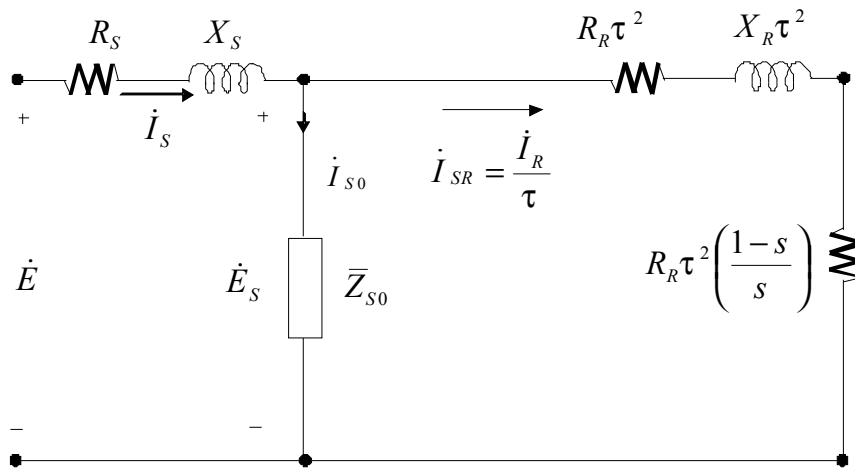


Esercizio 1

Un motore asincrono ha le seguenti caratteristiche: tensione nominale 400 V, frequenza nominale 50 Hz, 4 poli, resistenza equivalente di rotore 0,04 Ω (nella rete equivalente con il rotore riportato a statore), reattanza equivalente di rotore 0,2 Ω. Determinare la coppia meccanica prodotta dal motore, alimentato a tensione nominale, quando gira alla velocità di 1450 giri al minuto (assumere nella formula della coppia E_s come la tensione stellata nominale).

Svolgimento proposto:

La rete equivalente semplificata del generatore asincrono con la parte rotorica riportata a statore è:



Per prima cosa si determina lo scorrimento:

la velocità di sincronismo è data da:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ rpm}$$

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} = \frac{1500 - 1450}{1500} = 0.03$$

l'espressione analitica della caratteristica meccanica è:

$$C = \frac{3pR_R}{\omega} \frac{E_R^2}{\frac{R_R^2}{s} + sX_R^2} = \frac{3pR_R}{\tau^2 \omega} \frac{E_S^2}{\frac{R_R^2}{s} + sX_R} = \frac{3p\tau^2 R_R}{\omega} \frac{E_S^2}{\frac{(\tau^2 R_R)^2}{s} + s(\tau^2 X_R)^2}$$

perciò, la coppia è:

$$C = \frac{3 \cdot 2 \cdot 0.04 \cdot \left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)^2}{2\pi \cdot 50 \cdot \left(\frac{(0.04)^2}{0.03} + 0.03 \cdot (0.2)^2\right)} = 747 \text{ Nm}$$

Esercizio 2

Per il motore precedente, disegnare la caratteristica meccanica per valori di scorrimento $0 < s < 1$.

Svolgimento proposto:

abbiamo già visto che l'espressione analitica della caratteristica meccanica è:

$$C = \frac{3pR_R}{\omega} \frac{E_R^2}{\frac{R_R^2}{s} + sX_R^2} = \frac{3pR_R}{\tau^2 \omega} \frac{E_S^2}{\frac{R_R^2}{s} + sX_R} = \frac{3p\tau^2 R_R}{\omega} \frac{E_S^2}{\frac{(\tau^2 R_R)^2}{s} + s(\tau^2 X_R)^2}$$

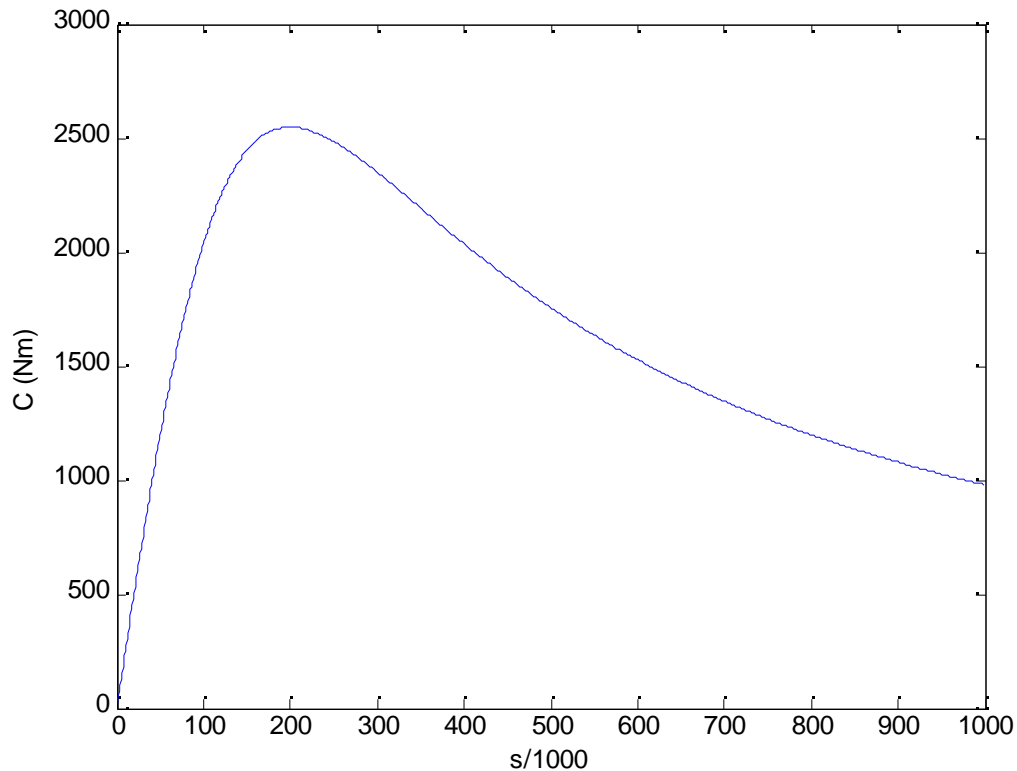
cerchiamo ora di ricostruire la curva per punti. Il valore della coppia per lo scorrimento pari a 0.03 è già stato determinato nell'esercizio precedente.

La coppia è massima per un valore dello scorrimento vicino al rapporto:

$$s = \frac{R_R}{X_R} = 0.2$$

per tale valore dello scorrimento si ottiene una coppia pari a 2548 Nm

Calcolando ora vari punti per valori di scorrimento $0 < s < 1$, si ottiene:



Esercizio 3

Per il motore asincrono precedente, determinare la corrente assorbita alla velocità di 1410 rpm per una tensione di alimentazione uguale al valore nominale (assumere la corrente pari a quella che scorre nel circuito del rotore riportato a statore).

Svolgimento proposto:

La corrente rotorica della macchina è:

$$I_R = \frac{E_R}{\sqrt{\left(\frac{R_R}{s}\right)^2 + X_R^2}} = \frac{E_S}{\tau \sqrt{\left(\frac{R_R}{s}\right)^2 + X_R^2}}$$

mentre lo scorrimento sarà dato da:

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} = \frac{1500 - 1410}{1500} = 0.06$$

Rifacendosi alla rete equivalente dell'esercizio 1, si ha:

$$I_{SR} = \frac{I_R}{\tau} = \frac{E_S}{\sqrt{\left(\frac{\tau^2 R_R}{s}\right)^2 + (\tau^2 X_R)^2}} = \frac{\frac{400}{\sqrt{3}}}{\sqrt{\left(\frac{0.02}{0.06}\right)^2 + (0.2)^2}} = 476 \text{ A}$$

Esercizio 4

Per il motore asincrono precedente, determinare il rendimento elettrico sapendo che le perdite nel circuito magnetico sono pari a 5 kW. Disegnare inoltre per punti la curva del rendimento in funzione dello scorrimento

Svolgimento proposto:

il rendimento elettrico è dato da:

$$\eta_e = \frac{P_u}{P_e} = \frac{P_u}{P_u + P_{magn} + P_{avv}}$$

dove P_u è la potenza all'asse, mentre P_{magn} e le P_{avv} comprendono rispettivamente tutti i tipi di perdite nel circuito magnetico e nei conduttori (ad esempio le perdite nelle spazzole, quelle negli avvolgimenti ausiliari, ecc.).

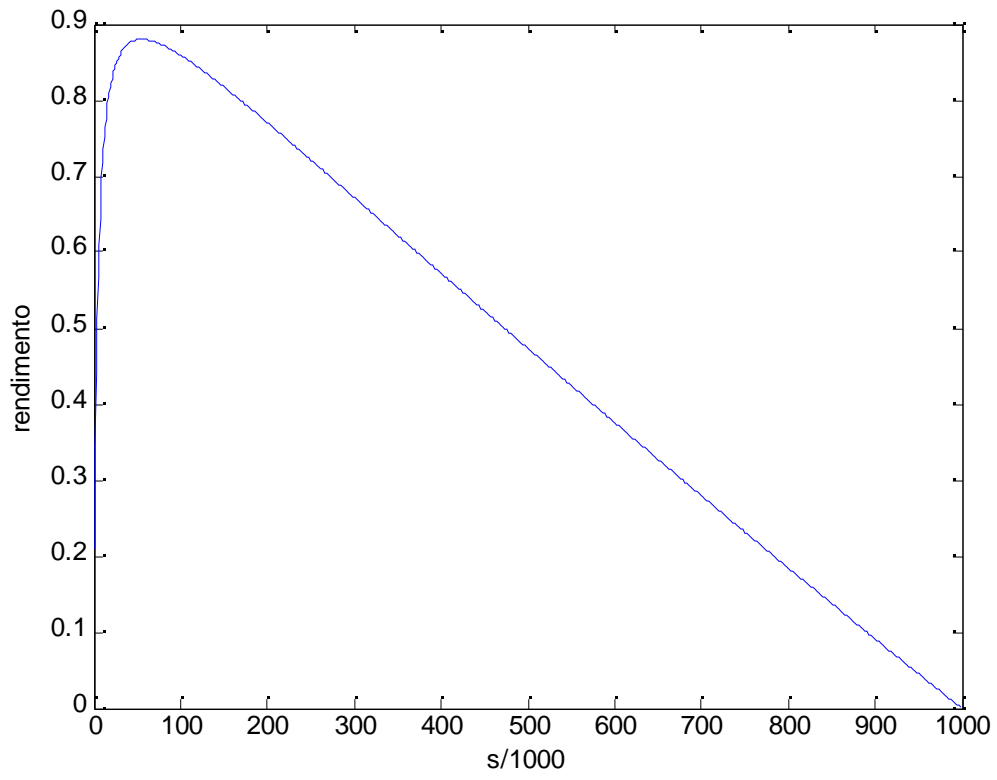
Rifacendoci sempre alla rete equivalente dell'esercizio 1, si può scrivere:

$$\eta_e = \frac{3 \cdot \tau^2 R_R \cdot \left(\frac{1-s}{s}\right) I_{SR}^2}{3 \cdot \tau^2 R_R \cdot \left(\frac{1-s}{s}\right) I_{SR}^2 + P_{magn} + 3 \cdot \tau^2 R_R I_{SR}^2} = \frac{3 \cdot 0.04 \cdot \left(\frac{1-0.03}{0.03}\right) \cdot (127)^2}{3 \cdot 0.04 \cdot \left(\frac{1-0.03}{0.03}\right) (127)^2 + P_{magn} + 3 \cdot 0.04 \cdot (127)^2} = 0.859$$

Andando ora a disegnare la curva $\eta_e(s)$ per punti, ricordando che:

$$I_{SR} = \frac{E_S}{\sqrt{\left(\frac{\tau^2 R_R}{s}\right)^2 + (\tau^2 X_R)^2}}$$

si ottiene:

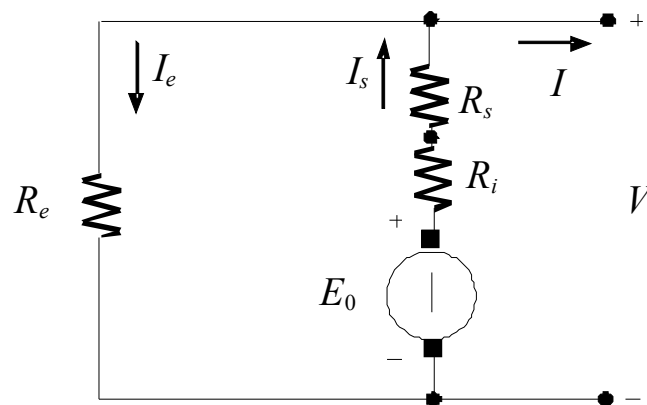


Esercizio 1

Per una dinamo con eccitazione in derivazione con tensione di rete 48 V, resistenza di indotto e di spazzole 2,5 Ω , resistenza di eccitazione 120 Ω , determinare la tensione generata quando la corrente erogata alla rete è pari a 3 A

Svolgimento proposto:

La rete equivalente semplificata della dinamo con eccitazione in derivazione è la seguente:



l'equilibrio elettrico della rete può essere scritto come segue:

$$I_s = \frac{V - E_0}{R_i + R_s}$$

con

$$I_e = \frac{V}{R_e} = \frac{48}{120} = 0.4 \text{ A}$$

dall'equilibrio al nodo si ha:

$$I_s = I + I_e = 3 + 0.4 = 3.4 \text{ A}$$

quindi:

$$E_0 = V + (R_i + R_s) \cdot I_s = 48 + (2.5 \cdot 3.4) = 56.5 \text{ V}$$

Esercizio 2

Per la dinamo precedente determinare la coppia che deve essere applicata per ottenere il funzionamento da generatore descritto prima, con una velocità di rotazione pari a 900 giri al minuto.

Svolgimento proposto:

Rifacendoci alla rete equivalente dell'esercizio precedente, l'equilibrio meccanico è espresso dalla:

$$C\omega = E_0 I_s$$

e quindi:

$$C = \frac{E_0 I_s}{2\pi \cdot \frac{n}{60}} = \frac{56.5 \cdot 3.4}{2\pi \cdot \frac{900}{60}} = 2.04 \text{ Nm}$$

Esercizio 3

Considerando la caratteristica meccanica della coppia di un motore in corrente continua con eccitazione in derivazione e sapendo che esso assorbe una corrente di 12 A e produce una coppia di 40 Nm, che corrente necessita per avere una coppia di 36 Nm?

Svolgimento proposto:

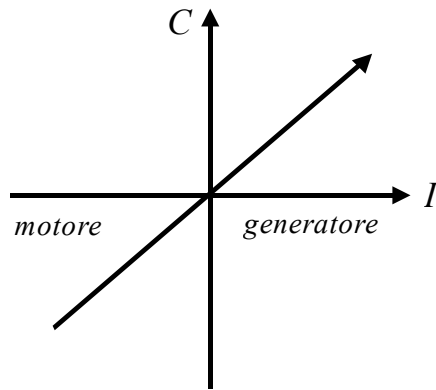
la coppia per un motore a corrente continua con eccitazione in derivazione può essere espressa tramite la:

$$C = \frac{E_0 I}{2\pi \cdot \frac{n}{60}} = \frac{30k\phi_M}{\pi} I$$

ed essendo ϕ_M è praticamente costante, si ha:

$$\frac{C}{I} = \text{cost}$$

che graficamente diventa:



perciò:

$$\frac{C_1}{I_1} = \frac{C_2}{I_2}$$

dalla quale:

$$I_2 = \frac{C_2 \cdot I_1}{C_1} = \frac{36 \cdot 12}{40} = 10.8 \text{ A}$$

Esercizio 4

Un motore in corrente continua con eccitazione in derivazione ha le seguenti caratteristiche: Potenza nominale 7,5 kW, tensione nominale 230 V, rendimento a pieno carico 0,88, la somma della resistenza di indotto e resistenza di spazzole pari a 0,28 Ω. Calcolare, a pieno carico, la potenza assorbita, la corrente assorbita, la corrente d'indotto e la forza elettromotrice sapendo che in questa condizione la corrente di eccitazione è pari a 1 A.

Svolgimento proposto:

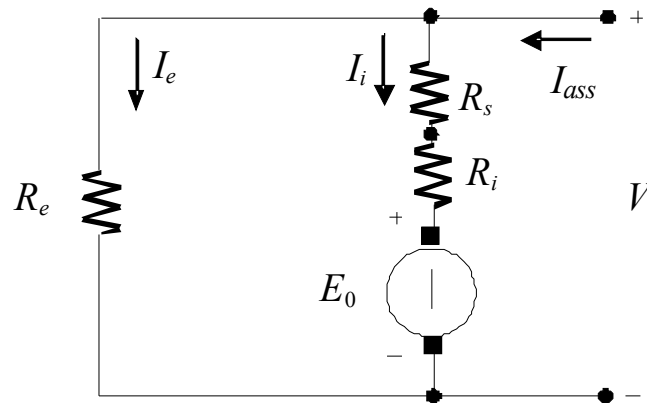
La potenza assorbita sarà:

$$P_{ass} = \frac{P_n}{\eta} = \frac{7500}{0.88} = 8.5 \text{ kW}$$

la corrente assorbita è data da:

$$I_{ass} = \frac{P_{ass}}{V_n} = \frac{8500}{230} = 37 \text{ A}$$

lo schema equivalente del motore è:



dall'equilibrio al nodo posso ricavare la corrente d'indotto:

$$I_i = I_{ass} - I_e = 37 - 1 = 36 \text{ A}$$

dall'equilibrio elettrico della rete si ricava:

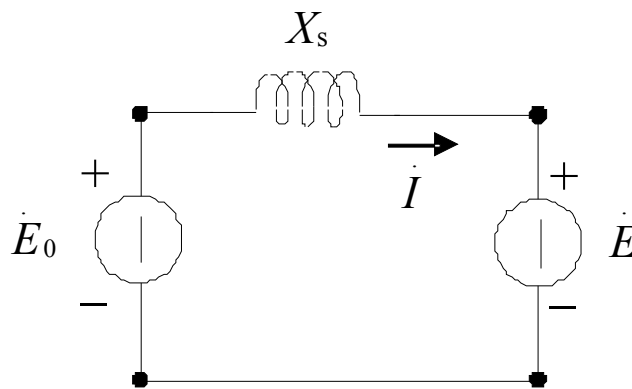
$$E_0 = V - (R_i + R_s) \cdot I_s = 230 - (0.28 \cdot 36) = 220 \text{ V}$$

Esercizio 1

Un generatore sincrono trifase ha le seguenti caratteristiche: potenza nominale 16000 kVA, frequenza nominale 50 Hz, 2 poli, tensione nominale 3250 V, corrente di eccitazione al sincronismo per avere una tensione a vuoto pari a quella nominale 18 A, corrente nello statore durante la prova in corto circuito al sincronismo (quando la corrente di eccitazione è 18 A) 4000 A. Determinare la rete equivalente della macchina.

Svolgimento proposto:

La rete equivalente semplificata del generatore sincrono trifase è la seguente:



Dal funzionamento in corto circuito, si ha:

$$\dot{E}_0 = \bar{Z}_s \dot{I}_{cc}$$

essendo inoltre $R_s \ll X_s$ si ottiene:

$$X_s = \frac{E_0}{I_{cc}} = \frac{3250}{4000} = 0.8125 \Omega$$

dove la tensione di fase a vuoto E_0 e la corrente di corto circuito I_{cc} sono ottenute con lo stesso valore della corrente di eccitazione.

Esercizio 2

Per il generatore precedente, determinare l'espressione matematica e disegnare la caratteristica esterna al sincronismo per un fattore di potenza ($\cos\phi$) pari a 0,8 (carico ohmico-induttivo).

Svolgimento proposto:

Il comportamento di un alternatore chiuso su di un carico è descritto dalla:

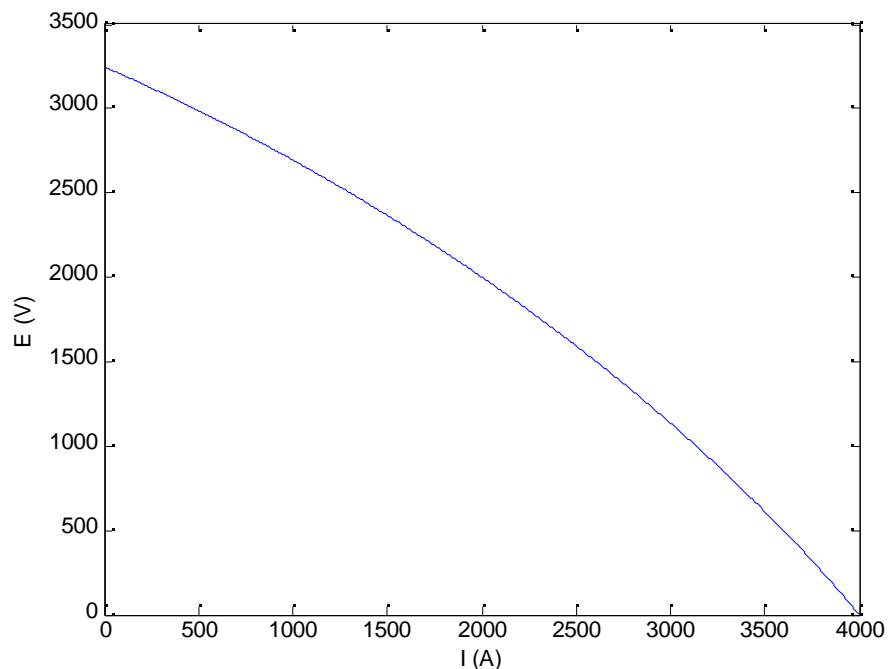
$$E_0^2 = E^2 + X_s^2 I^2 + 2 E X_s I \sin \varphi_s$$

che con i valori dati e ricavati nell'esercizio 1 diventa:

$$3250^2 = E^2 + 0,8125^2 \cdot I^2 + 2 \cdot E \cdot 0,8125 \cdot I \cdot 0,6$$

Inserendo nell'espressione precedente dei valori di I (con $0 \leq I \leq I_{cc}$) si ottiene la caratteristica esterna $E(I)$:

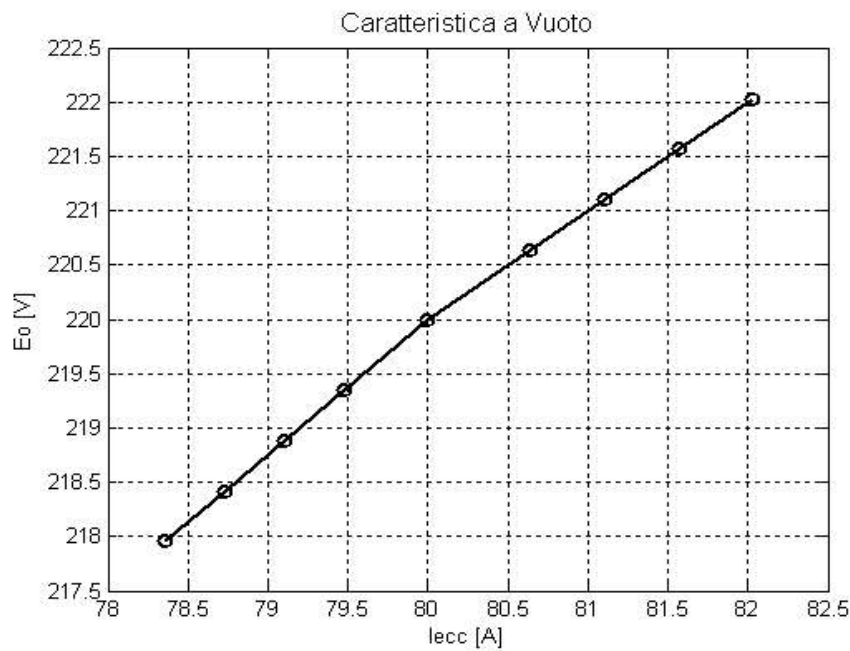
I [A]	E [V]
0	3250
10	3245
100	3200
500	2990
1000	2697
1500	2369
2000	2004
2500	1596
3000	1137
3500	614
3900	132
3990	13
4000	0



Esercizio 3

Una macchina sincrona, di cui è riportata la caratteristica a vuoto, è collegata come alternatore ad una rete prevalente.

Noti i valori della Reattanza Sincrona $X_s = 0.375\Omega$, della Tensione di Rete $E = 220$ V, e della Potenza Erogata $P = 400$ W, e ipotizzando le condizioni di funzionamento lineare, si tracci, in maniera approssimata (calcolando almeno 3 punti di cui uno sia il minimo) il diagramma della Curva a V relativa alle condizioni suddette.



E_0 [V]	I_{ecc} [A]
217.96	78.36
218.42	78.73
218.88	79.1
219.35	79.48
220	80
220.64	80.64
221.11	81.11
221.57	81.57
222.03	82.03

Svolgimento proposto:

Rifacendosi alla rete equivalente dell'esercizio 1, la potenza attiva erogata dalla macchina è:

Il comportamento di un alternatore chiuso su un carico è dato da:

$$E_0^2 = E^2 + X_s^2 I^2 + 2 E X_s I \sin\phi$$

Dalla prima equazione e dalla trigonometria si ottiene:

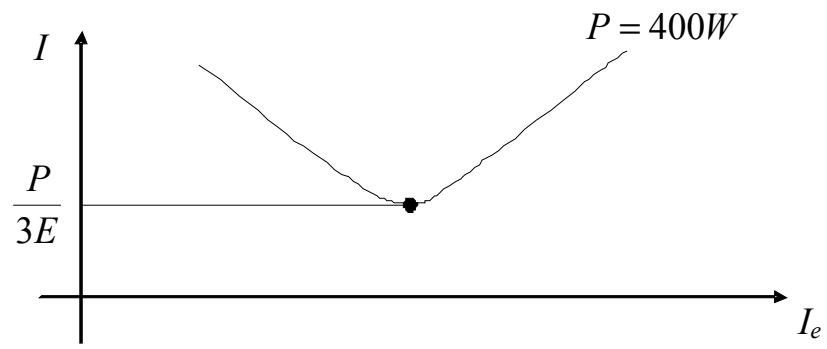
$$I \sin\phi = \pm \sqrt{I^2 - \frac{P^2}{9E^2}}$$

ovvero:

$$E_0 = \sqrt{E^2 + X_s^2 I^2 \pm 2 E X_s \sqrt{I^2 - \frac{P^2}{9E^2}}}$$

Conoscendo l'andamento di E_0 con I_{ecc} , posso costruire le curve a V date da $I(I_{ecc})$. Invece di esplicitare la I , posso dare io arbitrariamente dei valori alla I e, tramite interpolazione lineare, ricostruire la curva, sapendo che il valore minimo della curva è $I = \frac{P}{3E}$.

Quello che troverò sarà un grafico del tipo:

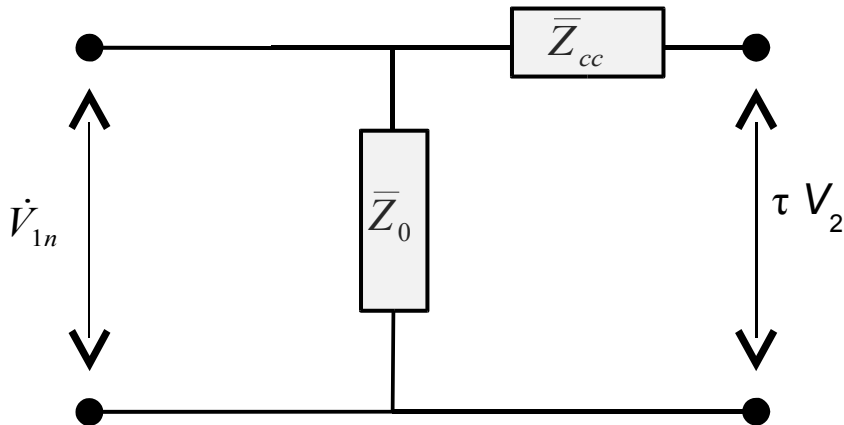


Esercizio 1

Determinare la rete equivalente di un trasformatore trifase con le seguenti caratteristiche: potenza nominale 800 kVA, frequenza nominale 50 Hz, rapporto di trasformazione a vuoto $\frac{20000}{400}$, potenza assorbita nella prova a vuoto eseguita a tensione nominale 3200 W, corrente del primario nella prova a vuoto 0,17 A, tensione di alimentazione del primario nella prova in corto circuito $V_{cc}\% = 4,5\%$, potenza assorbita in corto circuito 7500 W. Calcolare inoltre il rendimento convenzionale del trasformatore.

Svolgimento proposto:

La rete equivalente semplificata della macchina monofase, con il secondario riportato a primario, è la seguente:



Per determinare la rete equivalente si devono calcolare le due impedenze equivalenti \bar{Z}_0 e \bar{Z}_{cc} .

Dalla prova a vuoto, tenendo conto che il trasformatore in esame è trifase, si ricava:

$$\cos\psi_{10} = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot V_{1n} \cdot I_{10}} = \frac{3200}{\sqrt{3} \cdot 20000 \cdot 0.17} = 0.54$$

$$Z_0 = \frac{V_{1n}}{\sqrt{3} \cdot I_{10}} = \frac{20000}{\sqrt{3} \cdot 0.17} = 67.92 \text{ k}\Omega$$

da cui:

$$R_0 = Z_0 \cos\psi_{10} = 36.68 \text{ k}\Omega$$

$$X_0 = Z_0 \sin\psi_{10} = 57.17 \text{ k}\Omega$$

Dalla prova in corto circuito si ha:

$$V_{cc} = \frac{4.5}{100} \cdot 20000 = 900 \text{ V}$$

$$I_{cc} = I_{1n} = \frac{P_{1n}}{\sqrt{3} \cdot V_{1n}} = \frac{800000}{\sqrt{3} \cdot 20000} = 23.1 \text{ A}$$

per cui

$$\cos\psi_{cc} = \frac{P_{cc}}{\sqrt{3} \cdot V_{cc} \cdot I_{cc}} = \frac{7500}{\sqrt{3} \cdot 900 \cdot 23.1} = 0.21$$

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{\sqrt{3} \cdot I_{cc}} = \frac{900}{\sqrt{3} \cdot 23.1} = 22.49 \text{ } \Omega$$

da cui

$$R_{cc} = Z_{cc} \cos\psi_{cc} = 4.72 \text{ } \Omega$$

$$X_{cc} = Z_{cc} \sin\psi_{cc} = 22.39 \text{ } \Omega$$

il rendimento convenzionale sarà

$$\eta_c = \frac{P_n}{P_n + P_0 + P_{cc}} = \frac{800000}{800000 + 3200 + 7500} = 0.987$$

Esercizio 2

Dato il trasformatore dell'esercizio 1, calcolare le perdite negli avvolgimenti (tramite la R_{cc}) quando la corrente nel primario è pari all'80% della corrente nominale

Svolgimento proposto:

Dal valore I_{1n} dell'esercizio 1 si ricava la nuova corrente al primario:

$$I = 0.80 \cdot I_{1n} = 0.85 \cdot 23.1 = 18.48 \text{ A}$$

Considerando il valore R_{cc} dell'esercizio 1, la potenza persa negli avvolgimenti, essendo il trasformatore trifase, non è altro che

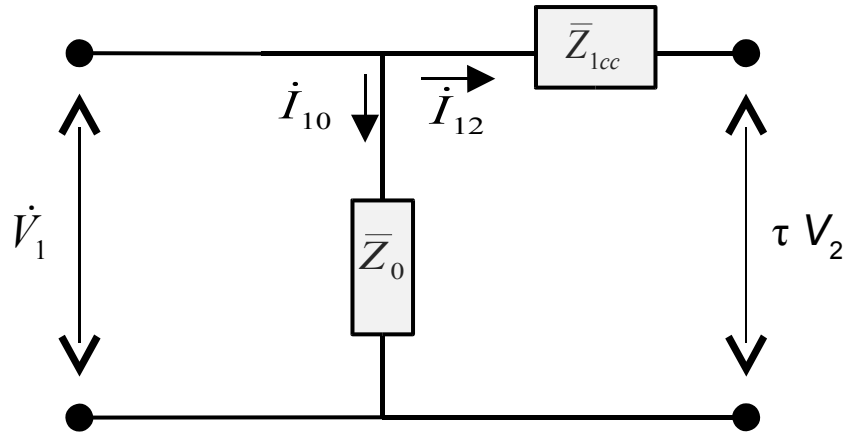
$$P_{avv} = 3 \cdot R_{cc} \cdot I^2 = 3 \cdot 4.72 \cdot (18.48)^2 = 4.84 \text{ kW}$$

Esercizio 3

Calcolare la caduta di tensione da vuoto a carico del trasformatore dell'esercizio 1, considerando un fattore di potenza del carico pari a 0,8 e una corrente assorbita dal carico I_{l2} (secondario riportato al primario) pari all'80% della corrente nominale

Svolgimento proposto:

Riportando tutto al primario, la rete equivalente del trasformatore è:



Dall'esercizio 1, si ha:

$$\dot{V}_1 = 20000 \text{ V}$$

$$\dot{V}_2 = 400 \text{ V}$$

$$R_{1cc} = 4.72 \text{ } \Omega$$

$$X_{1cc} = 22.39 \text{ } \Omega$$

$$I_n = 23.1 \text{ A}$$

mentre

$$I_{12} = 0.8 \cdot I_n = 0.8 \cdot 23.1 = 18.48 \text{ A}$$

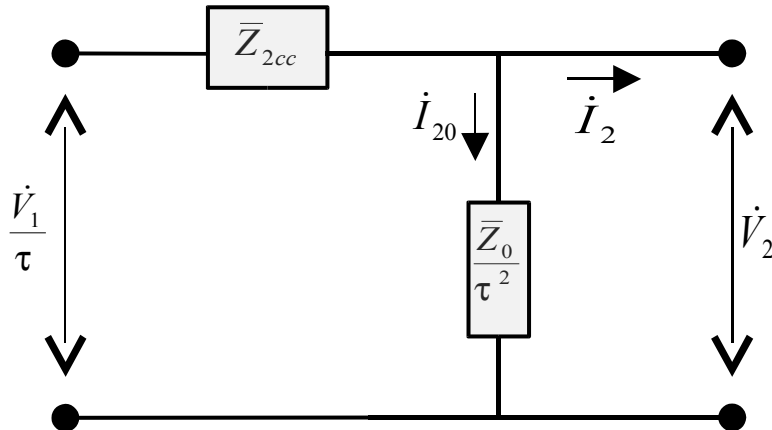
La caduta di tensione da vuoto a carico viene calcolata con:

$$\Delta V\% = \frac{(R_{1cc} \cdot \cos\psi_c + X_{1cc} \cdot \sin\psi_c) \cdot I_{12}}{V_{10}} \cdot 100$$

ed essendo dai dati $\cos\psi_c = 0.8$ si ha:

$$\Delta V\% = \frac{(3.72 + 13.43) \cdot 18.48}{20000} \cdot 100 = 1.6\%$$

Per verificare il risultato, riportiamo tutto il sistema al secondario:



In questo caso si ha:

$$Z_{2cc} = \frac{Z_{1cc}}{\tau^2}$$

e quindi

$$R_{2cc} = \frac{R_{1cc}}{\tau^2} = \frac{4.72}{50^2} = 1.89 \text{ m}\Omega$$

$$X_{2cc} = \frac{X_{1cc}}{\tau^2} = \frac{22.39}{50^2} = 8.96 \text{ m}\Omega$$

mentre

$$I_2 = \tau \cdot I_{12} = 50 \cdot 18.48 = 924$$

La caduta di tensione è così:

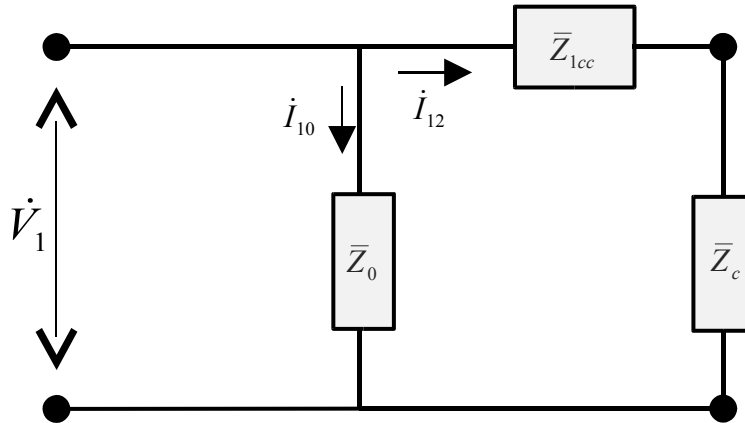
$$\Delta V\% = \frac{(R_{2cc} \cdot \cos\psi_c + X_{2cc} \cdot \text{sen}\psi_c) \cdot I_2}{V_{20}} \cdot 100 = \frac{(1.51 \cdot 10^{-3} + 5.38 \cdot 10^{-3}) \cdot 924}{400} \cdot 100 = 1.6\%$$

Esercizio 4

Calcolare la e disegnare la curva di rendimento del trasformatore dell'esercizio 1, considerando un fattore di potenza del carico pari a 1 e una corrente assorbita dal carico I_{12} (secondario riportato al primario) pari al 120%, 100%, 80%, 60%, 40% e 20% della corrente nominale

Svolgimento proposto:

Riportando tutto al primario, la rete equivalente del trasformatore è:



$$\eta = \frac{P_u}{P_u + P_{avv} + P_{magn}}$$

dove:

$$P_u = \sqrt{3} \cdot V_{ln} \cdot I_{l2} \cdot \cos\varphi$$

$$P_{avv} \cong 3 \cdot R_{cc} \cdot I_{l2}^2$$

$$P_{magn} \cong P_0$$

Dall'esercizio 1 si ha che $R_{cc} = 4,74 \Omega$, mentre $P_0 = 3200 \text{ W}$.

Ponendo $\cos\varphi = 1$ e $I_{l2} = 120\% I_{ln} = 27.72 \text{ A}$, si ha:

$$P_u = \sqrt{3} \cdot 20000 \cdot 27.72 = 960221 \text{ W}$$

$$P_{avv} \cong 3 \cdot 4.74 \cdot (27.72)^2 = 10880 \text{ W}$$

$$P_{magn} \cong 3200 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + P_{avv} + P_{magn}} = 0.9855$$

Ponendo $\cos\varphi = 1$ e $I_{l2} = I_{ln} = 23.1 \text{ A}$, si ha:

$$P_u = \sqrt{3} \cdot 20000 \cdot 23.1 = 800 \text{ kW}$$

$$P_{avv} \cong 3 \cdot 4.74 \cdot (21.3)^2 = 7587 \text{ W}$$

$$P_{magn} \cong 3200 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + P_{avv} + P_{magn}} = 0.9867$$

Ponendo $\cos\varphi = 1$ e $I_{l2} = 80\% I_{In} = 18.48$ A, si ha:

$$P_u = \sqrt{3} \cdot 20000 \cdot 18.48 = 639408 \text{ W}$$

$$P_{avv} \cong 3 \cdot 4.74 \cdot (18.48)^2 = 4836 \text{ W}$$

$$P_{magn} \cong 3200 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + P_{avv} + P_{magn}} = 0.9876$$

Ponendo $\cos\varphi = 1$ e $I_{l2} = 60\% I_{In} = 13.86$ A, si ha:

$$P_u = \sqrt{3} \cdot 20000 \cdot 13.86 = 479556 \text{ W}$$

$$P_{avv} \cong 3 \cdot 4.74 \cdot (13.86)^2 = 2720 \text{ W}$$

$$P_{magn} \cong 3200 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + P_{avv} + P_{magn}} = 0.9878$$

Ponendo $\cos\varphi = 1$ e $I_{l2} = 40\% I_{In} = 9.24$ A, si ha:

$$P_u = \sqrt{3} \cdot 20000 \cdot 9.24 = 320074 \text{ W}$$

$$P_{avv} \cong 3 \cdot 4.74 \cdot (9.24)^2 = 1209 \text{ W}$$

$$P_{magn} \cong 3200 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + P_{avv} + P_{magn}} = 0.9864$$

Ponendo $\cos\varphi = 1$ e $I_{l2} = 20\% I_{In} = 4.62$ A, si ha:

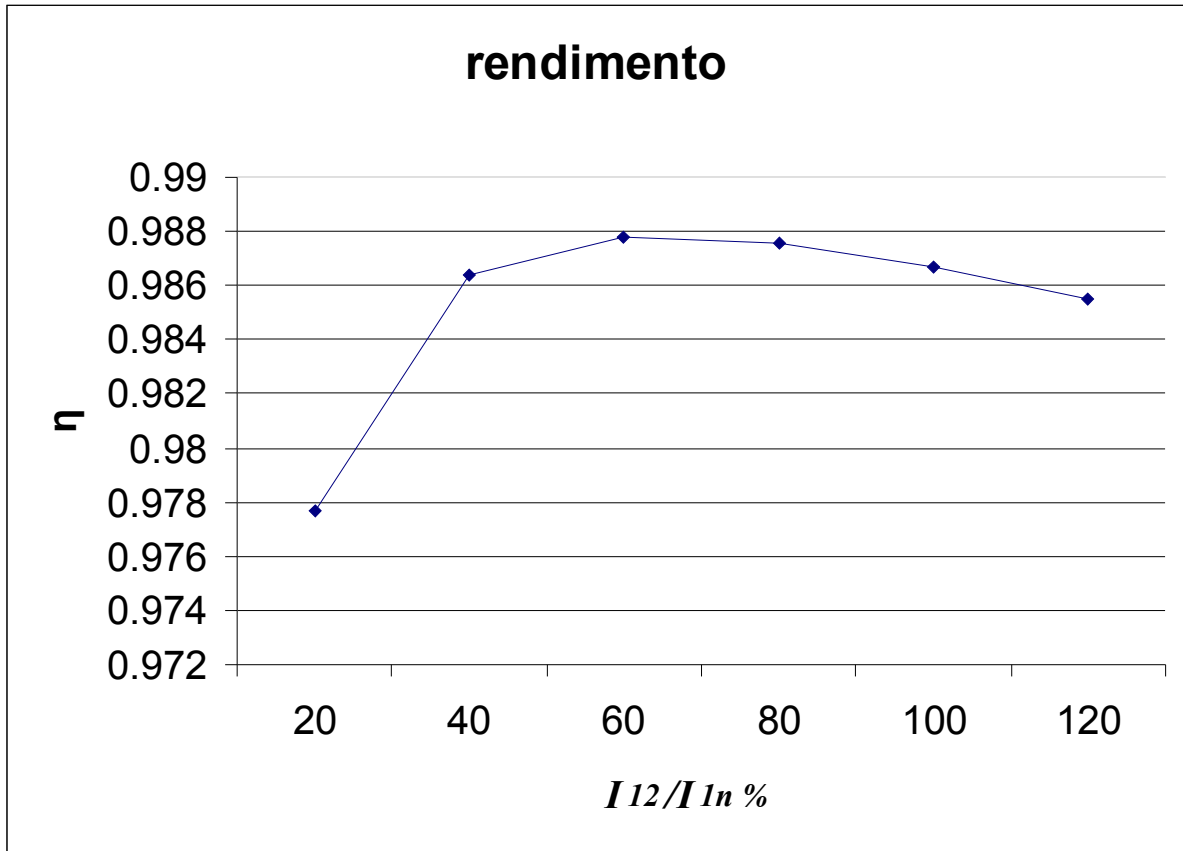
$$P_u = \sqrt{3} \cdot 20000 \cdot 4.62 = 160037 \text{ W}$$

$$P_{avv} \cong 3 \cdot 4.74 \cdot (4.62)^2 = 456 \text{ W}$$

$$P_{magn} \cong 3200 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + P_{avv} + P_{magn}} = 0.9777$$

La curva disegnata diviene così:



Elettrotecnica II

Terni, 28 gennaio 2013

Allievo.....

Rispondere in modo **sintetico** alle seguenti domande teoriche

1. Funzionamento a carico di un trasformatore trifase, disegnare inoltre la rete equivalente in tale caso
2. Trasformatori di misura
3. Caratteristica a vuoto di una macchina sincrona
4. Diagrammi polari e curve a V macchina sincrona
5. Disegnare i grafici degli andamenti della coppia meccanica di una macchina asincrona in funzione dello scorrimento, della resistenza addizionale e della velocità di rotazione
6. Schema della rete di un motore asincrono a doppia gabbia, e diagramma della caratteristica meccanica del motore in funzione delle gabbie
7. Eccitazione delle macchine a corrente continua
8. Curve caratteristiche della macchina a corrente continua: tensione in funzione della corrente, velocità di rotazione in funzione della corrente, coppia in funzione della velocità, velocità di rotazione in funzione della coppia
9. Diodi a giunzione
10. Schema di convertitore AC/DC trifase a ponte di Graetz
11. Schema di inverter trifase

Elettrotecnica II

Terni, 28 gennaio 2013

Allievo.....

Rispondere in modo **sintetico** alle seguenti domande teoriche

1. Schema delle reti equivalenti del trasformatore funzionante a vuoto, a carico e in cortocircuito
2. Schema e rete equivalente di trasformatori in parallelo, e requisiti per messa in parallelo
3. Funzionamento in corto circuito macchina sincrona
4. Comportamento dell'alternatore libero macchina sincrona, completo di disegno del grafico tensione-corrente
5. Funzionamento a vuoto macchina asincrona
6. Reti equivalenti delle macchine asincrone trifasi
7. Caratteristiche esterne della macchina con eccitazione separata e con eccitazione in derivazione
8. Funzionamento a carico macchina a corrente continua
9. Schema e andamento di tensione e corrente di un raddrizzatore controllato monofase a semplice semionda
10. Schema di inverter monofase
11. Regolazione dei carichi in AC: tecnica ad impulsi ad ampiezza modulata (PWM)