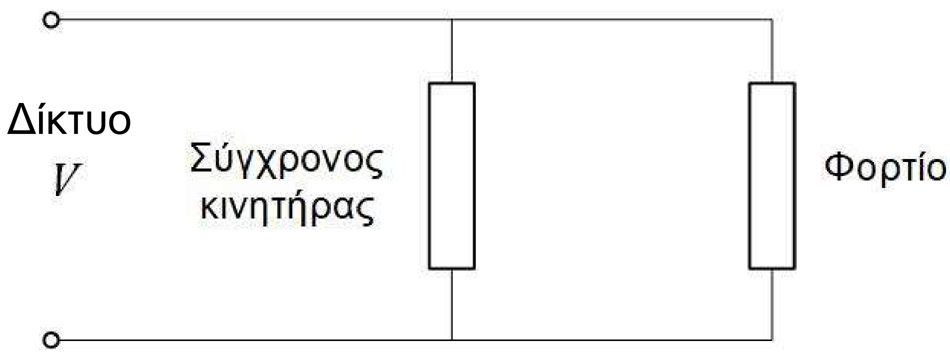
Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ)

Σύγχρονη Μηχανή - Ασκήσεις

Σταύρος Αθ. Παπαθανασίου
Καθ. ΕΜΠ

Άσκηση 1

Εγκατάσταση καταναλωτή περιλαμβάνει φορτίο κίνησης με σύγχρονο κινητήρα και λοιπά φορτία, με τα εξής στοιχεία:



Στοιχεία λοιπών φορτίων:

$$S_\varphi = 50\ kVA, cos\varphi = 0{,}8\ \varepsilon\pi\alpha\gamma.$$

Στοιχεία κινητήρα:

$$S_{ON} = 100\ kVA, V_{ON} = 400\ V$$

$$f = 50\ Hz, R = 0, X = 1{,}5\ \alpha.\mu.$$

$$P = 4\ \pi\acute{o}\lambda o\iota$$

Ο κινητήρας λειτουργεί υπό ονομαστική τάση δικτύου $V = V_{\mathrm{ON}}$, απορροφώντας ισχύ $80\ kW$. Ζητούνται:

α) Ποια η ΗΕΔ διέγερσης E_f του σύγχρονου κινητήρα ώστε ο συνολικός Σ.Ι. της εγκατάστασης του καταναλωτή να είναι ίσος με τη μονάδα;

β) Πόση είναι η γωνία ροπής;

γ) Αν μειωθεί κατά 20% η τάση διέγερσης, πόσος θα γίνει ο συνολικός Σ.Ι.;

Λύση

α)

Για να είναι ο συνολικός Σ.Ι. ίσος με τη μονάδα, θα πρέπει η συνολική άεργος ισχύς που καταναλώνει το σύστημα του φορτίου-κινητήρα να είναι ίση με μηδέν. Δηλαδή:

$$Q_k = -Q_\varphi$$

$$\tilde{S}_\varphi = P_\varphi + jQ_\varphi = S_\varphi cos\varphi + jS_\varphi sin\varphi$$

Για $cos\varphi = 0{,}8\ (sin\varphi = 0{,}6)$:

$$Q_\varphi = S_\varphi sin\varphi = 50 \cdot 0{,}6 = 30\ kVAr$$

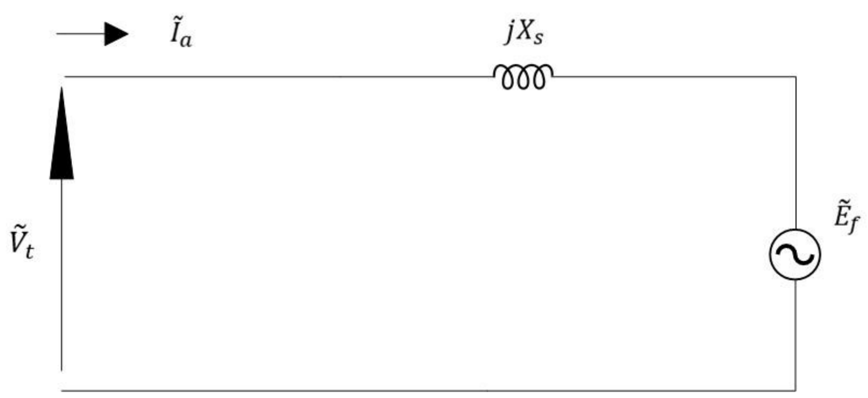
Με σύμβαση κινητήρα για τις ισχείς (θετικές όταν απορροφούνται) και βάση ισχύος τα ονομαστικά kVA του κινητήρα (100 kVA):

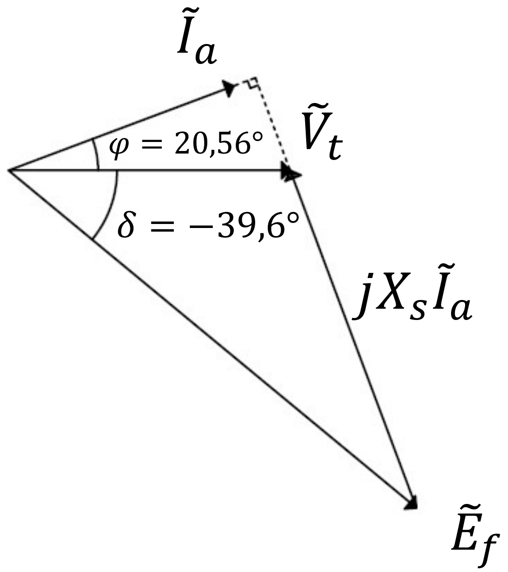
$$P_k = 80\ kW = 0{,}8\ \alpha.\mu.$$

$$Q_k = -30\ kVAr = -0{,}3\ \alpha.\mu.$$

Το ρεύμα του σύγχρονου κινητήρα είναι:

$$\tilde{I}_a = \frac{\tilde{S}_k^*}{\tilde{V}_t^*} = \frac{0{,}8 + j0{,}3}{1} = 0{,}8 + j0{,}3 = 0{,}854\angle 20{,}56°\ \alpha.\mu.$$





Από το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα:

$$\tilde{V}_t = \tilde{E}_f + jX_s\tilde{I}_a$$

Θεωρώντας ως διάνυσμα αναφοράς το $\tilde{V}_t$

$$\tilde{V}_t = V_t\angle 0° = 1\angle 0°$$

προκύπτει

$$\tilde{E}_f = 1\angle 0° - j1{,}5 \cdot (0{,}8 + j0{,}3) = 1{,}88\angle - 39{,}6°\ \alpha.\mu.$$

Επομένως η τάση διέγερσης είναι

$$E_f = 1{,}88 \cdot 400 = 752\,V \text{ (πολική)}$$

Λειτουργία σε υπερδιέγερση, αφού παράγει άεργο ισχύ.

β)

Γωνία ροπής = γωνία μεταξύ διανυσμάτων $\tilde{E}_f$ και $\tilde{V}_t$:

$$\delta = -39{,}6° \text{ (}\delta < 0 \text{ εφόσον πρόκειται για κινητήρα)}$$

γ)

Στην περίπτωση αυτή έχουμε:

$$E_f' = 0{,}8E_f = 1{,}504\ \alpha.\mu.$$

για V_t, P_k σταθερά.

Η ενεργός ισχύς του σύγχρονου κινητήρα θα είναι:

$$P_k = \frac{E_f V_t}{X_s} sin\delta \Rightarrow sin\delta = \frac{P_k X_s}{E_f V_t} = \frac{(-0{,}8)\cdot 1{,}5}{1{,}504 \cdot 1} = -0{,}798 \Rightarrow \delta = -53°$$

Από το ισοδύναμο κύκλωμα:

$$\tilde{V}_t = \tilde{E}_f + jX_s\tilde{I}_a \Rightarrow \tilde{I}_a = \frac{\mathrm{V_t}\angle 0° - E_f\angle\delta}{jX_s} = \frac{1\angle 0° - 1{,}504\angle -53°}{j1{,}5} \Longrightarrow$$

$$\tilde{I}_a = 0{,}803\angle -4{,}52°\ \alpha.\mu.$$

Η ισχύς του κινητήρα είναι:

$$\tilde{S}_k = P_k + jQ_k = \tilde{V}_t \cdot \tilde{I}_a^* = 1\angle 0° \cdot 0{,}803\angle 4{,}52° = 0{,}8 + j0{,}063\ \alpha.\mu.$$

Άρα

$$\tilde{S}_k = 80\ (kW) + j6{,}3\ (kVAr)$$

Η ισχύς του φορτίου είναι

$$\tilde{S}_\varphi = 40\ (kW) + j30\ (kVAr)$$

Άρα ο συνολικός Σ.Ι. είναι

$$cos\varphi_{o\lambda} = \frac{P_{o\lambda}}{S_{o\lambda}} = \frac{80+40}{\sqrt{(80+40)^2 + (6{,}3+30)^2}} = 0{,}95\ \varepsilon\pi\alpha\gamma.$$

Άσκηση 2

Ένας σύγχρονος τριφασικός κινητήρας με 30 πόλους, 50 Hz, 2000 HP, 2,3 kV, σε σύνδεση αστέρα, αποδίδει στο μηχανικό φορτίο την ονομαστική του ισχύ και λειτουργεί με συντελεστή ισχύος 1. Η σύγχρονη αντίδραση ανά φάση είναι 1,95 Ω, ενώ η ωμική αντίσταση μπορεί να αμεληθεί.

α) Να υπολογιστεί η μέγιστη ροπή που μπορεί να αποδοθεί από τον κινητήρα, αν συνδεθεί σε ένα σύστημα σταθερής τάσης 2,3 kV, σταθερής συχνότητας 50 Hz και η διέγερση παραμένει ίση με αυτή που δίνει μοναδιαίο συντελεστή ισχύος για ονομαστικό μηχανικό φορτίο.

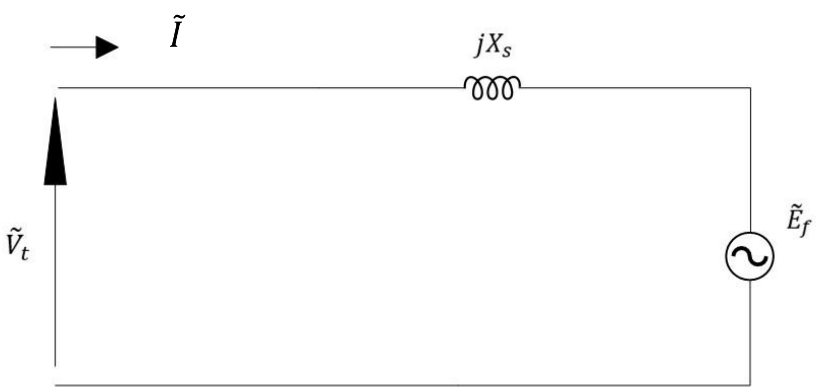
β) Αντί για σύστημα σταθερής τάσης, θεωρήστε ότι παρέχεται ηλεκτρική ισχύς στον κινητήρα από σύγχρονη τριφασική διπολική γεννήτρια, σε σύνδεση αστέρα με στοιχεία 2,3 kV, 1,75 MVA, 3000 ΣΑΛ, με σύγχρονη αντίδραση ανά φάση 2,65 Ω (η αντίσταση αμελείται). Οι διεγέρσεις γεννήτριας και κινητήρα ρυθμίζονται έτσι ώστε ο κινητήρας να εργάζεται με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και με την ονομαστική του τάση υπό πλήρες φορτίο. Με σταθερές τις διεγέρσεις, το μηχανικό φορτίο του κινητήρα αυξάνεται. Να υπολογιστεί η μέγιστη ροπή του κινητήρα υπό αυτές τις συνθήκες και η τάση λειτουργίας του κινητήρα, όταν αποδίδει τη μέγιστη ροπή. Οι μηχανικές απώλειες του κινητήρα αμελούνται.

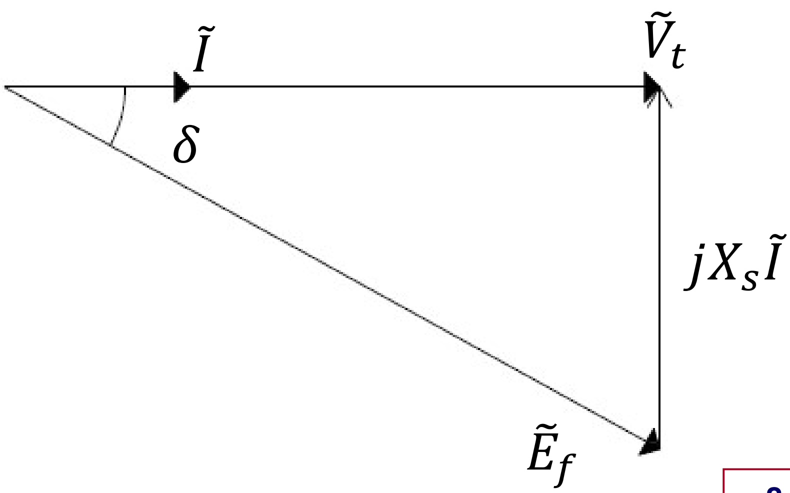
Λύση

α)

$$2000\ HP = 2000\ HP \cdot 746 \frac{W}{HP} \approx 1500 \cdot 10^3\ W$$

$$P_n = \sqrt{3} V_t I_n cos\varphi_n \Rightarrow I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} V_t cos\varphi_n} = \frac{1500 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 2300 \cdot 1} = 376\ A$$





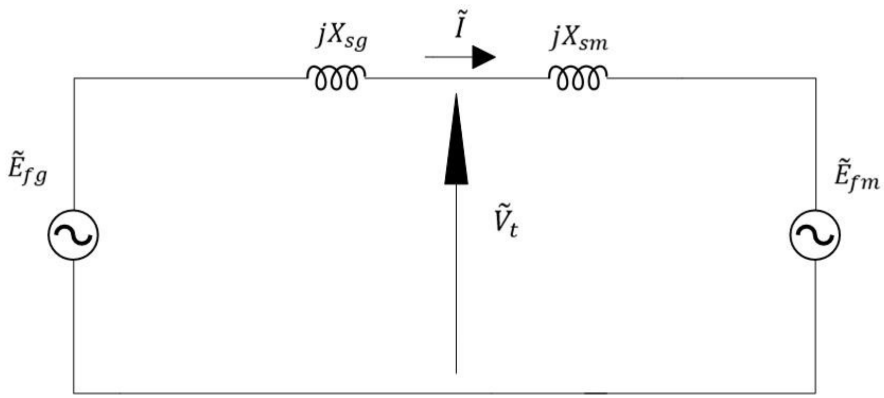
$$\tilde{E}_f = \tilde{V}_t - jX_s\tilde{I} = \frac{2300}{\sqrt{3}}\angle 0° - j1{,}95 \cdot 376 = 1517\angle -28{,}9°\, V$$

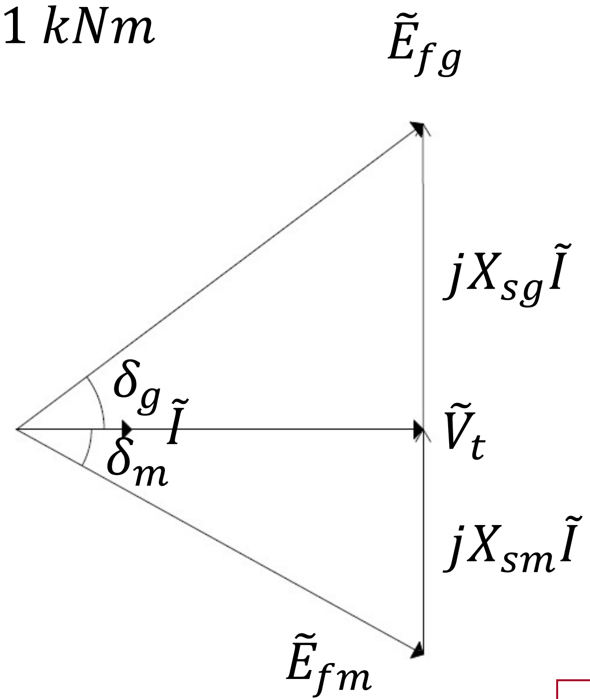
$$P_{max} = \frac{3 \cdot V_t^{\varphi} E_f^{\varphi}}{X_s} = \frac{3 \cdot \frac{2300}{\sqrt{3}} \cdot 1517}{1{,}95} = \frac{\sqrt{3} \cdot 2300 \cdot 1517}{1{,}95} = 3{,}1\, MW$$

$$\omega_s = \frac{2\pi f_e}{P/2} = \frac{100\pi}{30/2} = \frac{100\pi}{15}\frac{r}{s}$$

$$T_{max} = \frac{P_{max}}{\omega_s} = \frac{3{,}1 \cdot 10^6}{\frac{100\pi}{15}} = 148{,}01\, kNm$$

β)





Για τον κινητήρα ισχύουν αυτά που βρήκαμε στο ερώτημα (α), δηλαδή:

$$\tilde{E}_f = 1517\angle -28{,}9°\,V$$

$$\tilde{I} = 376\angle 0°\,\mathrm{A}$$

Για τη γεννήτρια:

$$\tilde{E}_{fg} = \tilde{V}_t + jX_{sg}\tilde{I} = \frac{2300}{\sqrt{3}}\angle 0° + j2{,}65 \cdot 376 = 1660\angle 36{,}88°\,V$$

Άρα

$$P_{max} = \frac{3 \cdot E_{fm}^{\varphi} E_{fg}^{\varphi}}{X_{sm} + X_{sg}} = \frac{3 \cdot 1517 \cdot 1660}{1{,}95 + 2{,}65} = 1642\;kW$$

$$T_{max} = \frac{P_{max}}{\omega_s} = \frac{1642 \cdot 10^3}{\frac{100\pi}{15}} = 78{,}4\;kNm$$

Υπό συνθήκες μέγιστης ροπής, θεωρούμε γωνίες διανυσμάτων:

$$\tilde{E}_{fg} = 1660\angle 0°\,V$$

$$\tilde{E}_{fm} = 1517\angle -90°\,V$$

Άρα

$$\tilde{I} = \frac{\tilde{E}_{fg} - \tilde{E}_{fm}}{jX_{sg} + jX_{sm}} = \frac{1660 - (-j1517)}{j2{,}65 + j1{,}95} = 488{,}87\angle -47{,}58°\ A$$

$$\tilde{V}_t = \tilde{E}_{fg} - jX_{sg}\tilde{I} = 1660 - j2{,}65 \cdot 488{,}87\angle -47{,}58° = 1122\angle -51{,}16°\ V$$

$$V_t^{\varphi} = 1122\ \mathrm{V}$$

$$V_t^{\pi} = \sqrt{3}V_t^{\varphi} = 1943\ V$$

Άσκηση 5

Σύγχρονη τριφασική διπολική γεννήτρια 150 MVA, 20 kV, 50 Hz συνδεσμολογίας αστέρα έχει σύγχρονη επαγωγική αντίδραση 1,5 αμ, αμελητέα ωμική αντίσταση και αμελητέες απώλειες περιστροφής. Το ονομαστικό ρεύμα διεγέρσεως της γεννήτριας είναι 5 A (ρεύμα διεγέρσεως το οποίο εξασφαλίζει ονομαστική τάση ακροδεκτών σε κενό φορτίο όταν ο δρομέας στρέφεται με ονομαστική ταχύτητα) και το μαγνητικό της κύκλωμα είναι γραμμικό. Η γεννήτρια συνδέεται μέσω μετασχηματιστή 20 kV / 150 kV, 150 MVA, 50 Hz, X = 10% σε ζυγό σταθερής τάσεως (άπειρο σύστημα) 165 kV.

α) Να υπολογιστούν οι τιμές σε Ω της ανά φάση επαγωγικής αντίστασης του μετασχηματιστή X' και X'' ανηγμένες στην πλευρά της ΧΤ και της ΥΤ, αντίστοιχα.

β) Να υπολογιστούν η ροπή, η ΗΕΔ και η γωνία ροπής δ της γεννήτριας όταν αποδίδονται 80 MW στο άπειρο σύστημα υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος.

γ) Εάν το ρεύμα διεγέρσεως της γεννήτριας αυξηθεί σε 8 A ενώ η γεννήτρια παράγει την ίδια ενεργό ισχύ, να υπολογιστεί η άεργος ισχύς Q που αποδίδεται στο άπειρο σύστημα.

Λύση

α)

$$z_{B,XT} = \frac{(20 \cdot 10^3)^2}{150 \cdot 10^6} = 2{,}67\ \Omega$$

$$z_{B,YT} = \frac{(150 \cdot 10^3)^2}{150 \cdot 10^6} = 150\ \Omega$$

$$X' = 0{,}1 \cdot 2{,}67 = 0{,}267\ \Omega$$

$$X'' = 0{,}1 \cdot 150 = 15\ \Omega$$

β)

$$\omega_s = \frac{2\pi 50}{2/2} = 314\,\frac{r}{s}$$

$$T_A = \frac{P}{\omega_s} = \frac{80 \cdot 10^6}{314} = 254{,}78\ kNm$$

$$P = \frac{80}{150} = 0{,}533\ \alpha.\mu.$$

$$V_{\Sigma} = \frac{165}{150} = 1{,}1\ \alpha.\mu.$$
$$cos\varphi = 1$$

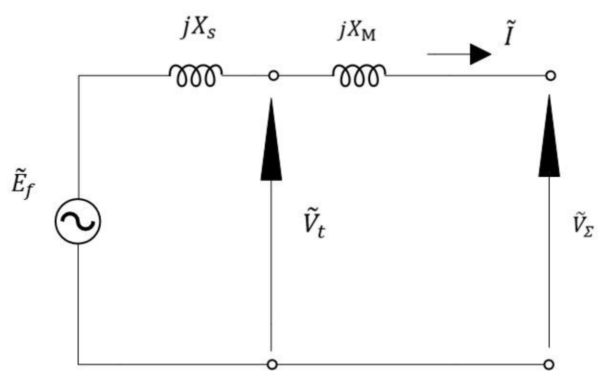
Άρα

$$I = \frac{P}{V_{\Sigma}} = \frac{0{,}533}{1{,}1} = 0{,}4848\ \alpha.\mu.$$

$$\tilde{E}_f = \tilde{V}_{\Sigma} + j(X_M + X_s)\tilde{I}_a = 1{,}1 + j1{,}6 \cdot 0{,}4848 = 1{,}1 + j0{,}776\ \alpha.\mu.$$
$$= 1{,}346\angle 35{,}2°\ V \rightarrow E_f^{\varphi} = 15{,}5\ kV$$

$$\tilde{V}_t = \tilde{V}_{\Sigma} + jX_M\tilde{I}_a = 1{,}1 + j0{,}1 \cdot 0{,}4848 = 1{,}1 + j0{,}04848\ \alpha.\mu.$$
$$= 1{,}101\angle 2{,}5°\ V$$

$$\delta_G = 35{,}2° - 2{,}5° = 32{,}7°$$



γ)

$$E_f' = \frac{8}{5} = 1{,}6\ \alpha.\mu.$$

$$P = \frac{E_f V_t}{X_s + X_M} sin\delta' \Rightarrow sin\delta' = \frac{0{,}533 \cdot 1{,}6}{1{,}6 \cdot 1{,}1} \rightarrow \delta' = 28{,}98°$$

$$Q = \frac{E_f V_t}{X_s + X_M} cos\delta' - \frac{V_t^2}{X_s + X_M} = \frac{1{,}6 \cdot 1{,}1}{1{,}6} cos 28{,}98° - \frac{1{,}1^2}{1{,}6} = 0{,}206\ \alpha.\mu.$$
$$= 30{,}9\ MVAr$$