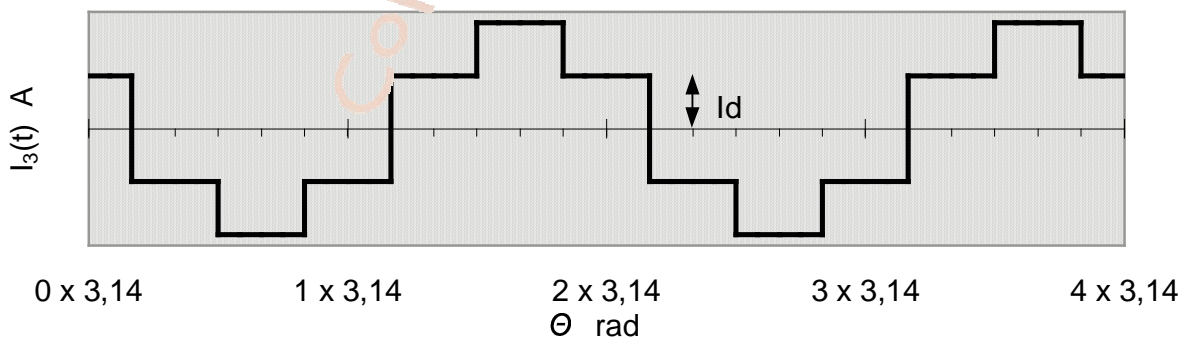
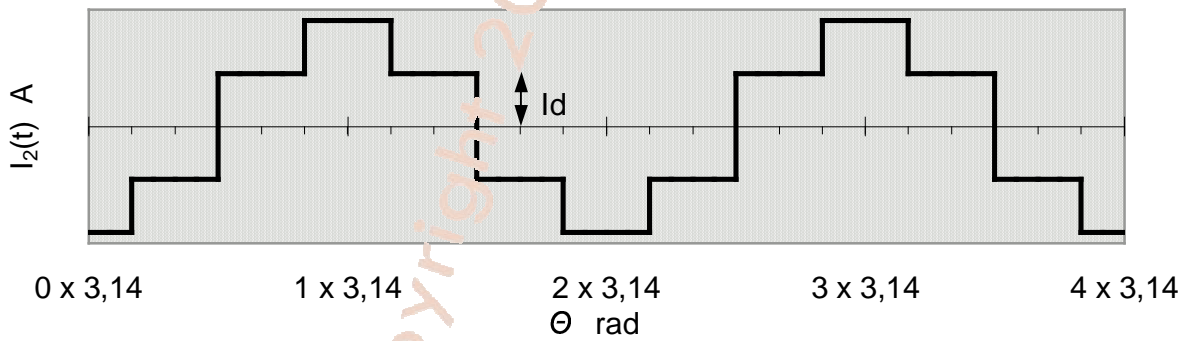
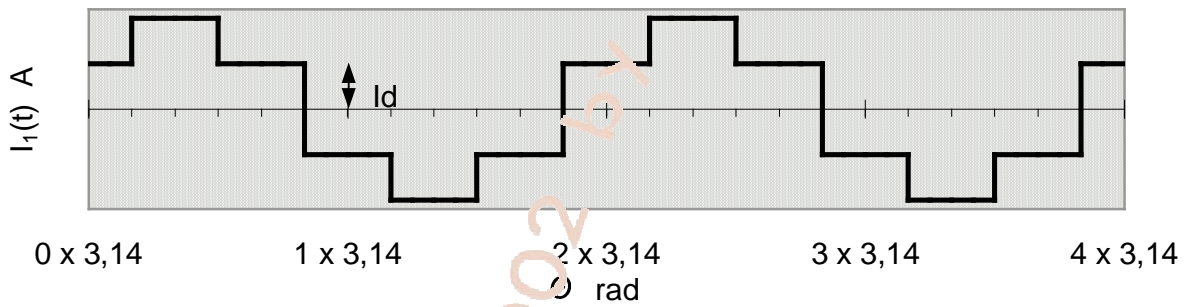


Correnti di linea del lato primario:

$$i_1(t) = i_{s1}(t) - i_{s2}(t)$$

$$i_2(t) = i_{s2}(t) - i_{s3}(t)$$

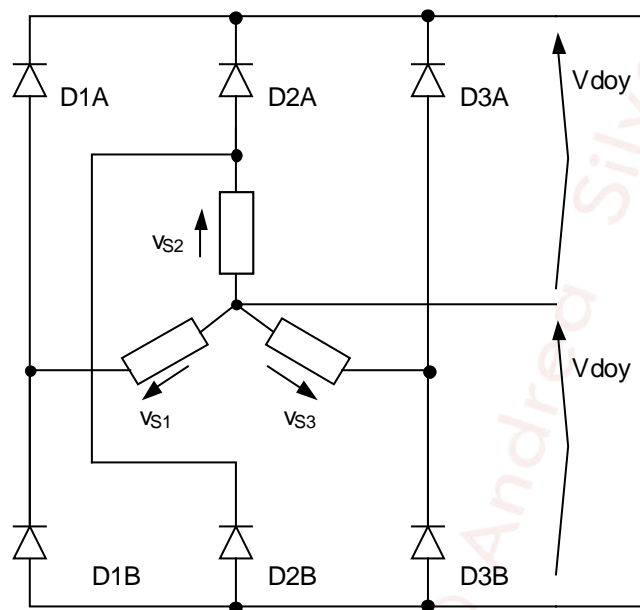
$$i_3(t) = i_{s3}(t) - i_{s1}(t)$$



PUNTO 2)

Determinare tutti i dati del trasformatore (triangolo – stella) cioè: tensioni, correnti e potenze di fase e dell'intera macchina

Per le osservazioni fatte precedentemente possiamo vedere il lato raddrizzatore del convertitore come la serie di due raddrizzatori:



Iniziamo con il dimensionamento del secondario del trasformatore.

Per le ipotesi fatte la tensione sul carico V_{do} sarà pari al doppio di V_{doy} , infatti avendo supposto $L \rightarrow \infty$ e quindi corrente sul carico spianata ho che contemporaneamente sono sempre 2 diodi in conduzione facendo sì che il neutro non venga mai percorso da correnti di riflusso:

$$V_{do} = 2V_{doy}$$

Il valore efficace di una raddrizzata con periodicità p vale:

$$V_{doy} = \sqrt{2}V_{sn} \frac{\frac{\sin \frac{\pi}{p}}{\frac{\pi}{p}}}{\frac{3}{\pi}} \Rightarrow V_{do} = 2V_{doy} = 2\sqrt{2}V_{sn} \frac{\frac{\sin \frac{\pi}{3}}{\frac{\pi}{3}}}{\frac{3}{\pi}} = 2\sqrt{2} \frac{3}{\pi} V_{sn} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_{sn} = 2,339 \cdot V_{sn}$$

da cui si ricava la tensione nominale del secondario:

$$V_{sn} = 0,427 \cdot V_{do} = 0,427 \cdot 450 = 192,5V$$

Utilizzando le espressioni ricavate nell'esercitazione 2 per la forma d'onda rettangolare si ha:

$$I_{eff}^2 = I_n^2 \cdot \delta$$

$$I_{s1,eff} = I_{s2,eff} = I_{s3,eff} = \sqrt{\frac{2}{3} I_d^2} = I_d \sqrt{\frac{2}{3}} = 817A$$

$$K = \frac{V_{conc, linea}}{V_{fase, sec ond}} = \frac{V_{conc, linea}}{V_{sn}} = \frac{V_{conc, linea}}{2,339 \cdot V_{do}} = \frac{2000}{450 \cdot 0,427} = 10,4$$

$$P_{dim} = 3 \cdot V_{fase, sec} I_{eff, sec} = 3 \cdot 0,427 \cdot 450 \cdot 817 = 470960VA$$

$$I_{prim, eff} = \frac{I_{sec ond, eff}}{K} = \frac{1000}{10,4} \sqrt{\frac{2}{3}} = 78,5A$$

PUNTO 3)

Determinare la costituzione dei rami a valvola, prendendo come base il tiristore R0300RA-IR e tenendo conto del proporzionamento elettrico e termico;

Il dimensionamento di un ramo significa determinare il numero di tiristori da collegare in parallelo in modo che durante il funzionamento le valvole non siano sottoposte ad una temperatura superiore alla massima ammissibile. Ogni diodo conduce per un terzo di periodo, la corrente media varrà:

$$I_{\text{diodo,media}} = \frac{I_d}{3} = 333A$$

la tensione massima inversa applicata a ciascun diodo è:

$$V_{\text{diodo,max}} = \sqrt{2}\sqrt{3}V_{sn} = 473V$$

per sicurezza e per garantire la resistenza alle sovratensioni di linea la scelta non ricadrà sui diodi con V_{RWM} , ma si preferirà l'utilizzo di diodi con un valore maggiore al necessario, in questo caso si scelgono nei data sheets le valvole con V_{RWM} di 1000-1200 V.

I dati caratteristici sono:

$$\theta_a = 50^\circ C \quad \theta_{j,\max} = 125^\circ C$$
$$R_{j-c} = 0,11 \frac{^\circ C}{W} \quad R_{c-d} = 0,15 \frac{^\circ C}{W} \quad \tau_j = 0,7s \quad \tau_d = 500s$$

sempre dall'esercitazione 2, nell'ipotesi di poter linearizzare le caratteristiche, si trovano le seguenti espressioni della potenza persa nel diodo:

$$P_{\text{diodo}}(i_{av}) = i_{av} \frac{400}{300} \quad i_{av} = \frac{i_d}{3}$$

Il dimensionamento termico deve essere eseguito tenendo conto dell'intervallo più gravoso di funzionamento, questo può essere sia T_2 che T_4 (e quindi anche T_6). Si devono studiare entrambi i casi.

Intervallo T_2

Questo periodo dura solo 10 secondi, perciò per quanto visto nell'esercitazione 2 la temperatura del case non fa in tempo a variare, mentre la temperatura di giunzione seguirà il transitorio:

$$\theta_{j,\max} = \frac{2}{3} \frac{I_{dn}}{N} \frac{4}{3} R_{j-c} + \frac{1}{3} \frac{I_{dn}}{N} \frac{4}{3} R_{c-a} + \theta_a$$

sostituendo i valori:

$$125 = \frac{2}{3} \frac{1000}{N} \frac{4}{3} 0,11 + \frac{1}{3} \frac{1000}{N} \frac{4}{3} 0,15 + 50$$

perciò i diodi da porre in parallelo in modo che non siano sovraccaricati in T_2 è:

$$N_{T_2} = 2,19 \cong 3$$

Intervalli T_4 e T_6

Questi intervalli durano 2 ore quindi anche la temperatura del case si modificherà, per la giunzione vale il transitorio:

$$\theta_{j,\max} = \frac{1,25}{3} \frac{I_{dn}}{N} \frac{4}{3} R_{j-c} + \frac{1,25}{3} \frac{I_{dn}}{N} \frac{4}{3} R_{c-a} + \theta_a$$

Sostituendo i valori:

$$125 = \frac{1,25}{3} \frac{1000}{N} \frac{4}{3} 0,11 + \frac{1,25}{3} \frac{1000}{N} \frac{4}{3} 0,15 + 50$$

perciò i diodi da porre in parallelo in modo che non siano sovraccaricati in T_4 e T_6 è:

$$N_{T_4, T_6} = 1,9 \cong 2$$

Si conclude che l'intervallo di funzionamento più gravoso è il T_2 , di conseguenza il numero di diodi da collegare in parallelo per ogni ramo è 3.

PUNTO 4)

Determinare le temperature massime del radiatore e di giunzione durante le varie fasi del ciclo di lavoro, tenendo conto della possibilità di guasto in ogni istante;

Intervallo T_1

La corrente media in questo intervallo è:

$$i_{d1} = i_d = 1000A$$

la corrente media per ogni ramo è:

$$i_{dav1} = \frac{i_{d1}}{3} = 333A$$

la corrente media per ogni diodo è:

$$i_{av1} = \frac{i_{dav1}}{3} = 111A$$

la potenza è ricavata dalle caratteristiche dei diodi:

$$P_{Ty1} = 110W$$

$$\theta_{c1} = R_{ca} P_{D1} + \theta_a = 0,15 \cdot 110 + 50 = 66,5^\circ C$$

$$\theta_{j1} = R_{jc} P_{D1} + \theta_{c1} = 0,15 \cdot 110 + 66,5 = 78,6^\circ C$$

Intervallo T_2

Come già visto la temperatura del case in questo breve intervallo non riesce a variare:

$$i_{d2} = 2i_d = 2000A \quad i_{dav2} = \frac{i_{d2}}{3} = 666A \quad i_{av2} = \frac{i_{dav2}}{3} = 222A$$

$$P_{Ty2} = 270W$$

$$\theta_{c2} = \theta_{c1} = 66,5^\circ C$$

$$\theta_{j2} = R_{jc} P_{D2} + \theta_{c2} = 0,11 \cdot 270 + 66,5 = 96,2^\circ C$$

è una verifica del corretto dimensionamento.

Intervallo T₃ = Intervallo T₁

$$\theta_{c3} = \theta_{c1} = 66,5^{\circ}C$$

$$\theta_{j3} = \theta_{j1} = 78,6^{\circ}C$$

Intervallo T₄

$$i_{d4} = 1,25i_d = 1250A \quad i_{dav4} = \frac{i_{d4}}{3} = 416A \quad i_{av4} = \frac{i_{dav4}}{3} = 139A$$

$$P_{Ty4} = 160W$$

$$\theta_{c4} = R_{ca} P_{D4} + \theta_a = 0,15 \cdot 160 + 50 = 74^{\circ}C$$

$$\theta_{j4} = R_{jc} P_{D4} + \theta_{c4} = 0,11 \cdot 160 + 74 = 91,6^{\circ}C$$

Intervallo T₅ = Intervallo T₁

$$\theta_{c5} = \theta_{c1} = 66,5^{\circ}C$$

$$\theta_{j5} = \theta_{j1} = 78,6^{\circ}C$$

Intervallo T₆ = Intervallo T₄

$$\theta_{c6} = \theta_{c4} = 74^{\circ}C$$

$$\theta_{j6} = \theta_{j4} = 91,6^{\circ}C$$

Intervallo T₇

$$i_{d7} = 0,7i_d = 700A \quad i_{dav7} = \frac{i_{d7}}{3} = 233A \quad i_{av7} = \frac{i_{dav7}}{3} = 78A$$

$$P_{Ty4} = 80W$$

$$\theta_{c7} = R_{ca} P_{D7} + \theta_a = 0,15 \cdot 80 + 50 = 62^{\circ}C$$

$$\theta_{j7} = R_{jc} P_{D7} + \theta_{c7} = 0,11 \cdot 80 + 62 = 71^{\circ}C$$

Oltre al funzionamento con le correnti nominali del ciclo, si deve verificare che il ponte sopporti anche le correnti di guasto specificate in un qualsiasi intervallo; il caso più sfortunato è T₂, è sufficiente verificare cosa succede in queste condizioni.

$$i_{surge} = 7I_{dn} = 7000A$$

$$i_{surge, diodo} = 2333A$$

Giunti a questo punto bisogna verificare le temperature di fine guasto in quanto i data-sheet non specificano l'incremento termico dovuto ai picchi di corrente:

$$\Delta T_{surge} = 2ms$$

$$\theta_{j, fine, guasto} = \theta_{j-c, fine, guasto} + \theta_{c, fine, guasto}$$

$$\theta_{j-c, fine, guasto} = Z_{j-c} (t = 2ms) \cdot P_{pm} = R_{j-c} \left(1 + \frac{P_{p0} - P_{pm}}{P_{pm}} e^{-\frac{t}{\tau}} \right) P_{pm}$$

$$\theta_{j-c, fine, guasto} = R_{j-c} \left(1 + e^{-\frac{t}{\tau}} \right) P_{pm} + R_{j-c} P_{p0} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\theta_{j, fine, guasto} = R_{j-c} \left(1 + e^{-\frac{t}{\tau}} \right) P_{pm} + R_{j-c} P_{d2} e^{-\frac{t}{\tau}} + \theta_{c, fine, t2}$$

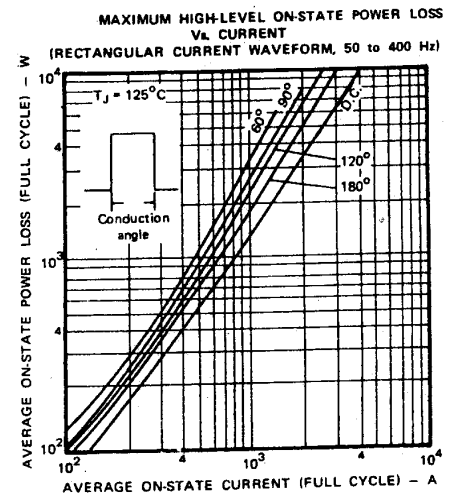
con:

P_{pm} : Potenza persa durante il guasto
(4000W dall'andamento in figura corrispondente alla conduzione in DC)

P_{p0} : Potenza persa durante l'intervallo di tempo T_2

$$\Delta\theta_j = \theta_{j, fine, guasto} - \theta_{j, fine, t2} = R_{j-c} \left(1 + e^{-\frac{t}{\tau}} \right) P_{pm} = 1,25^\circ C$$

$$\theta_{j, fine, guasto} = 97,5^\circ C$$



OSSERVAZIONI FINALI

- ✓ il sistema funziona con $q=3$ come gli altri convertitori, ma la tensione in uscita presenta periodicità 6, e di conseguenza una minore oscillazione;
- ✓ la potenza di dimensionamento del trasformatore è solo 1,05 volte della potenza richiesta in continua;
- ✓ se poi la tensione di rete corrisponde al valore necessario, il trasformatore può essere omesso migliorando il rendimento e diminuendo i costi complessivi;

Confrontando i risultati con le esercitazioni precedenti si conclude che il circuito trifase a ponte di Graetz è il circuito migliore per la conversione.