

## ESERCITAZIONE 6

### 1.

#### ESERCIZIO 1

Sia dato un generatore sincrono caratterizzato dai seguenti dati

Potenza nominale  $A_n=55$  kVA

Fattore di potenza nominale  $\cos\phi_n=0.9$

Tensione nominale  $V_n=380$  V

Reattanza sincrona in p.u.  $x_s=180\%$

Resistenza statorica  $R_s=0$   $\Omega$

Tensione di eccitazione nominale  $V_{eccn}=200$  V

Corrente di eccitazione nominale  $I_{eccn}=5$  A

Frequenza nominale  $f_n=50$  Hz

Il generatore alimenta un carico caratterizzato dai seguenti dati:

$R_l=4$   $\Omega$

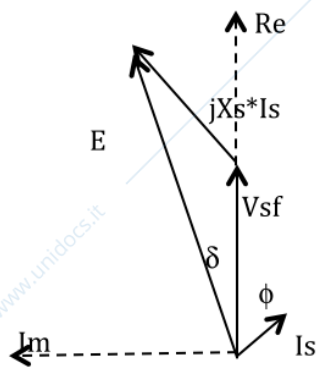
$L_l=10$  mH

Si calcoli la tensione di eccitazione necessaria ad alimentare il carico dato a tensione pari alla  $V_n$ , il rendimento e l'angolo di carico  $\delta$ .

Nella soluzione si considera la seguente equazione vettoriale scritta nelle variabili di fase:

$$V_{sf} + R_s \cdot I_s + jX_s \cdot I_s = E$$

Proiettando tale equazione sui due assi reale e immaginario rappresentati in figura (dove si è considerato  $R_s=0$   $\Omega$ ) si ottiene:



$$E_r = V_{sf} + X_s \cdot I_s \cdot \sin\phi$$

$$E_i = X_s \cdot I_s \cdot \cos\phi$$

$$\text{Dove } V_{sf} = V_n / \sqrt{3}$$

Nel caso dato, la corrente  $I_s$  si calcola nel seguente modo:

$$I_s = V_n / (\sqrt{3} \cdot Z) = 43.13 \text{ A}$$

$$Z = \sqrt{R_l^2 + (2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot L_l)^2} = 5.1 \text{ } \Omega$$

$$\phi = \text{atan}((2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot L_l) / R_l) = 0.665$$

La reattanza sincrona  $X_s$  è pari a  $X_s = x_s/100 \cdot (V_n/(\sqrt{3} \cdot I_n)) = 4.7 \Omega$ , dove  $I_n = A_n/(\sqrt{3} \cdot V_n) = 83.5 \text{ A}$ . Si trova quindi  $E_r = 345.3 \text{ V}$ ,  $E_i = 160.3 \text{ V}$ , da cui si ricava  $E = \sqrt{(E_r^2 + E_i^2)} = 380.7 \text{ V}$ . Per calcolare la tensione di eccitazione è necessario calcolare la  $E_n$  data da

$$E_n = V_{sf} + X_s \cdot I_n \cdot \sin \phi_n = 391.5 \text{ V}$$

$$E_n = X_s \cdot I_n \cdot \cos \phi_n = 355.4 \text{ V}$$

$$\text{Da cui si ricava il modulo di } E_n = \sqrt{(E_n^2 + E_n^2)} = 528.8 \text{ V.}$$

Si ottiene quindi  $V_{ecc} = E/E_n \cdot V_{eccn} = 143.9 \text{ V}$ .

Il rendimento è dato dal rapporto tra potenza resa  $3 \cdot R_l \cdot I_s^2$  e potenza assorbita pari a  $3 \cdot R_l \cdot I_s^2 + V_{ecc}^2/Re_{cc}$  dove  $Re_{cc} = V_{eccn}/I_{eccn} = 40 \Omega$ . Si ottiene  $rend = 0.97$ . L'angolo di carico è pari a  $\delta = \text{atan}(E_i/E_r) = 0.43$

## 2.

### ESERCIZIO 2

Sia dato un generatore sincrono caratterizzato dai seguenti dati

Potenza nominale  $A_n = 30 \text{ kVA}$

Fattore di potenza nominale  $\cos \phi_n = 0.8$

Tensione nominale  $V_n = 380 \text{ V}$

Reattanza sincrona in p.u.  $x_s = 160\%$

Tensione di eccitazione nominale  $V_{eccn} = 200 \text{ V}$

Corrente di eccitazione nominale  $I_{eccn} = 2.5 \text{ A}$

Rendimento nominale  $= 0.91$

Frequenza nominale  $f_n = 50 \text{ Hz}$

Il generatore alimenta un carico caratterizzato dai seguenti dati:

potenza  $P_l = 15 \text{ kW}$

$\cos \phi_l = 1$

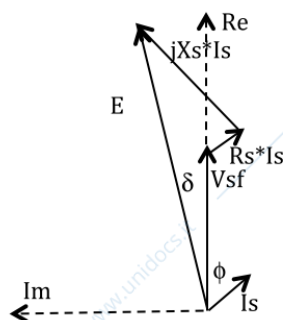
$V_l = V_n$

Si calcoli la tensione di eccitazione, il rendimento e l'angolo di carico  $\delta$ .

Nella soluzione si considera la seguente equazione vettoriale scritta nelle variabili di fase:

$$V_{sf} = R_s \cdot I_s + jX_s \cdot I_s + E$$

Proiettando tale equazione sui due assi reale e immaginario rappresentati in figura si ottiene:



$$E_r = V_{sf} + X_s I_s \sin \phi_l + R_s I_s \cos \phi_l$$

$$E_i = X_s I_s \cos \phi_l - R_s I_s \sin \phi_l$$

$$\text{Dove } V_{sf} = V_n / \sqrt{3}$$

La reattanza sincrona  $X_s$  è pari a  $X_s = x_s / 100 (V_n / (\sqrt{3} I_n)) = 7.7 \Omega$ , dove  $I_n = A_n / (\sqrt{3} V_n) = 45.6 \text{ A}$ . Per il calcolo della resistenza statorica si considera la seguente relazione relativa al rendimento nominale:

$\text{rend}_n = A_n \cos \phi_n / (A_n \cos \phi_n + 3 R_s I_n^2 + V_{eccn} I_{eccn})$ , da cui si ricava  $R_s = 0.3 \Omega$ .

La corrente  $I_s$  è pari a  $I_s = P_l / (\sqrt{3} V_n \cos \phi_l) = 22.79 \text{ A}$ , si ottiene quindi  $E_r = 226,2 \text{ V}$  e  $E_i = 175.5 \text{ V}$  quindi il modulo è dato da  $E = \sqrt{E_r^2 + E_i^2} = 286.3 \text{ V}$ .

Per calcolare la tensione di eccitazione è necessario considerare le equazioni precedenti nelle condizioni nominali di funzionamento. Si ottiene quindi:

$$E_{rn} = V_{sfn} + X_s I_{sn} \sin \phi_n + R_s I_{sn} \cos \phi_n = 440.9 \text{ V}$$

$$E_{in} = X_s I_{sn} \cos \phi_n - R_s I_{sn} \sin \phi_n = 272.6 \text{ V}$$

$$\text{Da cui } E_n = \sqrt{E_r^2 + E_i^2} = 518.4 \text{ V.}$$

La tensione di eccitazione sarà quindi pari a  $V_{ecc} = E V_{eccn} / E_n = 110.4 \text{ V}$ , il rendimento è dato dal rapporto tra la potenza resa e la potenza assorbita ed è pari a

$\text{Rend} = P_l / (P_l + 3 R_s I_s^2 + V_{ecc}^2 / R_{ecc}) = 0.96$  dove  $R_{ecc} = V_{eccn} / I_{eccn} = 80 \Omega$ . L'angolo di carico è pari a  $\delta = \text{atan}(E_i / E_r) = 0.65$ .

### 3.

Sia dato un generatore sincrono utilizzato solo per rifasare un carico. I dati del generatore sono i seguenti:

Potenza nominale  $A_n = 100 \text{ kVA}$

Fattore di potenza nominale  $\cos \phi_n = 1$

Tensione nominale  $V_n = 380 \text{ V}$

Reattanza sincrona in p.u.  $x_s = 165\%$

Tensione di eccitazione nominale  $V_{eccn} = 200 \text{ V}$

Corrente di eccitazione nominale  $I_{eccn} = 10 \text{ A}$

$R_s = 0 \Omega$

Frequenza nominale  $f_n = 50 \text{ Hz}$ .

Il carico da rifasare è caratterizzato dai seguenti dati ed è alimentato alla tensione nominale pari a  $V_n = 380 \text{ V}$ :

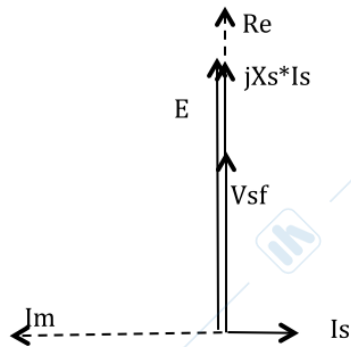
$R_l = 1 \Omega$

$X_l = 4 \Omega$

E deve essere rifasato ad un  $\cos \phi_{rif} = 0.9$ .

Determinare la tensione di eccitazione e l'angolo di carico

Se il generatore è utilizzato solo per rifasare erogherà una potenza attiva nulla e solo potenza reattiva, questo significa che il fattore di potenza dovrà essere pari a 0 (sfasamento tra tensione e corrente pari a 90 gradi). Si ha la situazione rappresentata in figura (dove  $R_s$  è considerata nulla)



Si ottiene quindi  $E = V_{sf} + X_s \cdot I_s$ .

La reattanza sincrona è data da  $X_s = x_s / 100 \cdot (V_n / (\sqrt{3} \cdot I_n)) = 2.38 \Omega$ , dove  $I_n = A_n / (\sqrt{3} \cdot V_n) = 151.9 \text{ A}$ .

Il carico è pari a  $Z = \sqrt{R_l^2 + X_l^2} = 5 \Omega$  e assorbe una corrente pari a  $I_l = V_n / (\sqrt{3} \cdot Z) = 43.02 \text{ A}$

Di conseguenza la potenza attiva e reattiva richieste dal carico sono pari a  $P_l = \sqrt{3} \cdot V_n \cdot I_l \cdot \cos \phi_l = 5.55 \text{ kW}$  e  $Q_l = P_l \cdot \tan \phi_l = 27.77 \text{ kVAR}$ , dove  $\phi_l = \arctan(X_l / R_l) = 1.373$ .

Per rifasare è necessario che il generatore sincrono fornisca una potenza reattiva  $Q_{\text{sinc}}$  pari a  $Q_{\text{sinc}} = Q_l - P_l \cdot \tan \phi_{\text{rif}} = 25.1 \text{ kVAR}$ . Da questa si può calcolare la corrente del sincro  $I_s = Q_{\text{sinc}} / (\sqrt{3} \cdot V_n) = 38.1 \text{ A}$ . Sostituendo quanto trovato si ottiene  $E = V_{sf} + X_s \cdot I_s = 310.18 \text{ V}$ . Per calcolare la tensione di eccitazione è necessario considerare le seguenti relazioni nelle condizioni nominali:

$$E_{rn} = V_{sf} + X_s \cdot I_n \cdot \sin \phi_n = 219.39 \text{ V}$$

$$E_{in} = X_s \cdot I_n \cdot \cos \phi_n = 361.99 \text{ V}$$

$$\text{Da cui si ricava il modulo di } E_n = \sqrt{(E_{rn}^2 + E_{in}^2)} = 423.29 \text{ V.}$$

Da cui si ottiene  $V_{\text{ecc}} = E \cdot V_{\text{eccn}} / E_n = 146.55 \text{ V}$ , l'angolo di carico è nullo.

#### 4.

##### Esercizio 4

Siano dati due generatori sincroni caratterizzati dai seguenti dati:

$$A_{n1} = 50 \text{ kVA}$$

$$V_{n1} = 380 \text{ V}$$

$$\cos \phi_{n1} = 0.8$$

$$R_{s1} = 0.3 \Omega$$

$$V_{\text{eccn1}} = 200 \text{ V}$$

$$I_{\text{eccn1}} = 5 \text{ A}$$

$$x_{s1\%} = 160\%$$

$$A_{n2} = 20 \text{ kVA}$$

$$V_{n2} = 380 \text{ V}$$

$$\cos \phi_{n2} = 1$$

$$R_{s2} = 0 \Omega$$

$$V_{\text{eccn2}} = 200 \text{ V}$$

$$I_{\text{eccn2}} = 2.5 \text{ A}$$

$$x_{s2\%} = 150\%$$

Il generatore 1 alimenta un carico caratterizzato dai seguenti dati:

$$P_l = 20 \text{ kW}$$

$$\cos\phi_l = 0.7$$

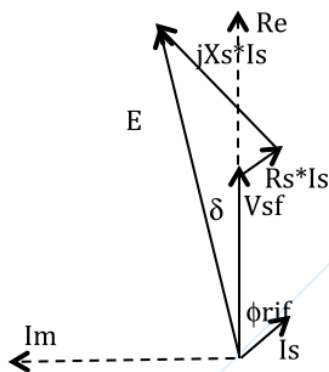
$$V_l = 380 \text{ V}$$

Il generatore 2 rifasa il carico a  $\cos\phi_{rif} = 0.9$  ed eroga una potenza attiva nulla. Calcolare la tensione di eccitazione dei due generatori e il rendimento totale.

Il generatore 1 alimenta il carico quindi eroga una potenza attiva pari  $P_l$  e una potenza reattiva  $Q = P_l \cdot \tan\phi_l = 9.68 \text{ kVAR}$ . La sua reattanza sincrona è data da  $X_{s1} = x_{s1}/100 \cdot (V_{1n}/(\sqrt{3} \cdot I_{1n})) = 4.6 \Omega$ , dove  $I_{1n} = A_{1n}/(\sqrt{3} \cdot V_{1n}) = 75.9 \text{ A}$ .

La corrente erogata dal generatore 1 è pari a  $I_{s1} = P_l / (\sqrt{3} \cdot V_{1n} \cdot \cos\phi_{rif}) = 33.76 \text{ A}$ .

Per il calcolo della  $E_1$  si considera il diagramma fasoriale di figura



$$E_{r1} = V_{sf} + X_{s1} \cdot I_{s1} \cdot \sin\phi_{rif} + R_{s1} \cdot I_{s1} \cdot \cos\phi_{rif} = 294.48 \text{ V}$$

$$E_{i1} = X_{s1} \cdot I_{s1} \cdot \cos\phi_{rif} - R_{s1} \cdot I_{s1} \cdot \sin\phi_{rif} = 104.79 \text{ V}$$

$$\text{Da cui si ricava } E_1 = \sqrt{(E_{r1})^2 + (E_{i1})^2} = 312.58 \text{ V}$$

Ripetendo tale calcolo nelle condizioni nominali si ottiene:

$$E_{rn1} = V_{sf} + X_{s1} \cdot I_{1n} \cdot \sin\phi_{n1} + R_{s1} \cdot I_{1n} \cdot \cos\phi_{n1} = 448.24 \text{ V}$$

$$E_{in1} = X_{s1} \cdot I_{1n} \cdot \cos\phi_{n1} - R_{s1} \cdot I_{1n} \cdot \sin\phi_{n1} = 267.14 \text{ V}$$

$$\text{Da cui si ricava } E_{n1} = \sqrt{(E_{rn1})^2 + (E_{in1})^2} = 521.8 \text{ V}$$

Si ottiene quindi che la tensione di eccitazione del generatore 1 è pari a  $V_{ecc1} = E/E_{n1} \cdot V_{eccn1} = 119.8 \text{ V}$ .

Il generatore 2 eroga una potenza attiva nulla e una potenza reattiva pari a quella di rifasamento. Di conseguenza il  $\cos\phi$  di tale generatore è pari a zero e  $\sin\phi = 1$ . La potenza reattiva di rifasamento erogata dal generatore 2 è pari a  $Q_{rif} = Q_l - P_l \cdot \tan\phi_l = 10.72 \text{ kVAR}$ , dove  $Q_l = P_l \cdot \tan\phi_l = 20.40 \text{ kVAR}$ . La corrente erogata dal generatore 2 è quindi pari a  $I_{s2} = Q_{rif} / (\sqrt{3} \cdot V_{2n}) = 16.28 \text{ A}$ . Si ottiene quindi:  $E_2 = V_{sf} + X_{s2} \cdot I_{s2} = 395.74 \text{ V}$ , con  $X_{s2} = x_{s2}/100 \cdot (V_{2n}/(\sqrt{3} \cdot I_{2n})) = 10.8 \Omega$ , dove  $I_{2n} = A_{2n}/(\sqrt{3} \cdot V_{2n}) = 30.4 \text{ A}$ . Considerando le medesime equazioni in condizioni nominali si ottiene:

$$E_{rn2} = V_{sf} + X_{s2} \cdot I_{2n} \cdot \sin\phi_{n2} = 219.39 \text{ V}$$

$$E_{in2} = X_{s2} \cdot I_{2n} \cdot \cos \phi_{n2} = 329.08 \text{ V}$$

$$\text{Da cui si ricava } E_{n2} = \sqrt{(E_{rn2})^2 + (E_{in2})^2} = 395.51 \text{ V}$$

$$\text{Da cui si ottiene: } V_{e2} = E_{n2} \cdot V_{e2n} = 200.11 \text{ V}$$

Il rendimento totale è dato dal rapporto tra la potenza resa e quella assorbita:

$$\text{rend} = (P_I) / (P_I + 3 \cdot R_{s1} \cdot I_{s1}^2 + V_{e1}^2 / R_{e1} + V_{e2}^2 / R_{e2}) = 0.88, \text{ dove}$$

$$R_{e1} = V_{e1n} / I_{e1n} = 40 \text{ } \Omega \text{ e } R_{e2} = V_{e2n} / I_{e2n} = 80 \text{ } \Omega.$$