

Conversão Eletromecânica de Energia II

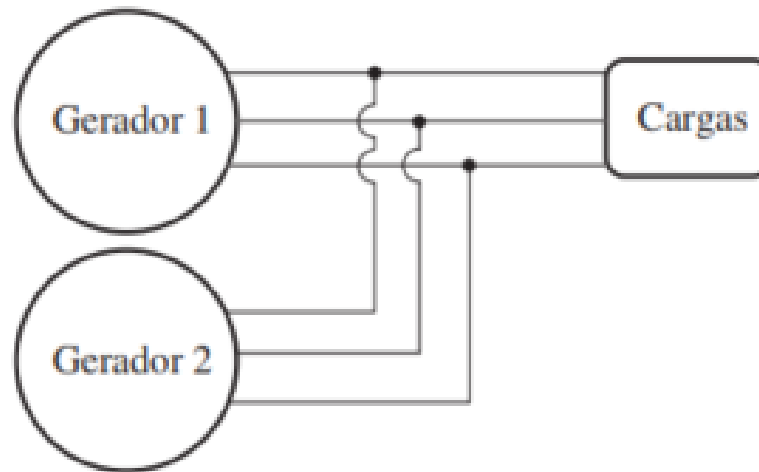
Prof. Victor Aguiar

Módulo IV – Tópicos em Geração e Motores Síncronos



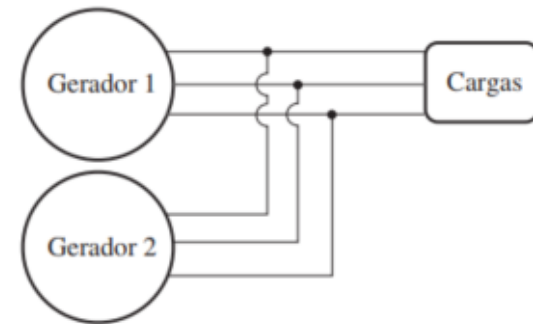
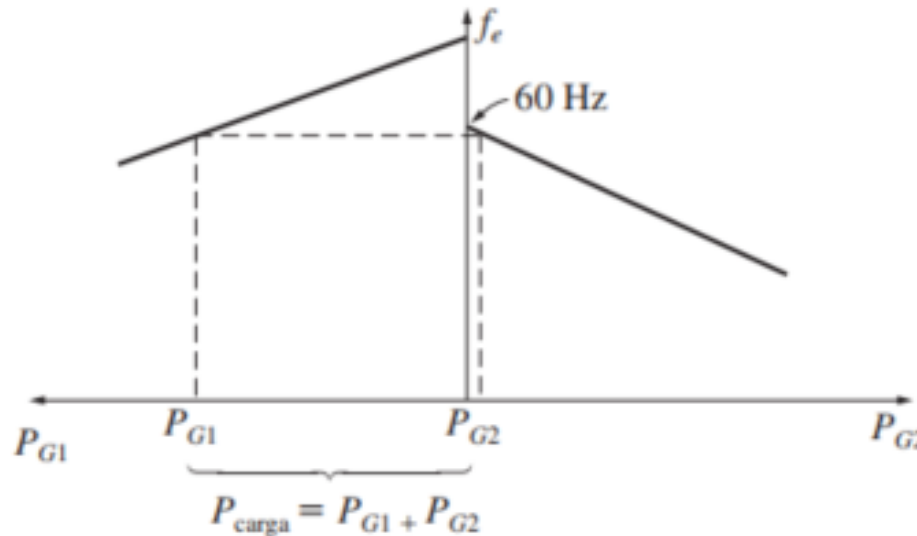
Operação em Paralelo

- 2 geradores em paralelo para atender a carga específica
 - Condição básica:
 - Soma das potências ativa e reativa fornecida pelos 2 geradores é igual as potências demandadas pela carga



Operação em Paralelo

- 2 geradores em paralelo para atender a carga específica

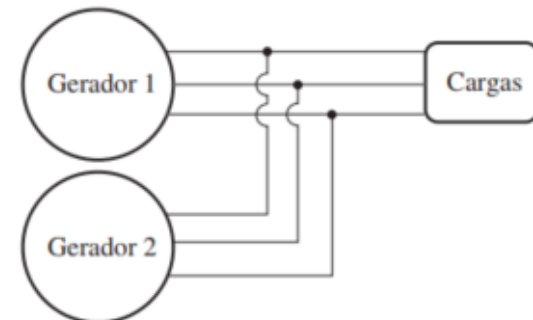


$$P_{tot} = P_{\text{carga}} = P_{G1} + P_{G2}$$

$$Q_{tot} = Q_{\text{carga}} = Q_{G1} + Q_{G2}$$

Operação em Paralelo

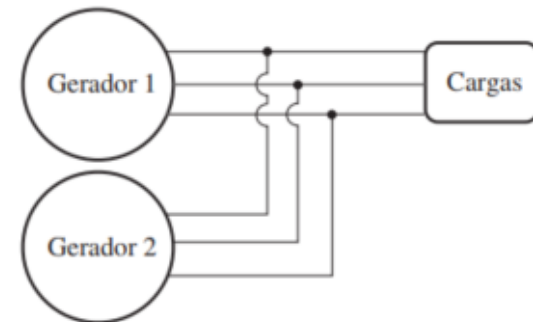
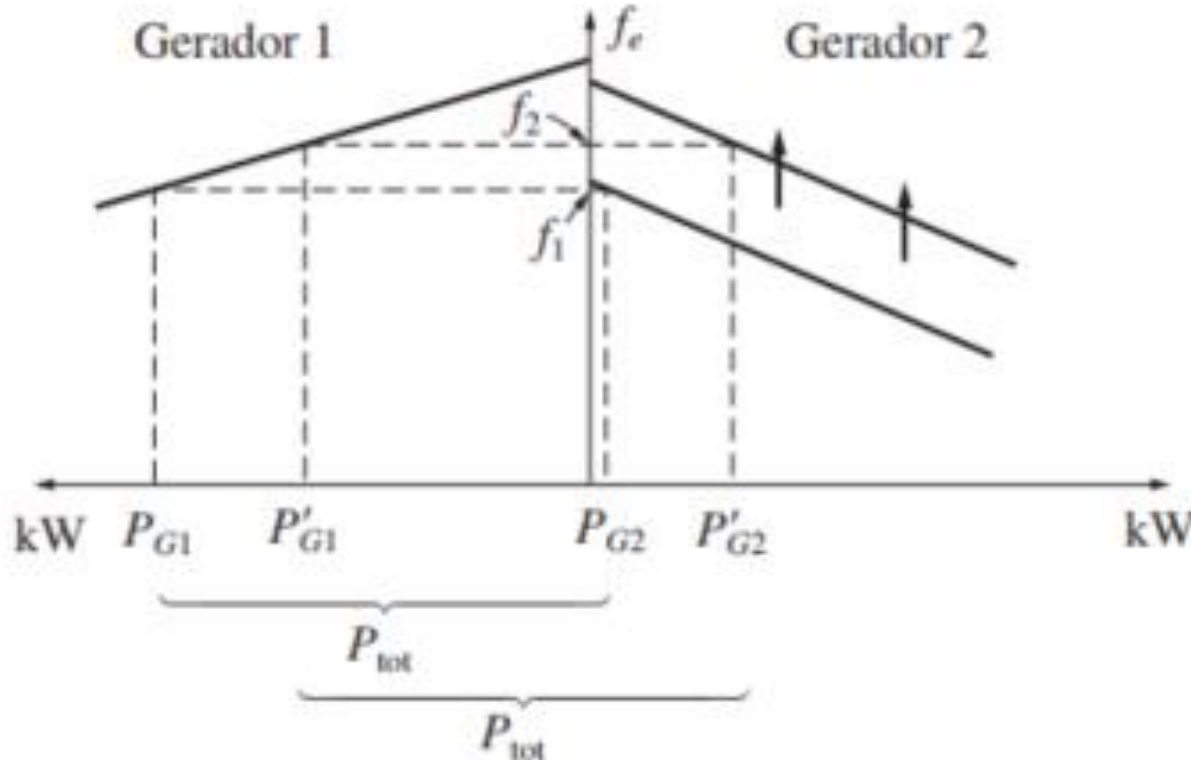
- 2 geradores em paralelo para atender a carga específica
 - Ponte ajuste de G2 no regulador – aumentar:



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Operação em Paralelo

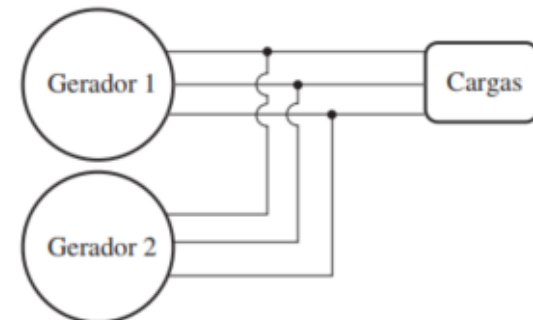
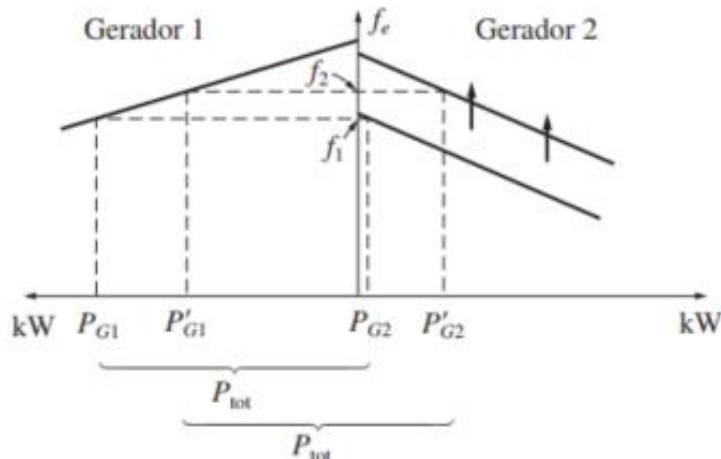
- 2 geradores em paralelo para atender a carga específica
 - Ponte ajuste de G2 no regulador – aumentar:



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Operação em Paralelo

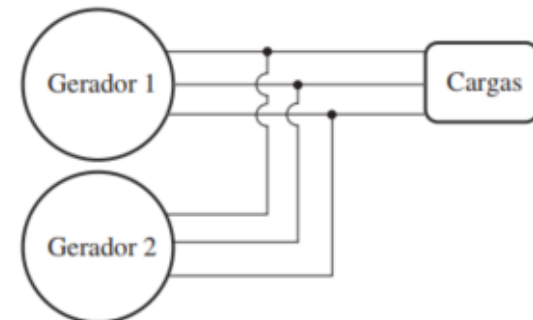
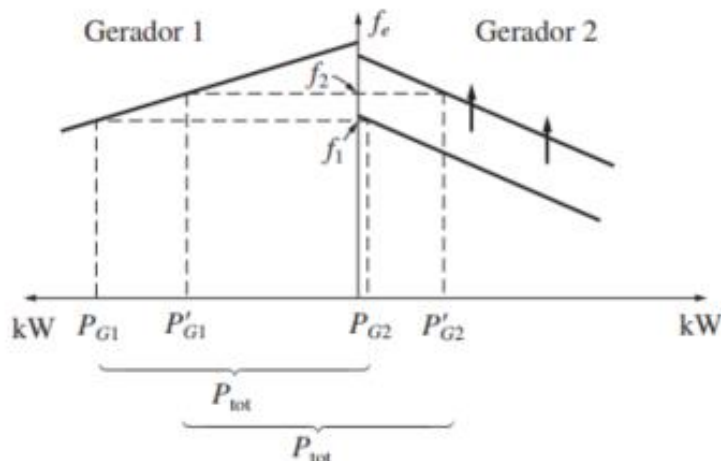
- 2 geradores em paralelo para atender a carga específica
 - Ponte ajuste de G2 no regulador – aumentar:
 - Eleva a frequência do sistema



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Operação em Paralelo

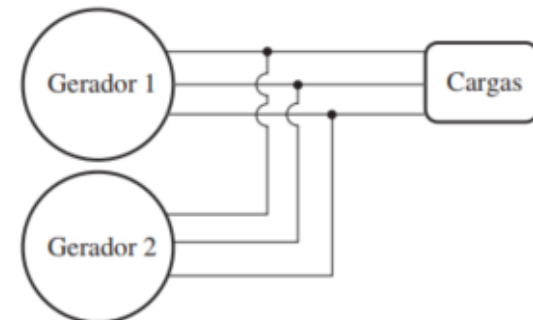
- 2 geradores em paralelo para atender a carga específica
 - Ponte ajuste de G2 no regulador – aumentar:
 - Eleva a frequência do sistema
 - Eleva a potência fornecida pelo G2 e reduz a potência fornecida por G1.



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Operação em Paralelo

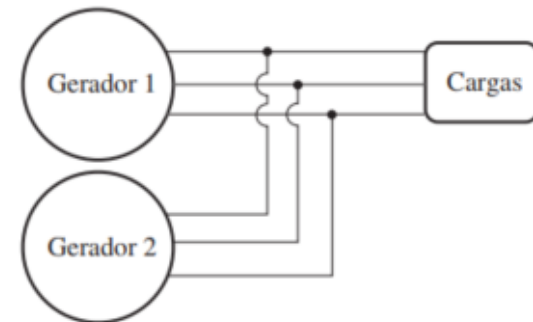
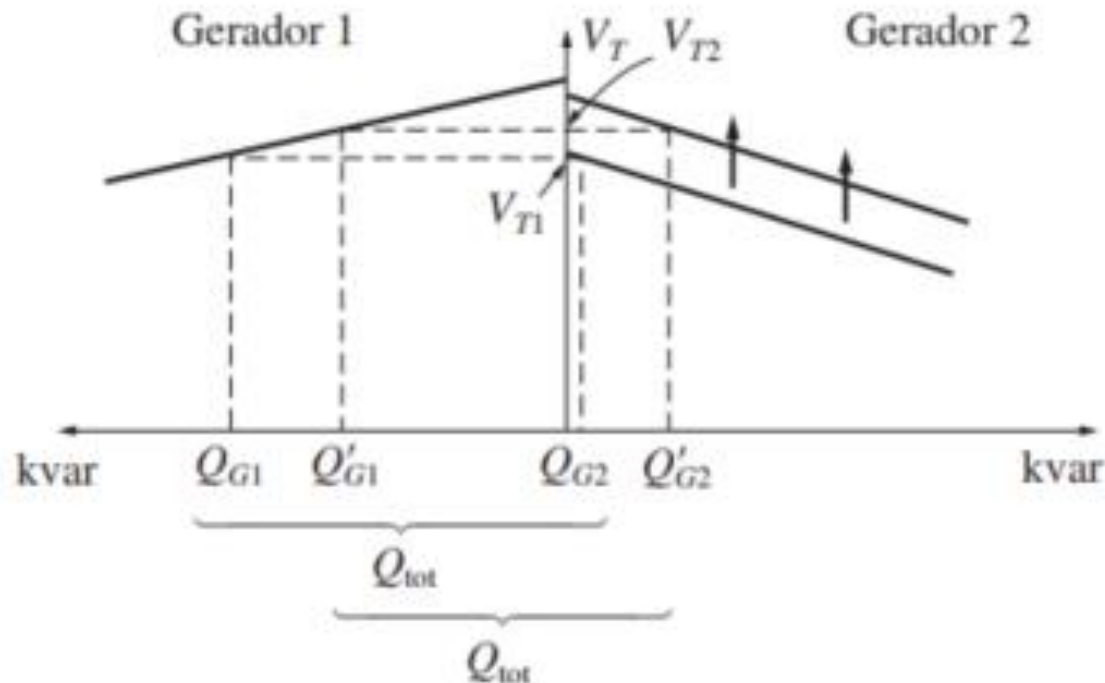
- 2 geradores em paralelo para atender a carga específica
 - Ao elevar a corrente de campo em G2, após o ajuste anterior?



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Operação em Paralelo

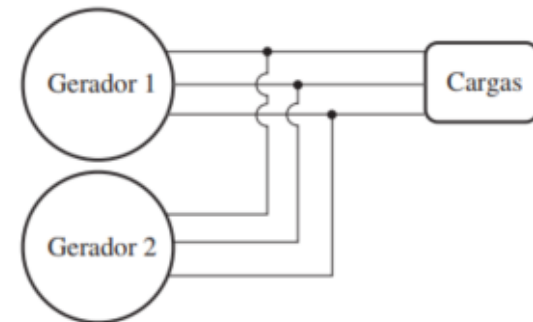
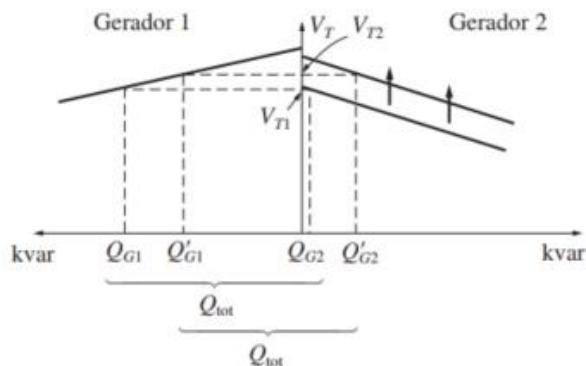
- 2 geradores em paralelo para atender a carga específica
 - Ao elevar a corrente de campo em G2, após o ajuste anterior?



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Operação em Paralelo

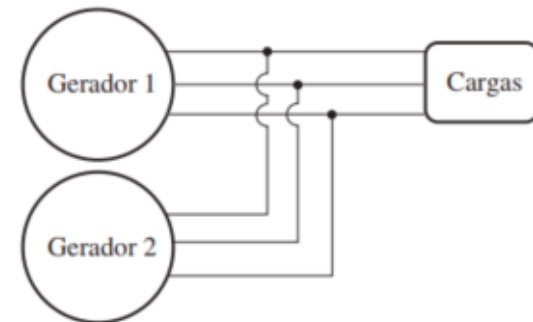
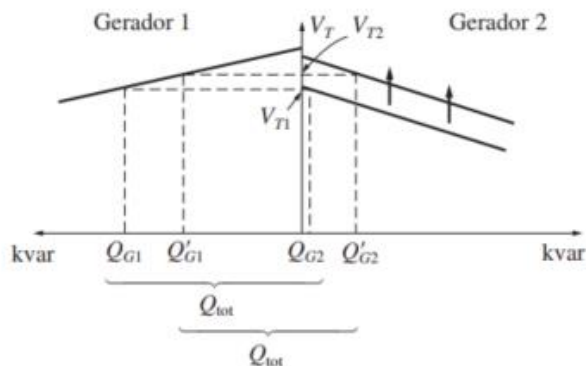
- 2 geradores em paralelo para atender a carga específica
 - Ao elevar a corrente de campo em G2, após o ajuste anterior?
 - Tensão terminal do sistema é aumentada



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Operação em Paralelo

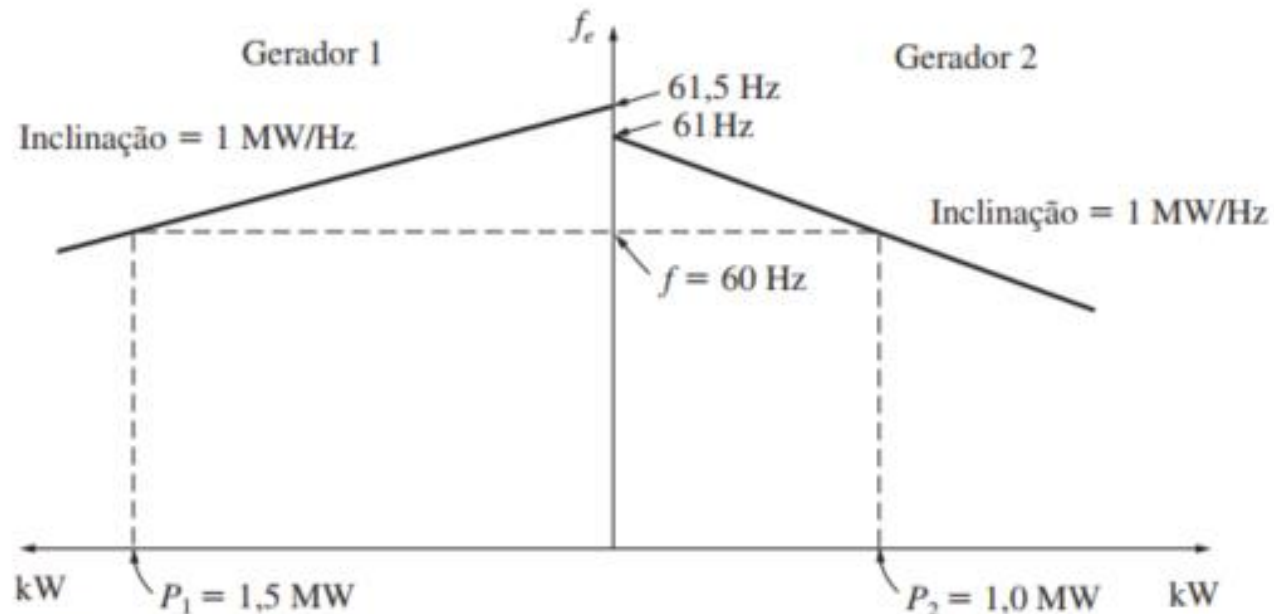
- 2 geradores em paralelo para atender a carga específica
 - Ao elevar a corrente de campo em G2, após o ajuste anterior?
 - Tensão terminal do sistema é aumentada
 - Potência reativa fornecida por G2 é aumentada e a fornecida por G1 é reduzida



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Exemplo 8

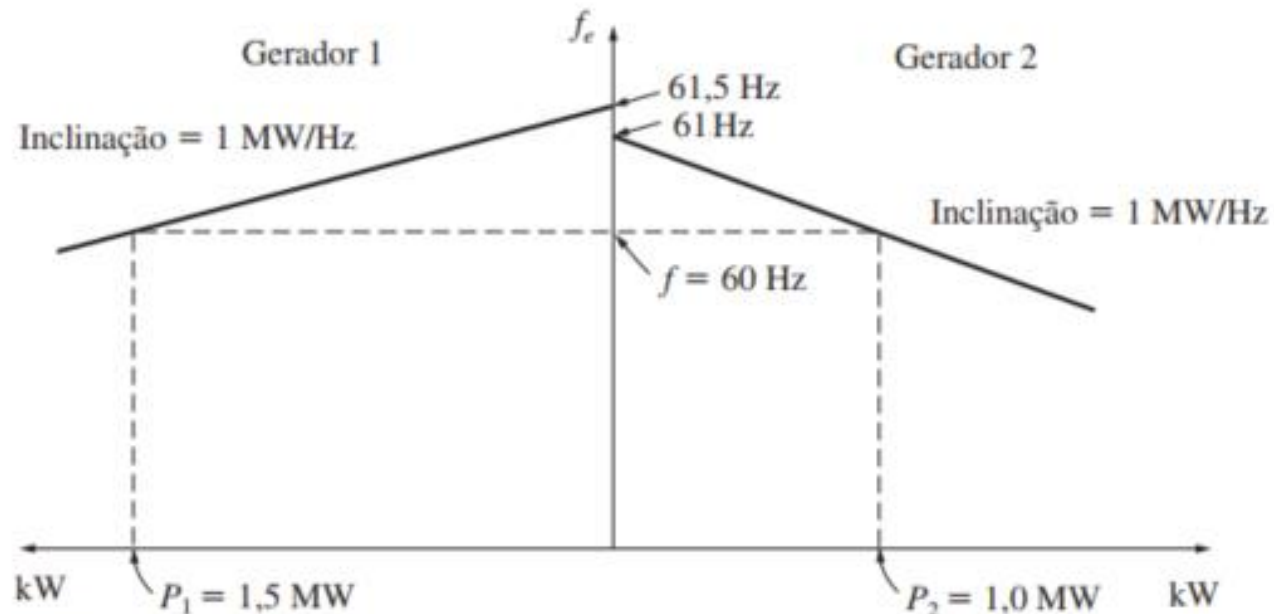
A figura mostra dois geradores alimentando uma carga. G1 tem uma frequência a vazio de 61,5 Hz e uma inclinação s_{p1} de 1 MW/Hz. O G2 tem uma frequência a vazio de 61 Hz e uma inclinação s_{p2} de 1 MW/Hz. Os dois geradores estão abastecendo uma carga real totalizando 2,5 MW, com FP 0,8 atrasado. O diagrama resultante de potência versus frequência do sistema está mostrada na figura abaixo. (a) em que frequência esse sistema opera e quanta potência é fornecida por cada um dos geradores?



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Exemplo 8

A figura mostra dois geradores alimentando uma carga. G1 tem uma frequência a vazio de 61,5 Hz e uma inclinação s_{p1} de 1 MW/Hz. O G2 tem uma frequência a vazio de 61 Hz e uma inclinação s_{p2} de 1 MW/Hz. Os dois geradores estão abastecendo uma carga real totalizando 2,5 MW, com FP 0,8 atrasado. O diagrama resultante de potência versus frequência do sistema está mostrada na figura abaixo. (a) em que frequência esse sistema opera e quanta potência é fornecida por cada um dos geradores?



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

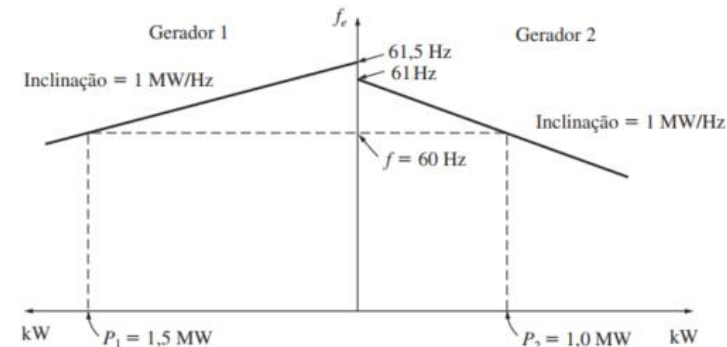
Exemplo 8

A figura mostra dois geradores alimentando uma carga. G1 tem uma frequência a vazio de 61,5 Hz e uma inclinação s_{p1} de 1 MW/Hz. O G2 tem uma frequência a vazio de 61 Hz e uma inclinação s_{p2} de 1 MW/Hz. Os dois geradores estão abastecendo uma carga real totalizando 2,5 MW, com FP 0,8 atrasado. O diagrama resultante de potência versus frequência do sistema está mostrada na figura abaixo. (a) em que frequência esse sistema opera e quanta potência é fornecida por cada um dos geradores?

$$P_1 = s_{p1} (f_{vz,1} - f_{sis}) \rightarrow P_2 = s_{p2} (f_{vz,2} - f_{sis})$$

$$P_{\text{carga}} = P_1 + P_2$$

$$P_{\text{carga}} = s_{p1} (f_{vz,1} - f_{sis}) + s_{p2} (f_{vz,2} - f_{sis})$$



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Exemplo 8

A figura mostra dois geradores alimentando uma carga. G1 tem uma frequência a vazio de 61,5 Hz e uma inclinação s_{p1} de 1 MW/Hz. O G2 tem uma frequência a vazio de 61 Hz e uma inclinação s_{p2} de 1 MW/Hz. Os dois geradores estão abastecendo uma carga real totalizando 2,5 MW, com FP 0,8 atrasado. O diagrama resultante de potência versus frequência do sistema está mostrada na figura abaixo. (a) em que frequência esse sistema opera e quanta potência é fornecida por cada um dos geradores?

$$P_{\text{carga}} = 1,0(61,5 - f_{\text{sis}}) + 1,0(61,0 - f_{\text{sis}})$$

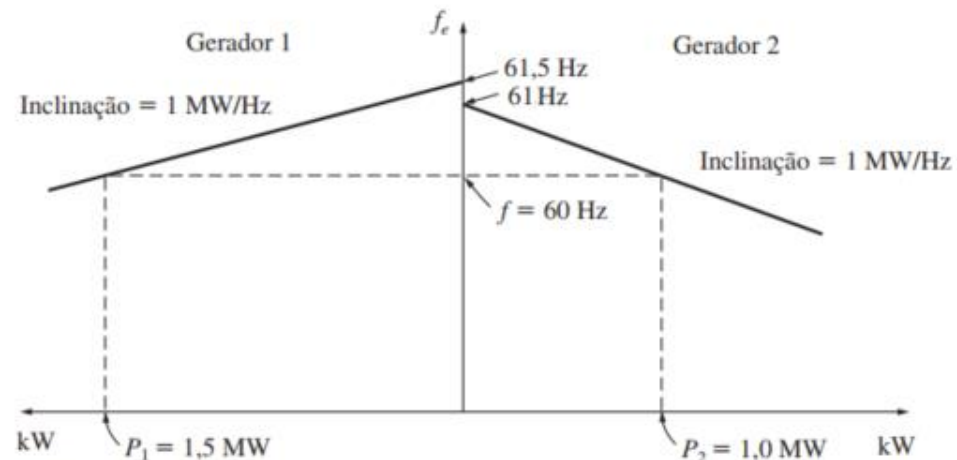
$$2,5 = 61,5 - f_{\text{sis}} + 61,0 - f_{\text{sis}}$$

$$2f_{\text{sis}} = 61,5 + 61,0 - 2,5$$

$$f_{\text{sis}} = 60 \text{ Hz}$$

$$P_1 = 1,0(61,5 - 60) = 1,5 \text{ MW}$$

$$P_2 = 1,0(61 - 60) = 1,0 \text{ MW}$$



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Exemplo 8

A figura mostra dois geradores alimentando uma carga. G1 tem uma frequência a vazio de 61,5 Hz e uma inclinação s_{p1} de 1 MW/Hz. O G2 tem uma frequência a vazio de 61 Hz e uma inclinação s_{p2} de 1 MW/Hz. Os dois geradores estão abastecendo uma carga real totalizando 2,5 MW, com FP 0,8 atrasado. O diagrama resultante de potência versus frequência do sistema está mostrada na figura abaixo. (b) Agora, suponha que uma carga adicional de 1 MW seja adicionada a esse sistema de potência. Qual será a nova frequência do sistema e quanta potência G1 e G2 fornecerão?

Exemplo 8

A figura mostra dois geradores alimentando uma carga. G1 tem uma frequência a vazio de 61,5 Hz e uma inclinação s_{p1} de 1 MW/Hz. O G2 tem uma frequência a vazio de 61 Hz e uma inclinação s_{p2} de 1 MW/Hz. Os dois geradores estão abastecendo uma carga real totalizando 2,5 MW, com FP 0,8 atrasado. O diagrama resultante de potência versus frequência do sistema está mostrada na figura abaixo. (b) Agora, suponha que uma carga adicional de 1 MW seja adicionada a esse sistema de potência. Qual será a nova frequência do sistema e quanta potência G1 e G2 fornecerão?

$$P_{\text{carga}} = 1,0(61,5 - f_{\text{sis}}) + 1,0(61,0 - f_{\text{sis}})$$

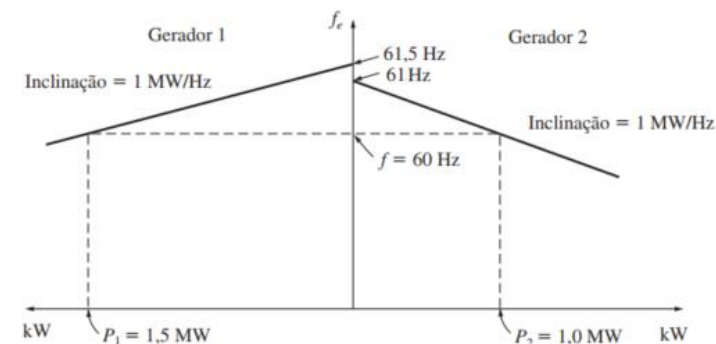
$$3,5 = 61,5 - f_{\text{sis}} + 61,0 - f_{\text{sis}}$$

$$2f_{\text{sis}} = 61,5 + 61,0 - 3,5$$

$$f_{\text{sis}} = 59,5 \text{ Hz}$$

$$P_1 = 1,0(61,5 - 59,5) = 2,0 \text{ MW}$$

$$P_2 = 1,0(61 - 59,5) = 1,5 \text{ MW}$$



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Exemplo 8

A figura mostra dois geradores alimentando uma carga. G1 tem uma frequência a vazio de 61,5 Hz e uma inclinação s_{p1} de 1 MW/Hz. O G2 tem uma frequência a vazio de 61 Hz e uma inclinação s_{p2} de 1 MW/Hz. Os dois geradores estão abastecendo uma carga real totalizando 2,5 MW, com FP 0,8 atrasado. O diagrama resultante de potência versus frequência do sistema está mostrada na figura abaixo. (c) Com o sistema na configuração descrita em b, quais serão a frequência do sistema e as potências dos geradores se o ponto de ajuste no regulador de G2 for incrementado em 0,5 Hz?

Exemplo 8

A figura mostra dois geradores alimentando uma carga. G1 tem uma frequência a vazio de 61,5 Hz e uma inclinação s_{p1} de 1 MW/Hz. O G2 tem uma frequência a vazio de 61 Hz e uma inclinação s_{p2} de 1 MW/Hz. Os dois geradores estão abastecendo uma carga real totalizando 2,5 MW, com FP 0,8 atrasado. O diagrama resultante de potência versus frequência do sistema está mostrada na figura abaixo. (c) Com o sistema na configuração descrita em b, quais serão a frequência do sistema e as potências dos geradores se o ponto de ajuste no regulador de G2 for incrementado em 0,5 Hz?

$$P_{\text{carga}} = 1,0(61,5 - f_{\text{sis}}) + 1,0(61,5 - f_{\text{sis}})$$

$$3,5 = 61,5 - f_{\text{sis}} + 61,5 - f_{\text{sis}}$$

$$2f_{\text{sis}} = 61,5 + 61,5 - 3,5$$

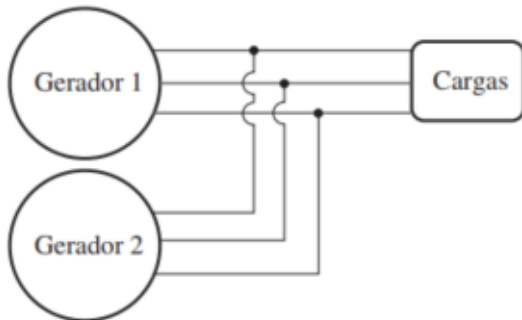
$$f_{\text{sis}} = 59,75 \text{ Hz}$$

$$P_1 = 1,0(61,5 - 59,75) = 1,75 \text{ MW}$$

$$P_2 = P_1 = 1,0(61,5 - 59,75) = 1,75 \text{ MW}$$

Tópicos da Operação em Paralelo

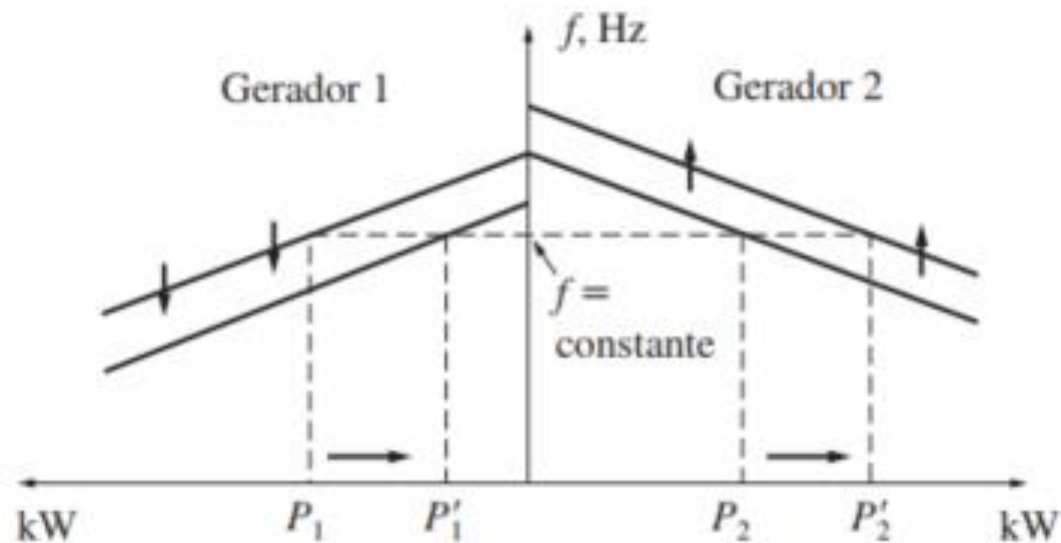
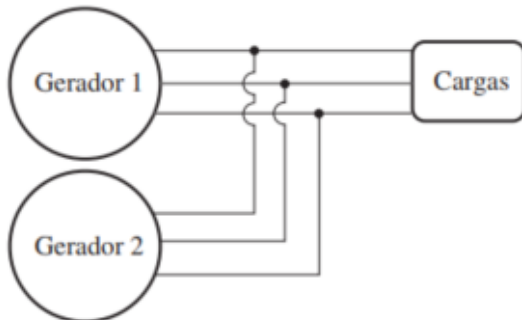
- Como ajustar para potência mais equânimes entre os geradores
 - Sem alterar frequência do sistema



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Tópicos da Operação em Paralelo

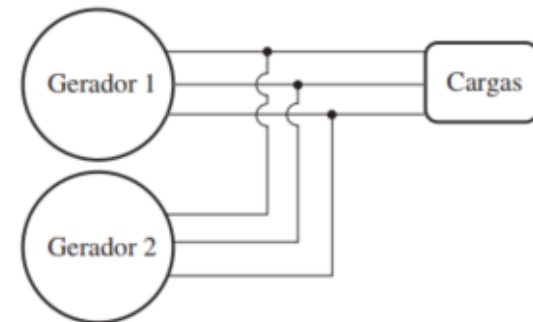
- Como ajustar para potência mais equânimes entre os geradores
 - Sem alterar frequência do sistema – incremento/decremento em G1 e decremento/incremento em G2, no ajuste do regulador



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Tópicos da Operação em Paralelo

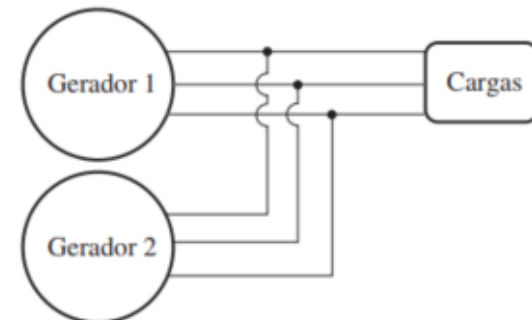
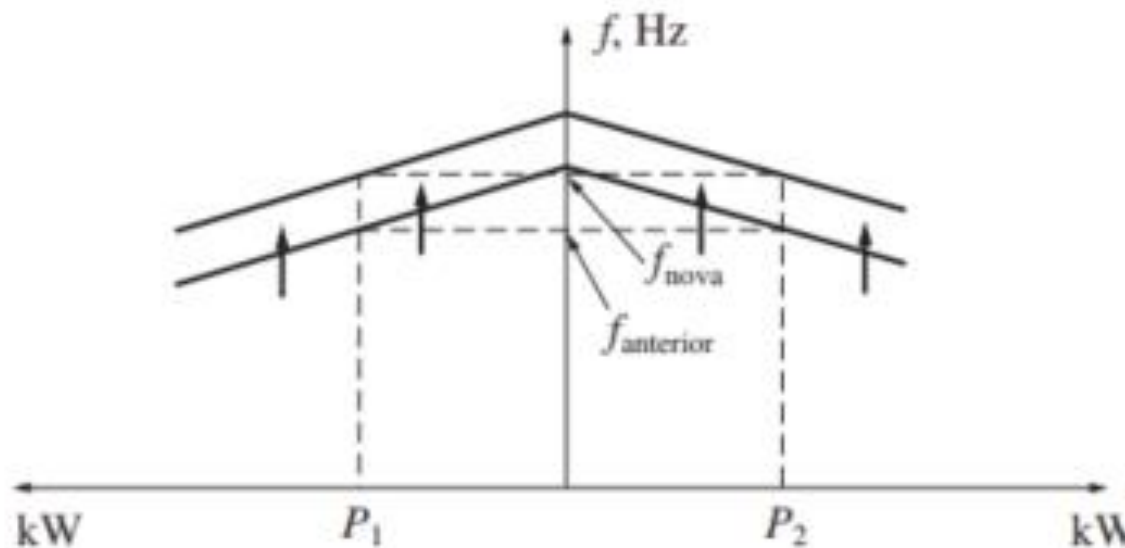
- Como ajustar para potência mais equânimes entre os geradores
 - Alterar frequência do sistema sem compartilhamento de potência



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Tópicos da Operação em Paralelo

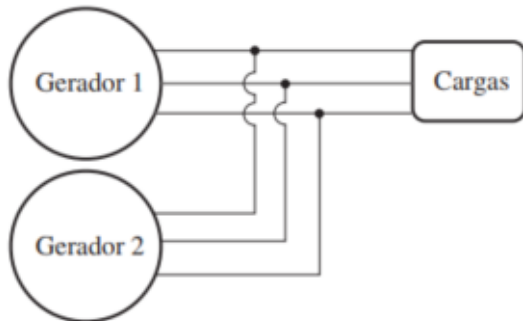
- Como ajustar para potência mais equânimes entre os geradores
 - Alterar frequência do sistema sem compartilhamento de potência – incremento ou decremento igual em G1 e G2.



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Tópicos da Operação em Paralelo

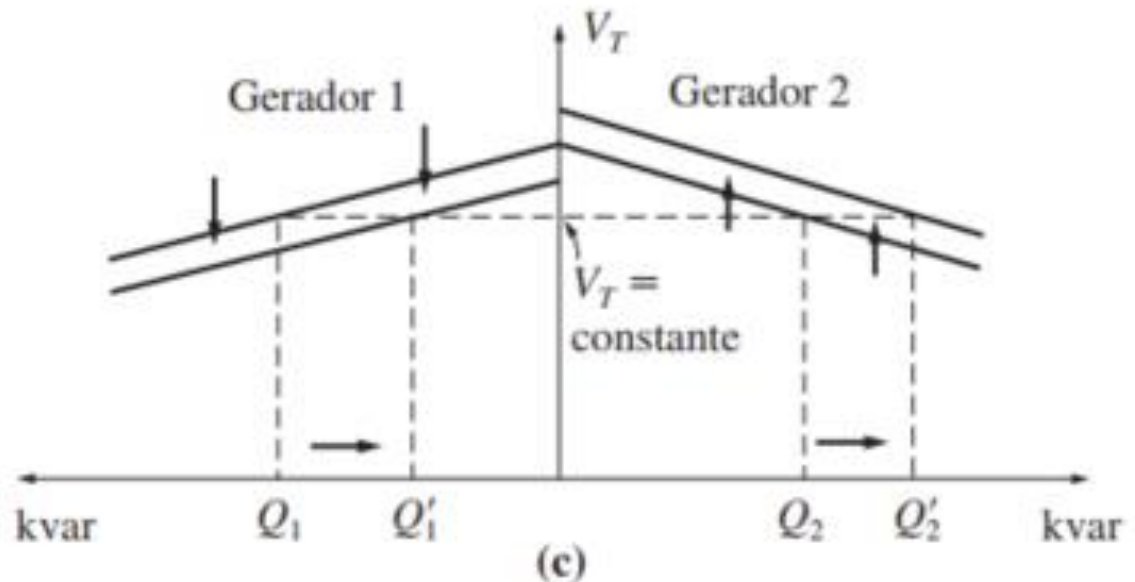
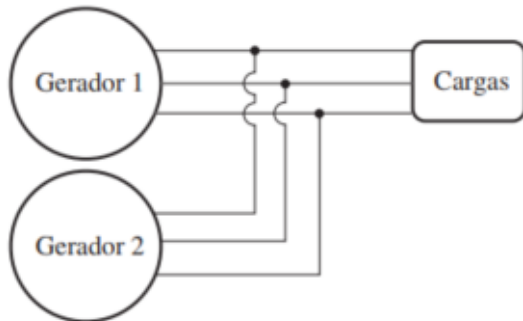
- Como ajustar para potência mais equânimes entre os geradores
 - Alterar compartilhamento de potência reativa sem alterar tensão terminal



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Tópicos da Operação em Paralelo

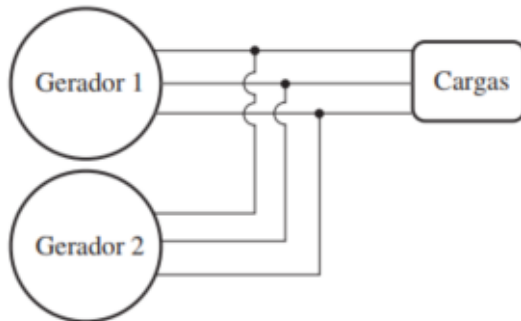
- Como ajustar para potência mais equânimes entre os geradores
 - Alterar compartilhamento de potência reativa sem alterar tensão terminal – incremento/decremento em G1 e decremento/incremento em G2, no ajuste do regulador



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Tópicos da Operação em Paralelo

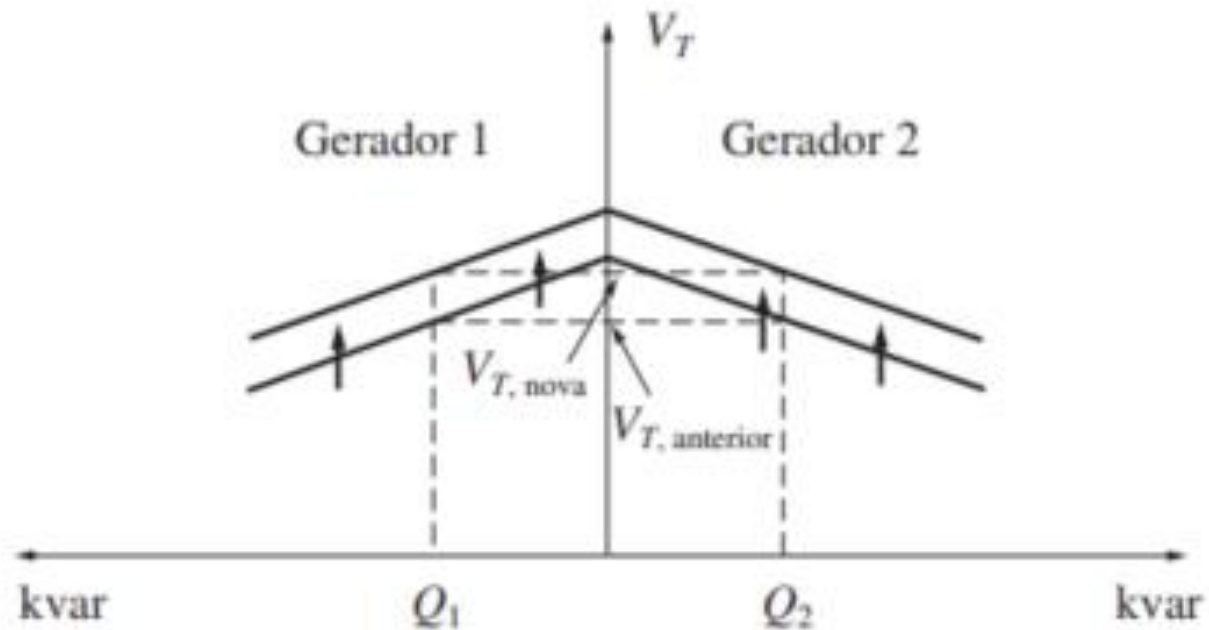
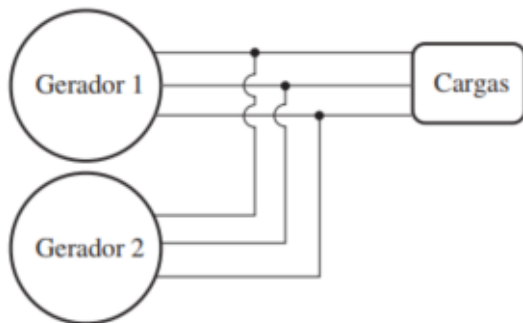
- Como ajustar para potência mais equânimes entre os geradores
 - Alterar tensão terminal sem compartilhamento de potência reativa



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Tópicos da Operação em Paralelo

- Como ajustar para potência mais equânimes entre os geradores
 - Alterar tensão terminal sem compartilhamento de potência reativa – incremento ou decremento igual em G1 e G2.



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Tópicos da Operação em Paralelo

- Resumo, operação em paralelo entre dois geradores:
 - Nem a frequência, nem a tensão terminal estão condicionados a serem constantes

Tópicos da Operação em Paralelo

- Resumo, operação em paralelo entre dois geradores:
 - Nem a frequência, nem a tensão terminal estão condicionados a serem constantes
 - Ajuste de compartilhamento de potência ativa se dá pelo incremento e decremento do ponto de ajuste do regulador de cada gerador.

Tópicos da Operação em Paralelo

- Resumo, operação em paralelo entre dois geradores:
 - Nem a frequência, nem a tensão terminal estão condicionados a serem constantes
 - Ajuste de compartilhamento de potência ativa se dá pelo incremento e decremento do ponto de ajuste do regulador de cada gerador.
 - Frequência do sistema pode ser ajustada sem alterar o compartilhamento de potência ativa, incrementando ou decrementando o ponto de ajuste dos reguladores dos geradores de forma idêntica.

Tópicos da Operação em Paralelo

- Resumo, operação em paralelo entre dois geradores:
 - Nem a frequência, nem a tensão terminal estão condicionados a serem constantes
 - Ajuste de compartilhamento de potência reativa se dá pelo aumento e redução da corrente de campo de cada gerador.

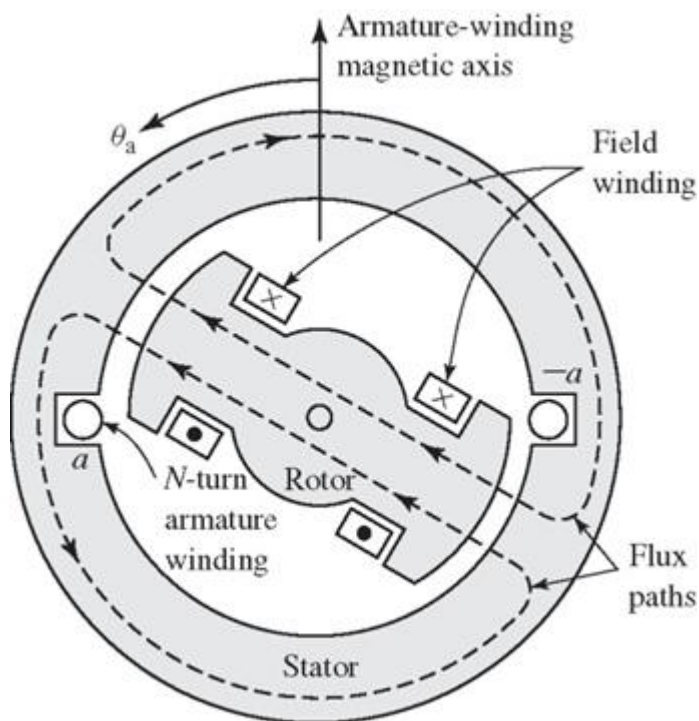
Tópicos da Operação em Paralelo

- Resumo, operação em paralelo entre dois geradores:
 - Nem a frequência, nem a tensão terminal estão condicionados a serem constantes
 - Ajuste de compartilhamento de potência reativa se dá pelo aumento e redução da corrente de campo de cada gerador.
 - Frequência do sistema pode ser ajustada sem alterar o compartilhamento de potência reativa, aumentando e reduzindo a corrente de campo dos geradores de forma idêntica.

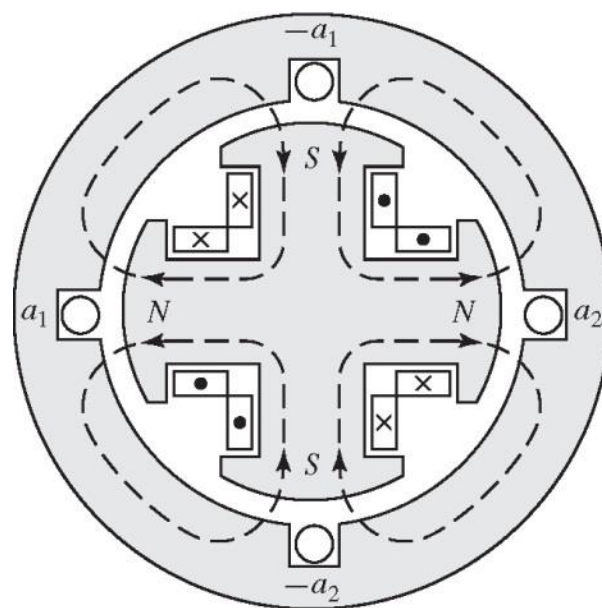
Gerador Síncrono Polos Salientes

■ Aspectos do Gerador Síncrono Polos Salientes

□ 2 polos:



4 polos:



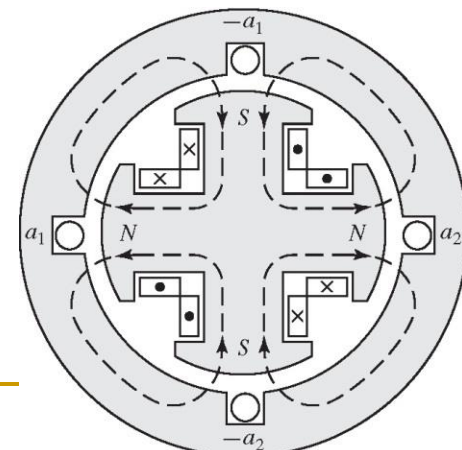
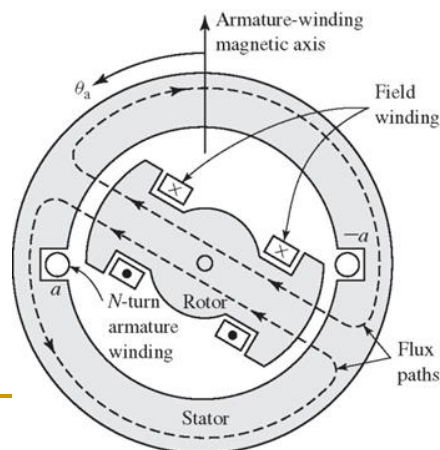
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Gerador Síncrono Polos Salientes

■ Aspectos da Máquina Síncrona Polos Salientes

Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

- Eixo polar ou eixo direto do rotor;
 - Alinhado a passagem de fluxo, menor relutância e maior processo de magnetização;

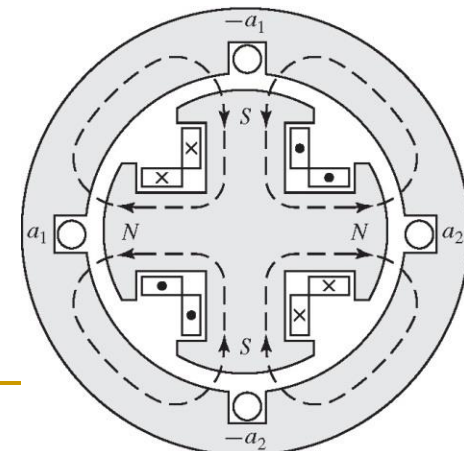
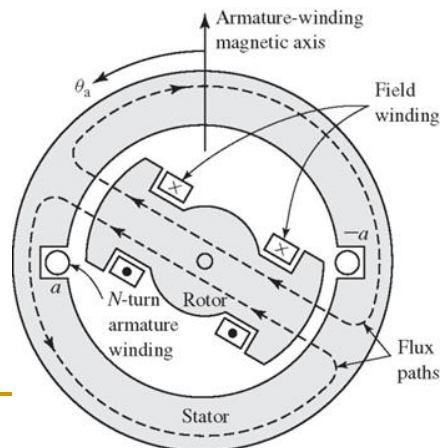


Gerador Síncrono Polos Salientes

■ Aspectos da Máquina Síncrona Polos Salientes

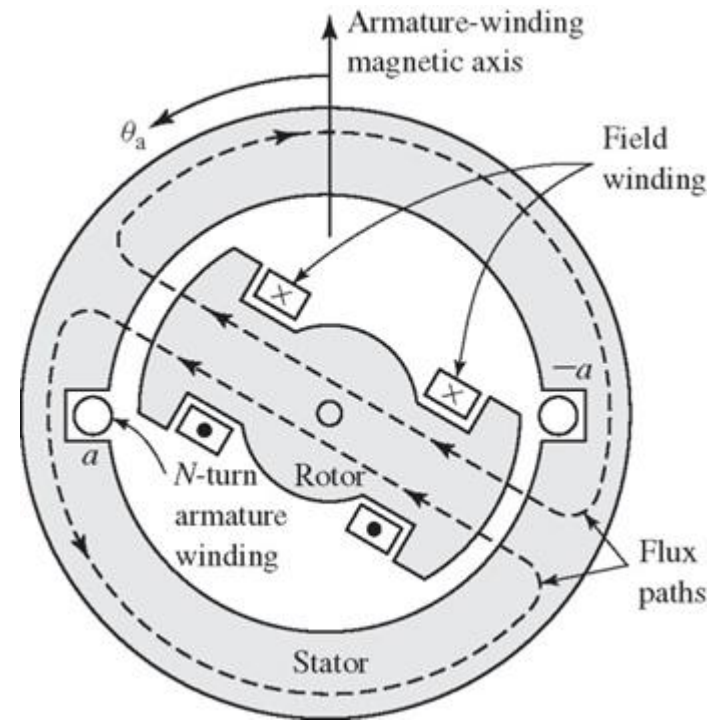
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

- Eixo polar ou eixo direto do rotor;
 - Alinhado a passagem de fluxo, menor relutância e maior processo de magnetização;
- Eixo interpolar ou eixo em quadratura;
 - Eixo entre polos, dificuldade de passagem do fluxo, maior relutância e menor magnetização;



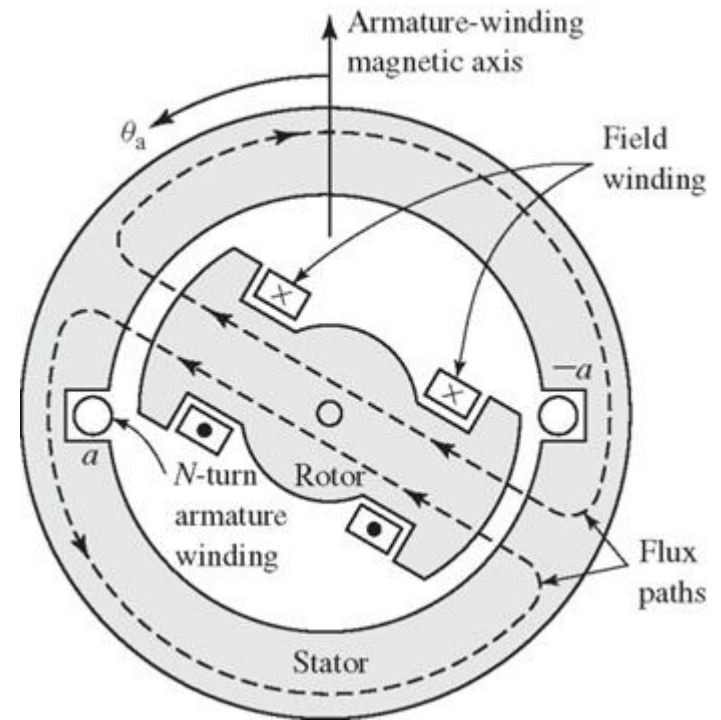
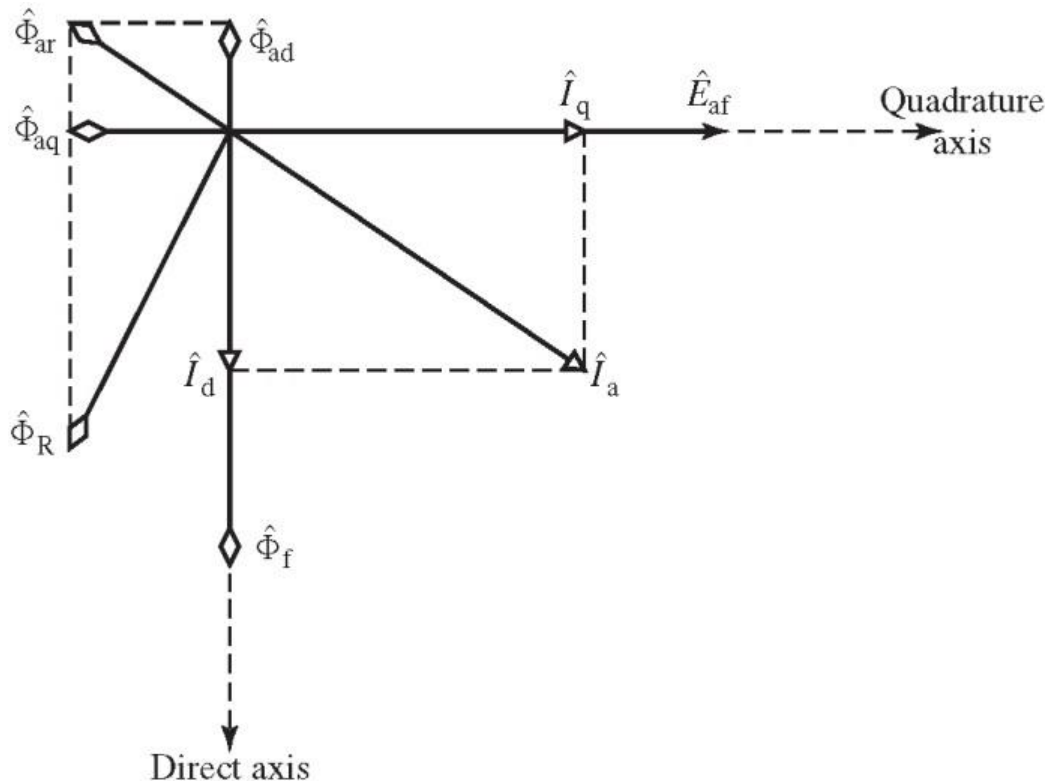
Gerador Síncrono Polos Salientes

- Aspectos da MS Polos Salientes
 - Eixo polar ou eixo direto do rotor;
 - Eixo interpolar ou eixo em quadratura;



Gerador Síncrono Polos Salientes

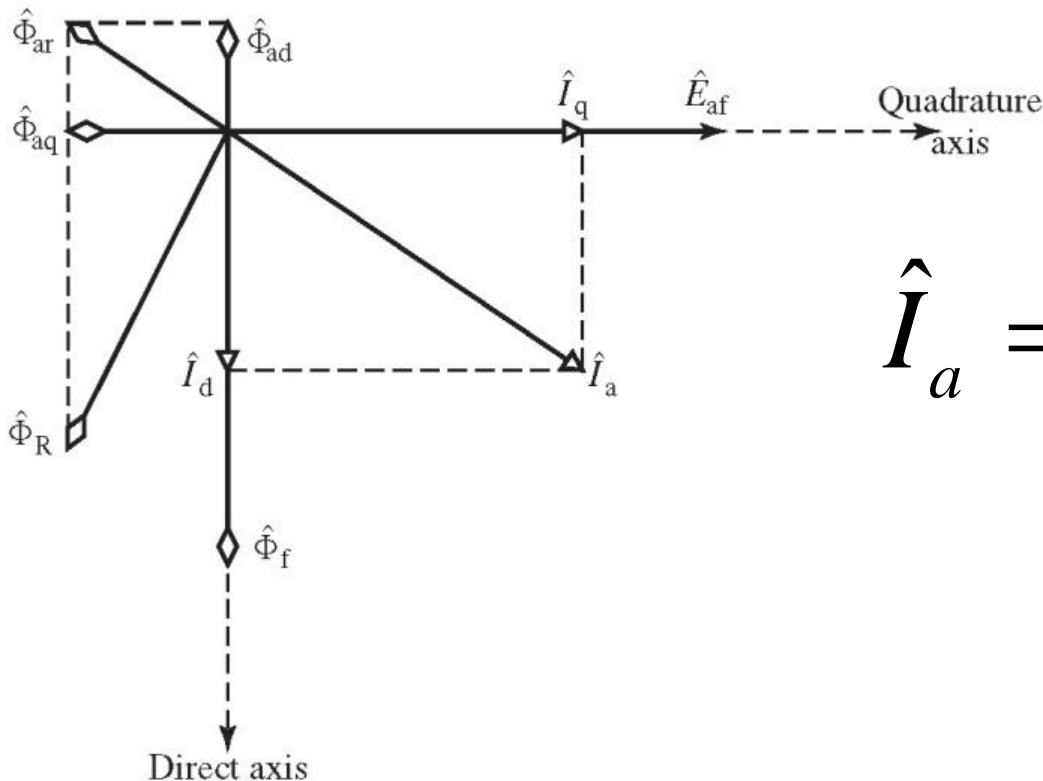
- Aspectos da MS Polos Salientes
 - Eixo polar ou eixo direto do rotor;
 - Eixo interpolar ou eixo em quadratura;



Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Gerador Síncrono Polos Salientes

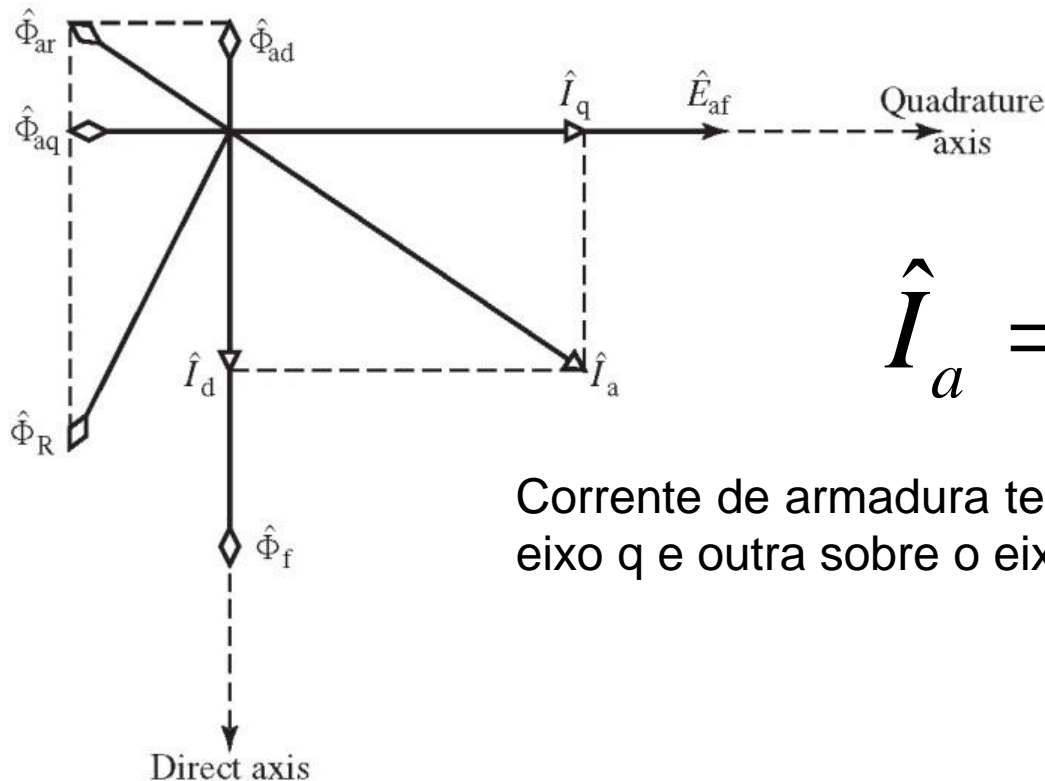
- Aspectos da MS Polos Salientes
 - Eixo polar ou eixo direto do rotor;
 - Eixo interpolar ou eixo em quadratura;



$$\hat{I}_a = \hat{I}_d + \hat{I}_q$$

Gerador Síncrono Polos Salientes

- Aspectos da MS Polos Salientes
 - Eixo polar ou eixo direto do rotor;
 - Eixo interpolar ou eixo em quadratura;

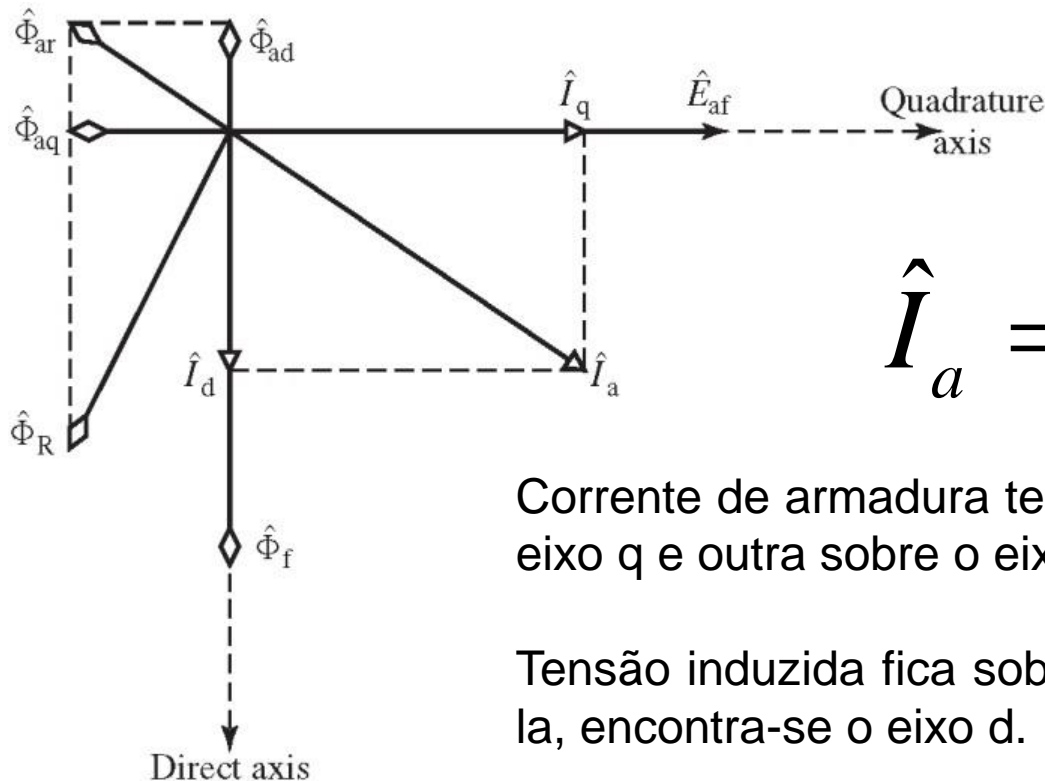


$$\hat{I}_a = \hat{I}_d + \hat{I}_q$$

Corrente de armadura tem duas componentes, uma sobre o eixo q e outra sobre o eixo d;

Gerador Síncrono Polos Salientes

- Aspectos da MS Polos Salientes
 - Eixo polar ou eixo direto do rotor;
 - Eixo interpolar ou eixo em quadratura;



$$\hat{I}_a = \hat{I}_d + \hat{I}_q$$

Corrente de armadura tem duas componentes, uma sobre o eixo q e outra sobre o eixo d;

Tensão induzida fica sobre eixo em quadratura: ao localizá-la, encontra-se o eixo d.

Gerador Síncrono Polos Salientes

- Diagramas fasoriais
 - Reatâncias:
 - Síncrona do eixo direto (X_d)

Gerador Síncrono Polos Salientes

■ Diagramas fasoriais

□ Reatâncias:

- Síncrona do eixo direto (X_d)
- Síncrona do eixo quadratura (X_q)

Gerador Síncrono Polos Salientes

■ Diagramas fasoriais

□ Reatâncias:

- Síncrona do eixo direto (X_d)
- Síncrona do eixo quadratura (X_q)
- Magnetização do eixo direto ($X_{\varphi d}$)

Gerador Síncrono Polos Salientes

■ Diagramas fasoriais

□ Reatâncias:

- Síncrona do eixo direto (X_d)
- Síncrona do eixo quadratura (X_q)
- Magnetização do eixo direto ($X_{\phi d}$)
- Magnetização do eixo quadratura ($X_{\phi q}$)
 - Similar a X_{ϕ} da máquina com rotor cilíndrico.

Gerador Síncrono Polos Salientes

■ Diagramas fasoriais

□ Reatâncias:

- Síncrona do eixo direto (X_d)
- Síncrona do eixo quadratura (X_q)
- Magnetização do eixo direto ($X_{\phi d}$)
- Magnetização do eixo quadratura ($X_{\phi q}$)
 - Similar a X_{ϕ} da máquina com rotor cilíndrico.

$$X_d = X_{\phi d} + X_{al}$$

$$X_q = X_{\phi q} + X_{al}$$

□ Quedas de tensão sobre cada reatância síncrona:

Gerador Síncrono Polos Salientes

■ Diagramas fasoriais

- Quedas de tensão sobre cada reatância síncrona:

$$jX_d \hat{I}_d \quad jX_q \hat{I}_q$$

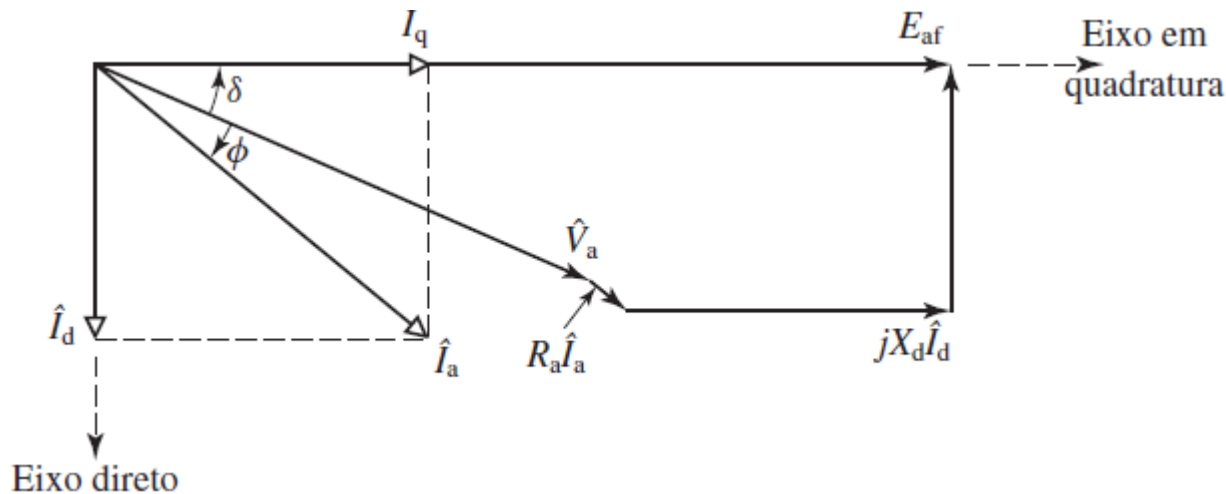
Gerador Síncrono Polos Salientes

■ Diagramas fasoriais

- Quedas de tensão sobre cada reatância síncrona:

$$jX_d \hat{I}_d \quad jX_q \hat{I}_q$$

- Diagrama fasorial para resolução:



Gerador Síncrono Polos Salientes

■ Diagramas fasoriais

□ Diagrama fasorial para resolução:

- Ângulo de V_a é 0° ;
- δ é positivo
- ϕ é negativo

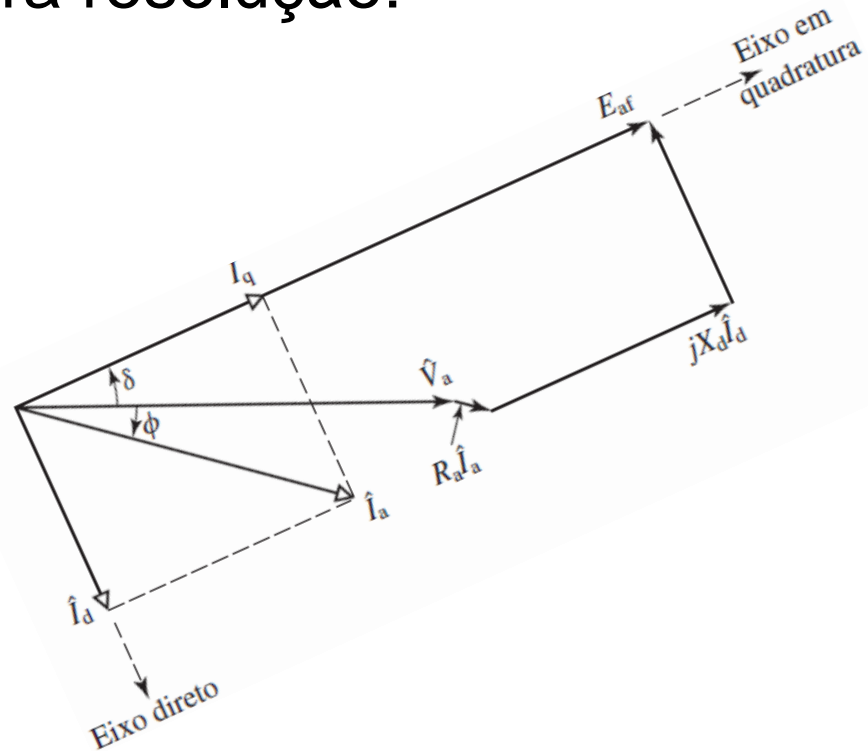
Gerador Síncrono Polos Salientes

■ Diagramas fasoriais

□ Diagrama fasorial para resolução:

- Ângulo de \mathbf{V}_a é 0° ;
- δ é positivo
- ϕ é negativo

X_d e X_q são valores em condições saturadas.



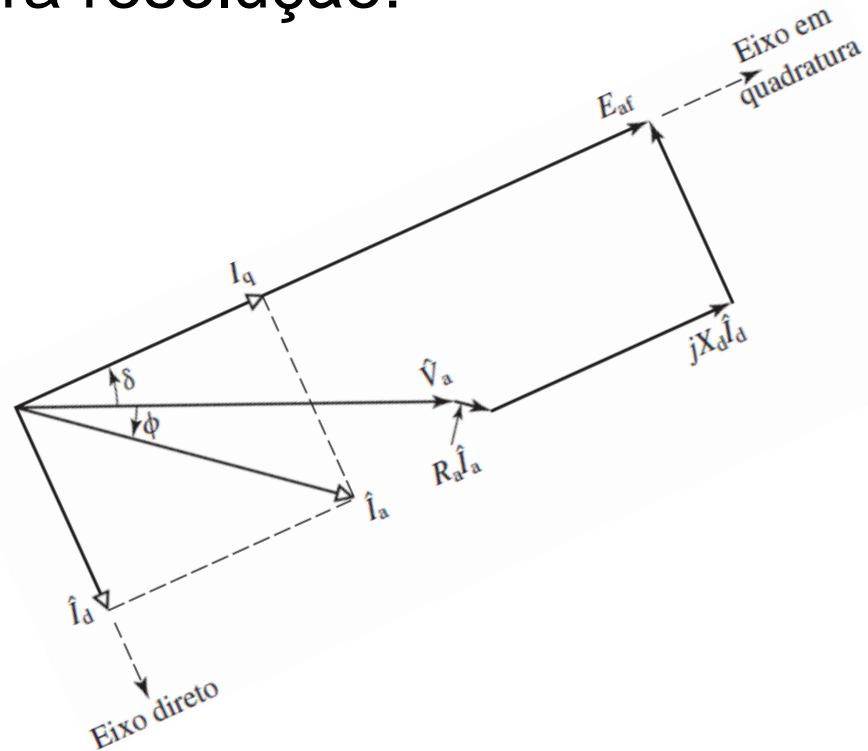
Gerador Síncrono Polos Salientes

■ Diagramas fasoriais

□ Diagrama fasorial para resolução:

- Ângulo de \mathbf{V}_a é 0° ;
- δ é positivo
- ϕ é negativo

X_d e X_q são valores em condições saturadas.



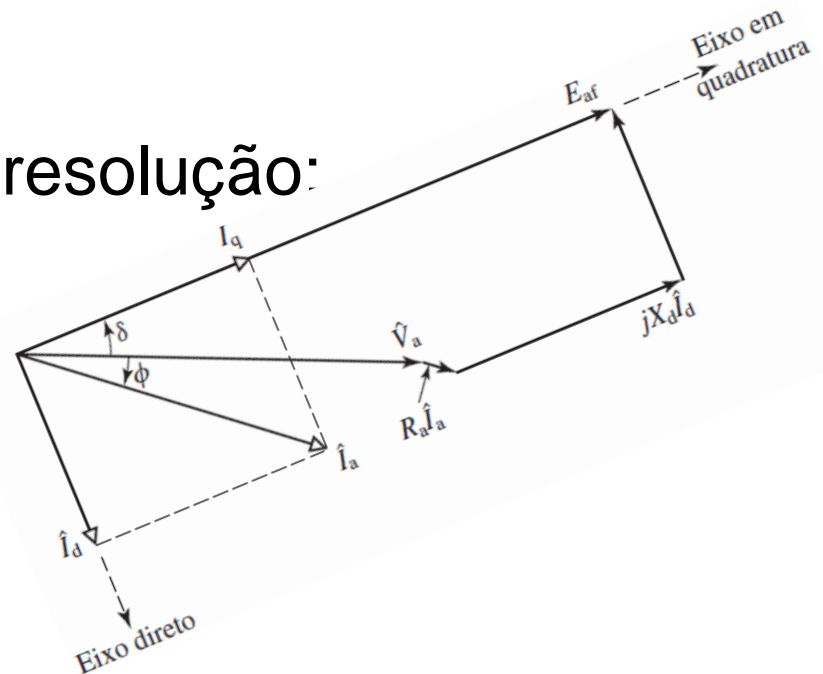
$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_a + R_a \hat{I}_a + jX_d \hat{I}_d + jX_q \hat{I}_q$$

Gerador Síncrono Polos Salientes

■ Diagramas fasoriais

□ Diagrama fasorial para resolução:

- Ângulo de \mathbf{V}_a é 0° ;
- δ é positivo
- ϕ é negativo



É necessário achar o eixo q.

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_a + R_a \hat{I}_a + jX_d \hat{I}_d + jX_q \hat{I}_q$$

Gerador Síncrono Polos Salientes

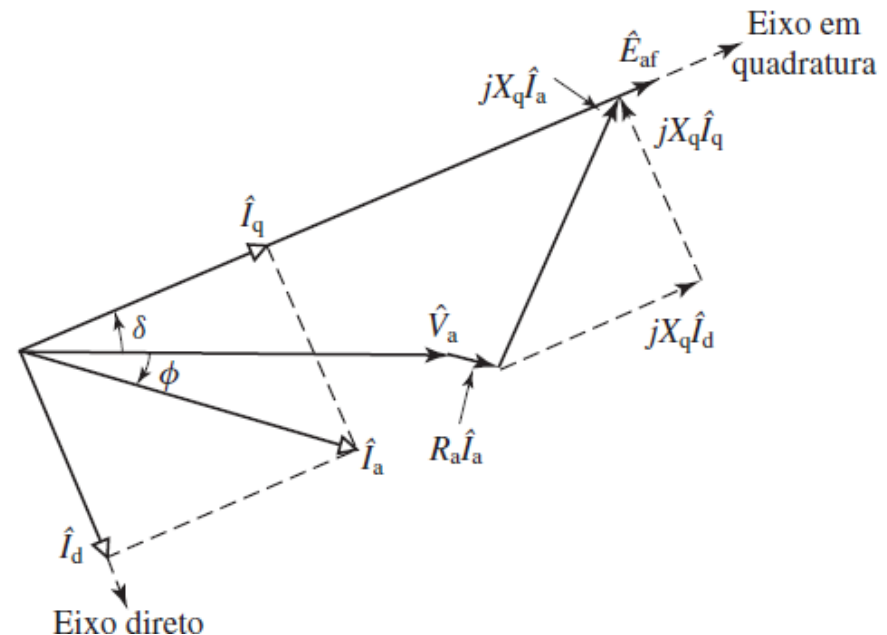
■ Diagramas fasoriais

□ Diagrama fasorial para resolução:

- Ângulo de \mathbf{V}_a é 0° ;
- δ é positivo
- ϕ é negativo

Técnica para achar o eixo q:

$$jX_q \hat{I}_d + jX_q \hat{I}_q = jX_q \hat{I}_a$$



Gerador Síncrono Polos Salientes

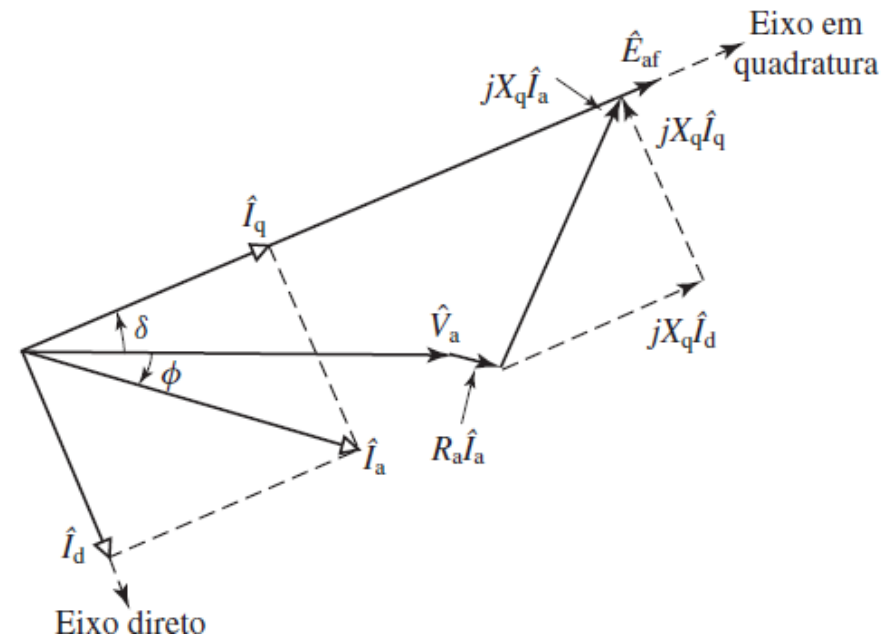
■ Diagramas fasoriais

□ Diagrama fasorial para resolução:

- Ângulo de \mathbf{V}_a é 0° ;
- δ é positivo
- ϕ é negativo

Técnica para achar o eixo q:

$$jX_q \hat{I}_d + jX_q \hat{I}_q = jX_q \hat{I}_a$$



$$? \underline{\delta} = \hat{V}_a + R_a \hat{I}_a + jX_q \hat{I}_a \neq \hat{E}_{af}$$

Exercício 9

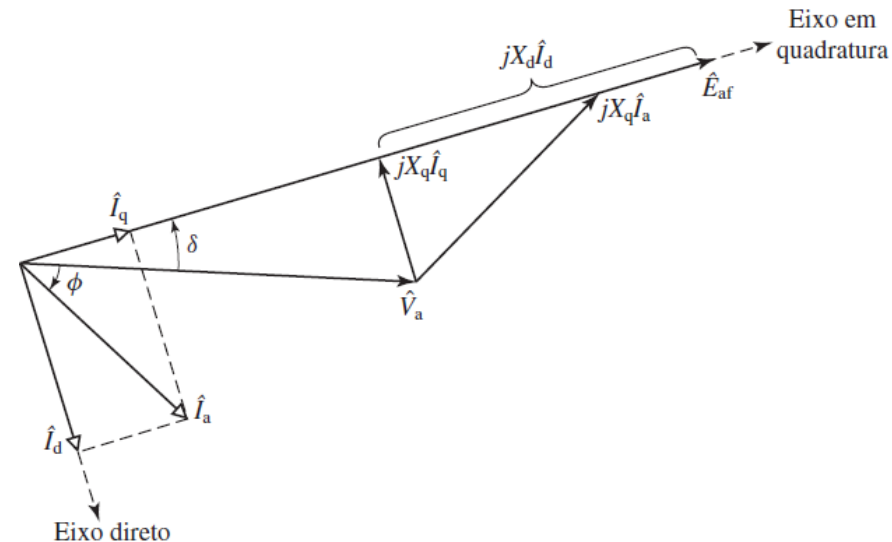
Reatâncias X_d e X_q de um gerador síncrono de polos salientes são 1,00 e 0,60 p.u., respectivamente. A resistência de armadura é desprezada. Qual a tensão gerada quando o gerador fornece a potência nominal com FP atrasado 0,8 e tensão nominal nos terminais?

Exercício 9

Reatâncias X_d e X_q de um gerador síncrono de polos salientes são 1,00 e 0,60 p.u., respectivamente. A resistência de armadura é desprezada. Qual a tensão gerada quando o gerador fornece a potência nominal com FP atrasado 0,8 e tensão nominal nos terminais?

Utilizar a tensão terminal como referência.

$$\hat{V}_a = 1,0 \angle 0^\circ$$



Exercício 9

Reatâncias X_d e X_q de um gerador síncrono de polos salientes são 1,00 e 0,60 p.u., respectivamente. A resistência de armadura é desprezada. Qual a tensão gerada quando o gerador fornece a potência nominal com FP atrasado 0,8 e tensão nominal nos terminais?

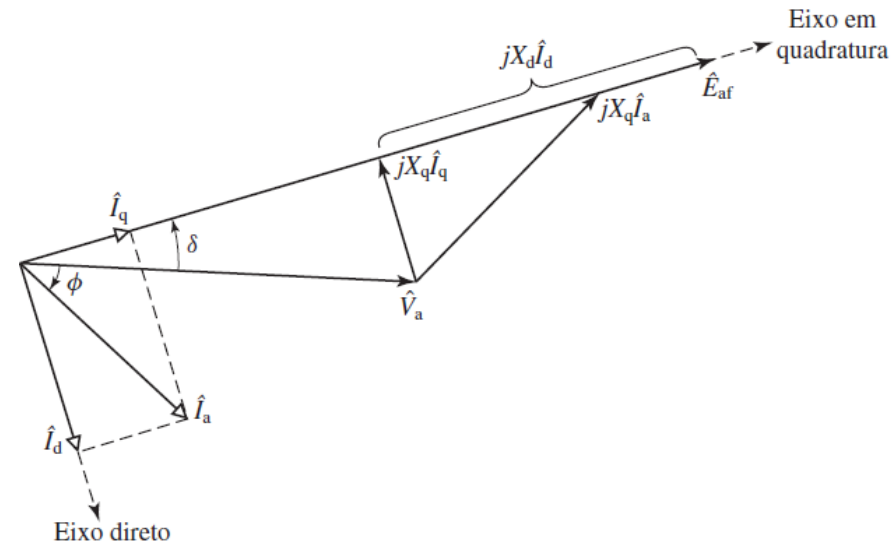
Utilizar a tensão terminal como referência.

$$\hat{V}_a = 1,0 \angle 0^\circ$$

$$I_a = \frac{S}{V} = \frac{1,0}{1,0} = 1,0$$

$$\phi = -\arccos(0,8) = -36,9^\circ$$

$$\hat{I}_a = 1,0 \angle -36,9^\circ$$



Exercício 9

Reatâncias X_d e X_q de um gerador síncrono de polos salientes são 1,00 e 0,60 p.u., respectivamente. A resistência de armadura é desprezada. Qual a tensão gerada quando o gerador fornece a potência nominal com FP atrasado 0,8 e tensão nominal nos terminais?

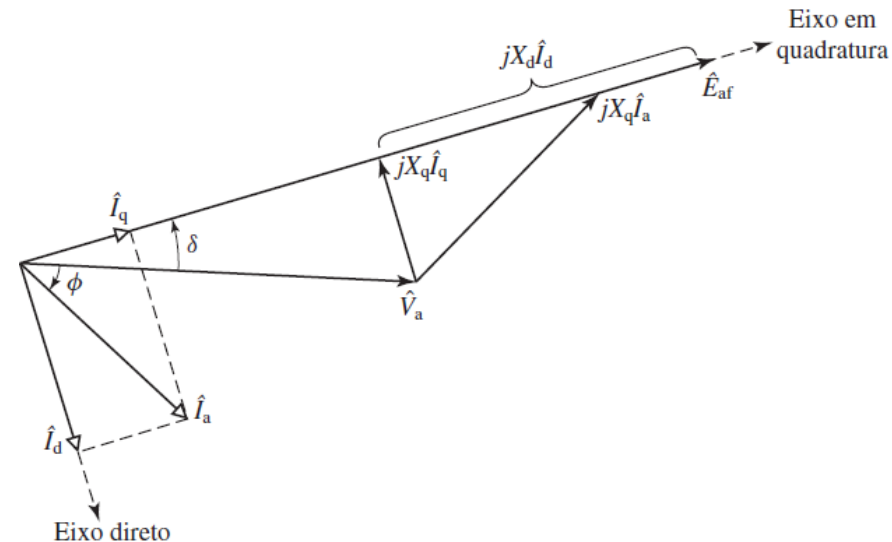
Utilizar a tensão terminal como referência.

$$\hat{V}_a = 1,0 \angle 0^\circ$$

$$I_a = \frac{S}{V} = \frac{1,0}{1,0} = 1,0$$

$$\phi = -\arccos(0,8) = -36,9^\circ$$

$$\hat{I}_a = 1,0 \angle -36,9^\circ$$



$$? \angle \delta = \hat{V}_a + jX_q \hat{I}_a$$

$$? \angle \delta = 1,0 + j0,6 \cdot 1,0 \angle -36,9^\circ$$

Exercício 9

Reatâncias X_d e X_q de um gerador síncrono de polos salientes são 1,00 e 0,60 p.u., respectivamente. A resistência de armadura é desprezada. Qual a tensão gerada quando o gerador fornece a potência nominal com FP atrasado 0,8 e tensão nominal nos terminais?

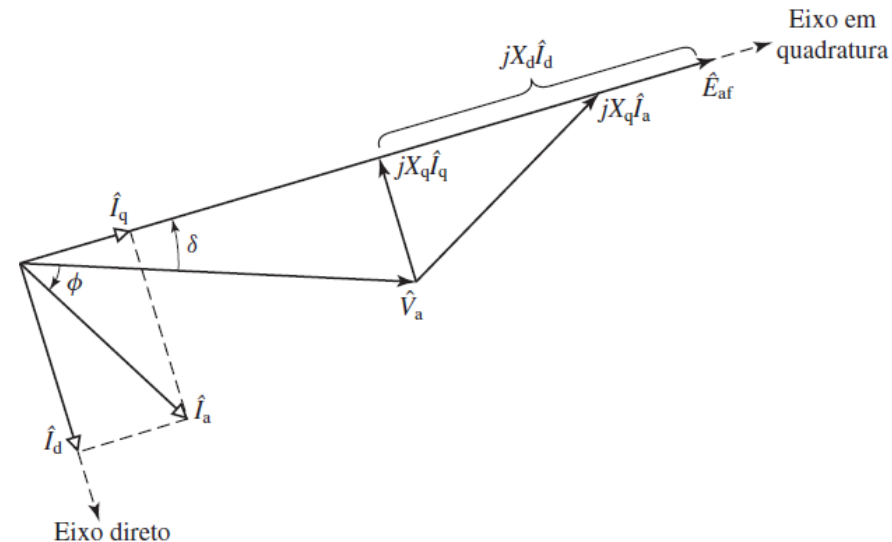
Utilizar a tensão terminal como referência.

$$\hat{V}_a = 1,0 \angle 0^\circ$$

$$I_a = \frac{S}{V} = \frac{1,0}{1,0} = 1,0$$

$$\phi = -\arccos(0,8) = -36,9^\circ$$

$$\hat{I}_a = 1,0 \angle -36,9^\circ$$



$$? \angle \delta = 1,44 \angle 19,4^\circ$$

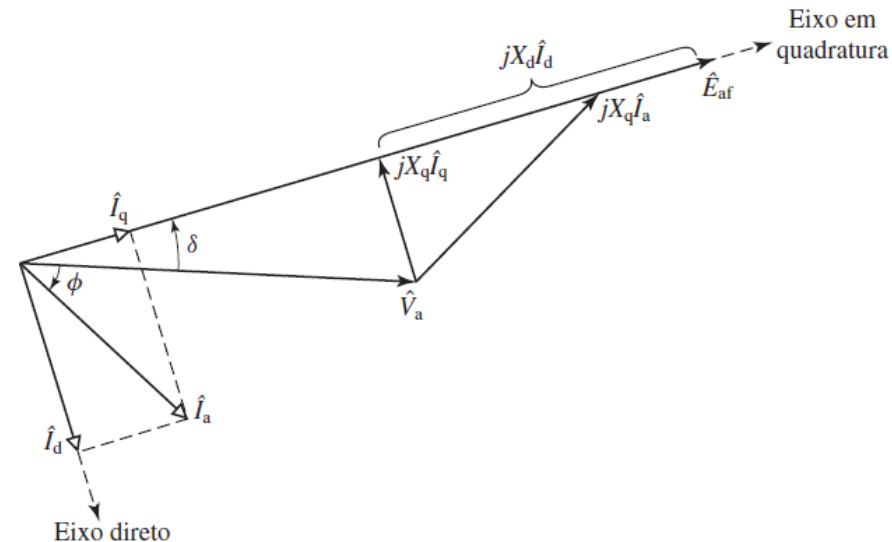
Exercício 9

Reatâncias X_d e X_q de um gerador síncrono de polos salientes são 1,00 e 0,60 p.u., respectivamente. A resistência de armadura é desprezada. Qual a tensão gerada quando o gerador fornece a potência nominal com FP atrasado 0,8 e tensão nominal nos terminais?

Utilizar a tensão terminal como referência.

$$E_{af} \angle I_a = \delta - \phi = 19,4 - (-36,9)$$

$$E_{af} \angle I_a = 56,3^\circ$$



$$\delta = 19,4^\circ$$

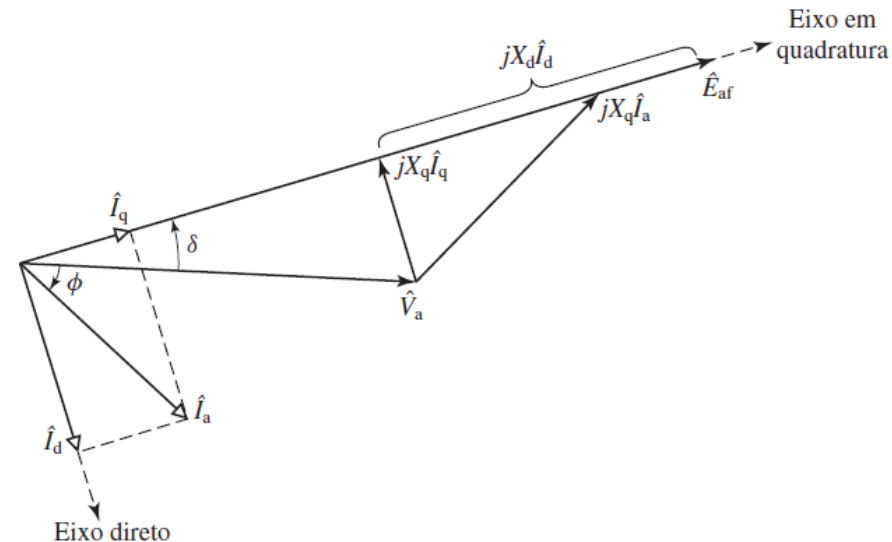
Exercício 9

Reatâncias X_d e X_q de um gerador síncrono de polos salientes são 1,00 e 0,60 p.u., respectivamente. A resistência de armadura é desprezada. Qual a tensão gerada quando o gerador fornece a potência nominal com FP atrasado 0,8 e tensão nominal nos terminais?

Utilizar a tensão terminal como referência.

$$E_{af} \angle I_a = \delta - \phi = 19,4 - (-36,9)$$

$$E_{af} \angle I_a = 56,3^\circ$$



$$I_d = I_a \cdot \sin(\delta - \phi) = 1,0 \cdot \sin(56,3^\circ) = 0,832$$

$$I_q = I_a \cdot \cos(\delta - \phi) = 1,0 \cdot \cos(56,3^\circ) = 0,555$$

$$\delta = 19,4^\circ$$

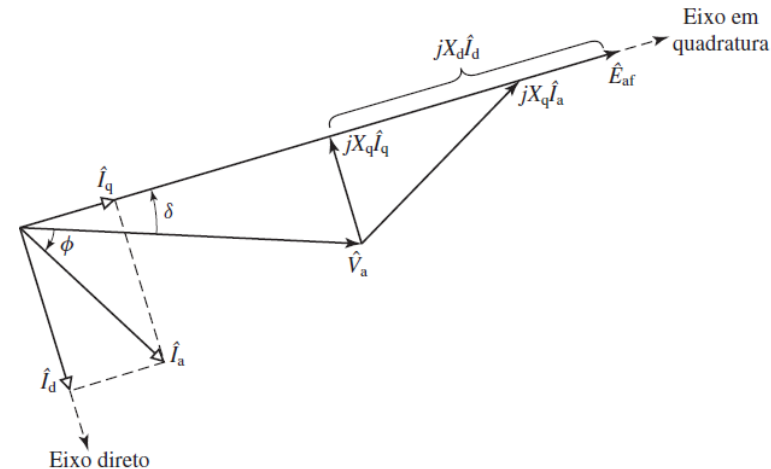
Exercício 9

Reatâncias X_d e X_q de um gerador síncrono de polos salientes são 1,00 e 0,60 p.u., respectivamente. A resistência de armadura é desprezada. Qual a tensão gerada quando o gerador fornece a potência nominal com FP atrasado 0,8 e tensão nominal nos terminais?

Utilizar a tensão terminal como referência.

$$\hat{I}_q = 0,555 \underline{19,4^\circ}$$

$$\hat{I}_d = 0,832 \underline{19,4 - 90} = 0,832 \underline{-70,6^\circ}$$



Exercício 9

Reatâncias X_d e X_q de um gerador síncrono de polos salientes são 1,00 e 0,60 p.u., respectivamente. A resistência de armadura é desprezada. Qual a tensão gerada quando o gerador fornece a potência nominal com FP atrasado 0,8 e tensão nominal nos terminais?

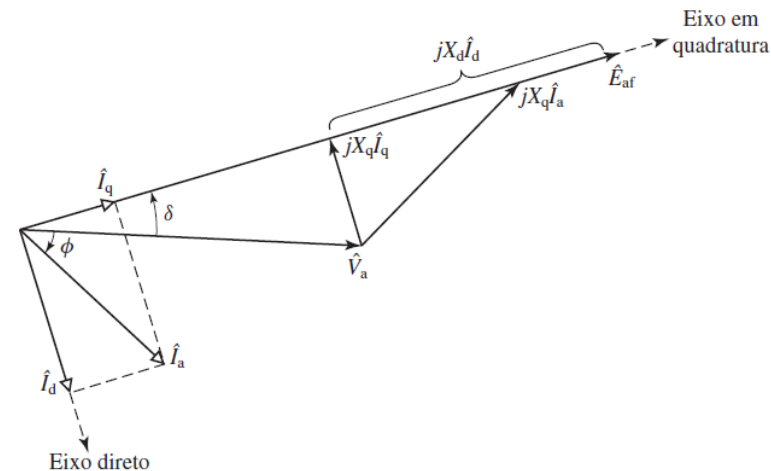
Utilizar a tensão terminal como referência.

$$\hat{I}_q = 0,555 \underline{19,4^\circ}$$

$$\hat{I}_d = 0,832 \underline{19,4 - 90} = 0,832 \underline{-70,6^\circ}$$

$$\hat{E}_{af} = 1,0 + j1,0 \cdot 0,832 \underline{-70,6^\circ} + j0,6 \cdot 0,555 \underline{19,4^\circ}$$

$$\hat{E}_{af} = 1,78 \underline{19,4^\circ}$$



Exercício 10

Reatâncias X_d e X_q de um gerador síncrono de polos salientes são iguais a 1,00 p.u., respectivamente. A resistência de armadura é desprezada. Qual a tensão gerada quando o gerador fornece a potência nominal com FP atrasado 0,8 e tensão nominal nos terminais?

Exercício 10

Reatâncias X_d e X_q de um gerador síncrono de polos salientes são iguais a 1,00 p.u., respectivamente. A resistência de armadura é desprezada. Qual a tensão gerada quando o gerador fornece a potência nominal com FP atrasado 0,8 e tensão nominal nos terminais?

$$\hat{E}_{af} = 1,0 + j1,0 \cdot 1,0 \underline{-36,6^\circ}$$

A resposta é:

$$\hat{E}_{af} = 1,79 \underline{26,6^\circ}$$

O resultado é confiável? A simplificação é confiável?

Exercício 10

Reatâncias X_d e X_q de um gerador síncrono de polos salientes são iguais a 1,00 p.u., respectivamente. A resistência de armadura é desprezada. Qual a tensão gerada quando o gerador fornece a potência nominal com FP atrasado 0,8 e tensão nominal nos terminais?

$$\hat{E}_{af} = 1,0 + j1,0 \cdot 1,0 \angle -36,6^\circ$$

A resposta é:

$$\hat{E}_{af} = 1,79 \angle 26,6^\circ \neq \hat{E}_{af} = 1,78 \angle 19,4^\circ$$

Ângulo de potência maior que o real.

Exercício 11

Reatâncias X_d e X_q de um gerador síncrono de polos salientes são 1,00 e 0,60 p.u., respectivamente. A resistência de armadura é desprezada. Qual a tensão gerada quando o gerador fornece a potência nominal com FP adiantado 0,95 e tensão nominal nos terminais?

Exercício 11

Reatâncias X_d e X_q de um gerador síncrono de polos salientes são 1,00 e 0,60 p.u., respectivamente. A resistência de armadura é desprezada. Qual a tensão gerada quando o gerador fornece a potência nominal com FP adiantado 0,95 e tensão nominal nos terminais?

Utilizar a tensão terminal como referência.

$$\hat{V}_a = 1,0 \angle 0^\circ$$

$$I_a = \frac{S}{V} = \frac{1,0}{1,0} = 1,0$$

$$\phi = \arccos(0,95) = 18,2^\circ$$

$$\hat{I}_a = 1,0 \angle 18,2^\circ$$

$$? \angle \delta = 1,0 + j0,6 \cdot 1,0 \angle 18,2^\circ$$

$$? \angle \delta = 0,9926 \angle 35,05^\circ$$

Exercício 11

Reatâncias X_d e X_q de um gerador síncrono de polos salientes são 1,00 e 0,60 p.u., respectivamente. A resistência de armadura é desprezada. Qual a tensão gerada quando o gerador fornece a potência nominal com FP adiantado 0,95 e tensão nominal nos terminais?

$$E_{af} \angle I_a = \delta - \phi = 35,05 - 18,2$$

$$E_{af} \angle I_a = 16,85^\circ$$

$$I_d = I_a \cdot \sin(\delta - \phi) = 1,0 \cdot \sin(16,85^\circ) = 0,29$$

$$I_q = I_a \cdot \cos(\delta - \phi) = 1,0 \cdot \cos(16,85^\circ) = 0,9571$$

$$\delta = 35,05^\circ$$

Exercício 11

Reatâncias X_d e X_q de um gerador síncrono de polos salientes são 1,00 e 0,60 p.u., respectivamente. A resistência de armadura é desprezada. Qual a tensão gerada quando o gerador fornece a potência nominal com FP adiantado 0,95 e tensão nominal nos terminais?

$$\hat{I}_q = 0,9571 \underline{35,05^\circ}$$

$$\hat{I}_d = 0,29 \underline{16,85 - 90} = 0,832 \underline{-73,15^\circ}$$

$$\hat{E}_{af} = 1,0 + j1,0 \cdot 0,29 \underline{-73,15^\circ} + j0,6 \cdot 0,9571 \underline{35,05^\circ}$$

$$\hat{E}_{af} = 1,098 \underline{35,05^\circ}$$

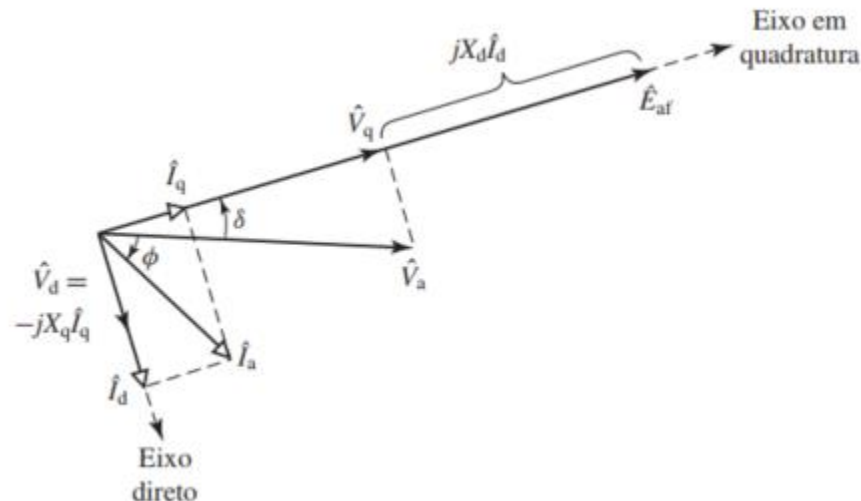
Avaliação K

Um ensaio a vazio em um gerador síncrono trifásico de 60 Hz, mostra que uma tensão nominal a vazio de 13,8 KV é produzida por uma corrente de campo de 318 A. Extrapolando a linha do entreferro a partir do conjunto de medidas feitas na máquina, pode-se mostrar que a corrente de campo correspondente a 13,8 KV sobre a linha de entreferro é 263 A. Supondo que esteja funcionando a uma velocidade correspondente a uma frequência elétrica de 50 Hz, calcule: (A) a tensão de linha dos terminais a vazio correspondente a uma corrente de campo de 318 A e (B) a corrente de campo correspondente àquela mesma tensão na linha de entreferro de 50 Hz.

Gerador Síncrono Polos Salientes

- Ângulo de carga
 - Vamos reavaliar a equação da tensão induzida

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_a + jX_d \hat{I}_d + jX_q \hat{I}_q$$



Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

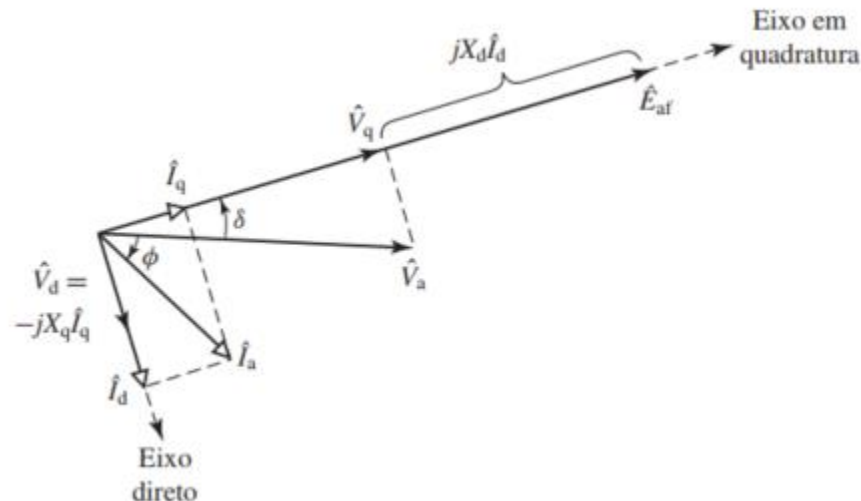
Conversão Eletromecânica de Energia II

Gerador Síncrono Polos Salientes

- Ângulo de carga
 - Vamos reavaliar a equação da tensão induzida

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_a + jX_d \hat{I}_d + jX_q \hat{I}_q$$

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_d + \hat{V}_q + jX_d \hat{I}_d + jX_q \hat{I}_q$$



Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

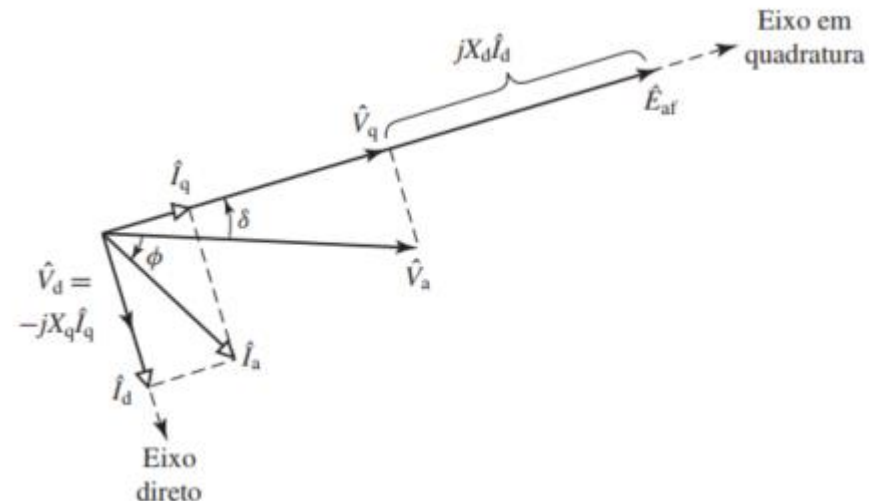
Conversão Eletromecânica de Energia II

Gerador Síncrono Polos Salientes

- Ângulo de carga
 - Vamos reavaliar a equação da tensão induzida

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_d + \hat{V}_q + jX_d \hat{I}_d + jX_q \hat{I}_q$$

$$0 = V_d - X_q I_q \rightarrow V_d = X_q I_q$$



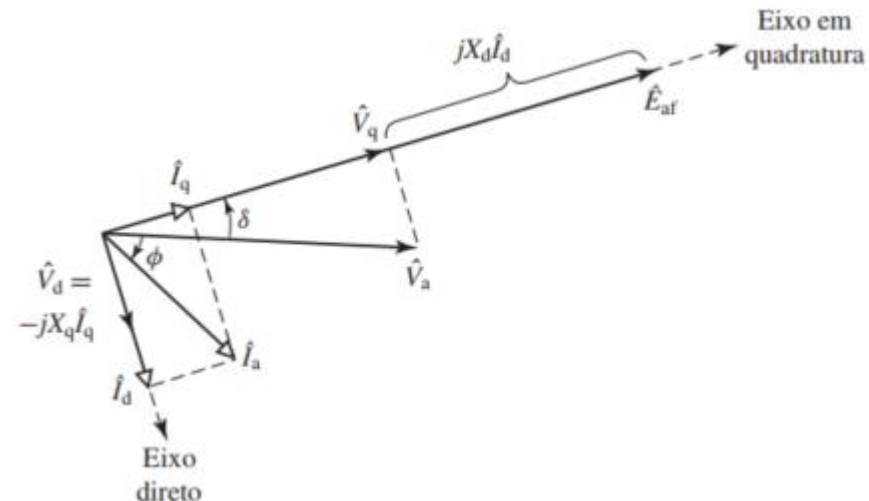
Gerador Síncrono Polos Salientes

- Ângulo de carga
 - Vamos reavaliar a equação da tensão induzida

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_d + \hat{V}_q + jX_d \hat{I}_d + jX_q \hat{I}_q$$

$$0 = V_d - X_q I_q \rightarrow V_d = X_q I_q$$

$$E_{af} = V_q + X_d I_d$$



Gerador Síncrono Polos Salientes

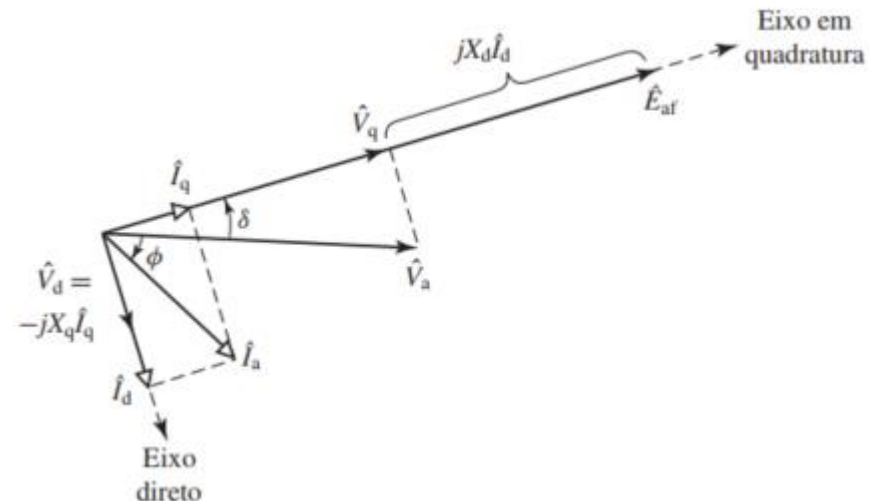
- Ângulo de carga
 - Vamos reavaliar a equação da tensão induzida

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_d + \hat{V}_q + jX_d \hat{I}_d + jX_q \hat{I}_q$$

$$0 = V_d - X_q I_q \rightarrow V_d = X_q I_q$$

$$E_{af} = V_q + X_d I_d$$

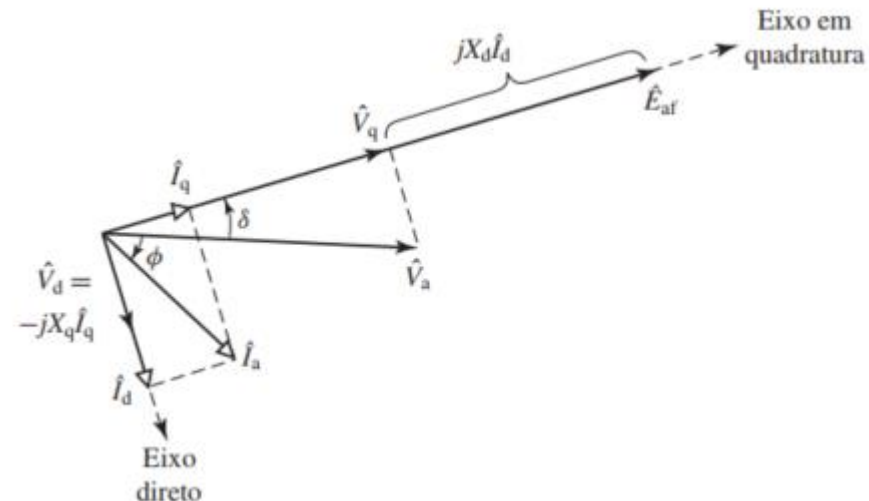
$$P = \text{Re} \left[\hat{V}_a \hat{I}_a^* \right]$$



Gerador Síncrono Polos Salientes

- Ângulo de carga
 - Vamos reavaliar a equação da tensão induzida

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_d + \hat{V}_q + jX_d \hat{I}_d + jX_q \hat{I}_q$$



Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Gerador Síncrono Polos Salientes

■ Ângulo de carga

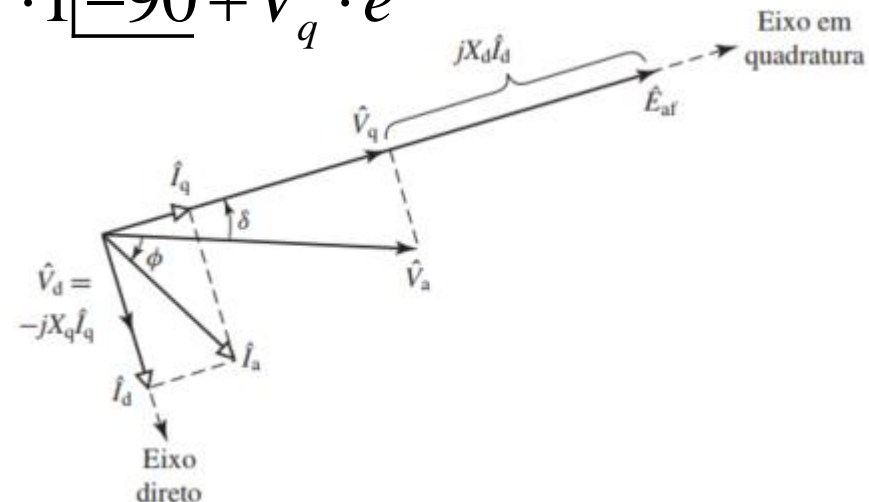
- Vamos reavaliar a equação da tensão induzida

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_d + \hat{V}_q + jX_d \hat{I}_d + jX_q \hat{I}_q$$

$$\hat{V}_a = \hat{V}_d + \hat{V}_q = V_d \cdot e^{j(\delta-90)} + V_q \cdot e^{j\delta}$$

$$= V_d \cdot e^{j\delta} \cdot e^{-j90} + V_q \cdot e^{j\delta} = V_d \cdot e^{j\delta} \cdot 1 \angle -90 + V_q \cdot e^{j\delta}$$

$$\hat{V}_a = \hat{V}_d + \hat{V}_q = -jV_d \cdot e^{j\delta} + V_q \cdot e^{j\delta}$$



Gerador Síncrono Polos Salientes

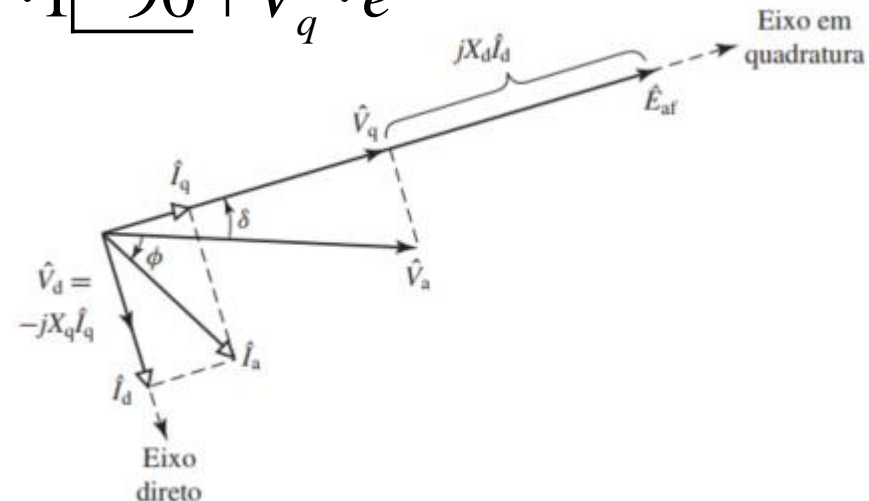
■ Ângulo de carga

- Vamos reavaliar a equação da tensão induzida

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_d + \hat{V}_q + jX_d \hat{I}_d + jX_q \hat{I}_q$$

$$\begin{aligned}\hat{V}_a &= \hat{V}_d + \hat{V}_q = V_d \cdot e^{j(\delta-90)} + V_q \cdot e^{j\delta} \\ &= V_d \cdot e^{j\delta} \cdot e^{-j90} + V_q \cdot e^{j\delta} = V_d \cdot e^{j\delta} \cdot 1 \angle -90 + V_q \cdot e^{j\delta}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\hat{V}_a &= \hat{V}_d + \hat{V}_q = -jV_d \cdot e^{j\delta} + V_q \cdot e^{j\delta} \\ \hat{I}_a &= \hat{I}_d + \hat{I}_q = -jI_d \cdot e^{j\delta} + I_q \cdot e^{j\delta}\end{aligned}$$



Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Gerador Síncrono Polos Salientes

■ Ângulo de carga

- Vamos reavaliar a equação da tensão induzida

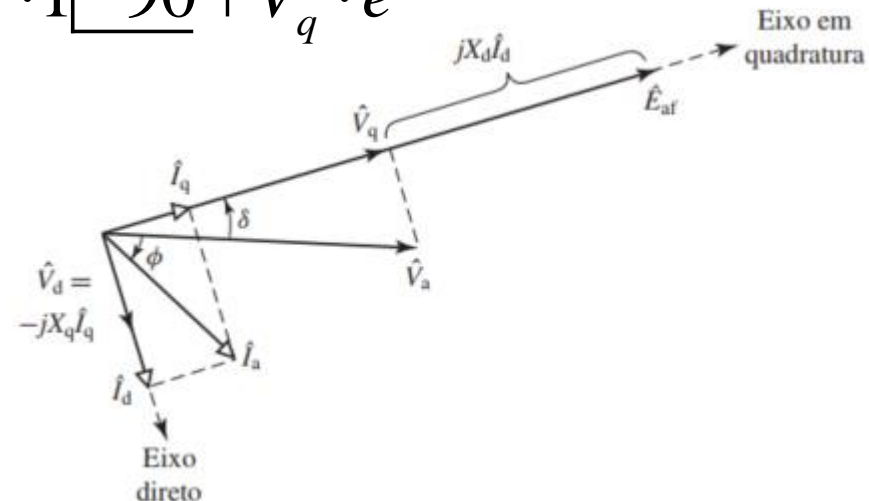
$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_d + \hat{V}_q + jX_d \hat{I}_d + jX_q \hat{I}_q$$

$$\hat{V}_a = \hat{V}_d + \hat{V}_q = V_d \cdot e^{j(\delta-90)} + V_q \cdot e^{j\delta}$$

$$= V_d \cdot e^{j\delta} \cdot e^{-j90} + V_q \cdot e^{j\delta} = V_d \cdot e^{j\delta} \cdot 1 \angle -90 + V_q \cdot e^{j\delta}$$

$$\hat{V}_a = \hat{V}_d + \hat{V}_q = -jV_d \cdot e^{j\delta} + V_q \cdot e^{j\delta}$$

$$\hat{I}_a^* = jI_d \cdot e^{-j\delta} + I_q \cdot e^{-j\delta}$$



Gerador Síncrono Polos Salientes

■ Ângulo de carga

- Vamos reavaliar a equação da tensão induzida

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_d + \hat{V}_q + jX_d \hat{I}_d + jX_q \hat{I}_q$$

$$P = \text{Re} \left[\hat{V}_a \hat{I}_a^* \right]$$

$$= \text{Re} \left[\left(V_d \angle \delta - 90 + V_q \angle \delta \right) \left(I_d \angle 90 - \delta + I_q \angle -\delta \right) \right]$$

$$= V_d I_d + V_q I_q$$

Gerador Síncrono Polos Salientes

- Ângulo de carga
 - Vamos reavaliar a equação da tensão induzida

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_d + \hat{V}_q + jX_d \hat{I}_d + jX_q \hat{I}_q$$

$$P = \text{Re} \left[\hat{V}_a \hat{I}_a^* \right] = V_d I_d + V_q I_q$$

$$I_q = \frac{V_d}{X_q}$$

$$I_d = \frac{E_{af} - V_q}{X_d}$$

$$V_q = V_a \cos(\delta)$$

$$V_d = V_a \sin(\delta)$$

Gerador Síncrono Polos Salientes

■ Ângulo de carga

- Vamos reavaliar a equação da potência ativa

$$P = \text{Re} \left[\hat{V}_a \hat{I}_a^* \right] = V_d I_d + V_q I_q$$

$$P = V_a \sin(\delta) \frac{E_{af} - V_q}{X_d} + V_a \cos(\delta) \frac{V_d}{X_q}$$

$$P = \frac{V_a E_{af} \sin(\delta) - V_q V_a \sin(\delta)}{X_d} + \frac{V_a V_d \cos(\delta)}{X_q}$$

$$P = \frac{V_a E_{af} \sin(\delta)}{X_d} + \frac{V_a V_d \cos(\delta)}{X_q} - \frac{V_q V_a \sin(\delta)}{X_d}$$

Gerador Síncrono Polos Salientes

■ Ângulo de carga

- Vamos reavaliar a equação da potência ativa

$$P = \text{Re} \left[\hat{V}_a \hat{I}_a^* \right] = V_d I_d + V_q I_q$$

$$P = \frac{V_a E_{af} \sin(\delta)}{X_d} + \frac{V_a V_d \cos(\delta)}{X_q} - \frac{V_q V_a \sin(\delta)}{X_d}$$

$$P = \frac{V_a E_{af} \sin(\delta)}{X_d} + V_a \left(\frac{V_d \cos(\delta)}{X_q} - \frac{V_q \sin(\delta)}{X_d} \right)$$

$$P = \frac{V_a E_{af} \sin(\delta)}{X_d} + V_a \left(\frac{V_d X_d \cos(\delta) - V_q X_q \sin(\delta)}{X_q X_d} \right)$$

Gerador Síncrono Polos Salientes

■ Ângulo de carga

□ Vamos reavaliar a equação da potência ativa

$$P = \text{Re} \left[\hat{V}_a \hat{I}_a^* \right] = V_d I_d + V_q I_q$$

$$P = \frac{V_a E_{af} \sin(\delta)}{X_d} + V_a \left(\frac{V_d X_d \cos(\delta) - V_q X_q \sin(\delta)}{X_q X_d} \right)$$

$$P = \frac{V_a E_{af} \sin(\delta)}{X_d} + V_a \left(\frac{V_a X_d \sin(\delta) \cos(\delta) - V_a X_q \cos(\delta) \sin(\delta)}{X_q X_d} \right)$$

$$P = \frac{V_a E_{af} \sin(\delta)}{X_d} + V_a^2 \sin(\delta) \cos(\delta) \left(\frac{X_d - X_q}{X_q X_d} \right)$$

Gerador Síncrono Polos Salientes

■ Ângulo de carga

- Vamos reavaliar a equação da potência ativa

$$P = \operatorname{Re} \left[\hat{V}_a \hat{I}_a^* \right] = V_d I_d + V_q I_q$$

$$P = \frac{V_a E_{af} \sin(\delta)}{X_d} + \frac{V_a^2 (X_d - X_q)}{2 X_q X_d} \sin(2\delta)$$

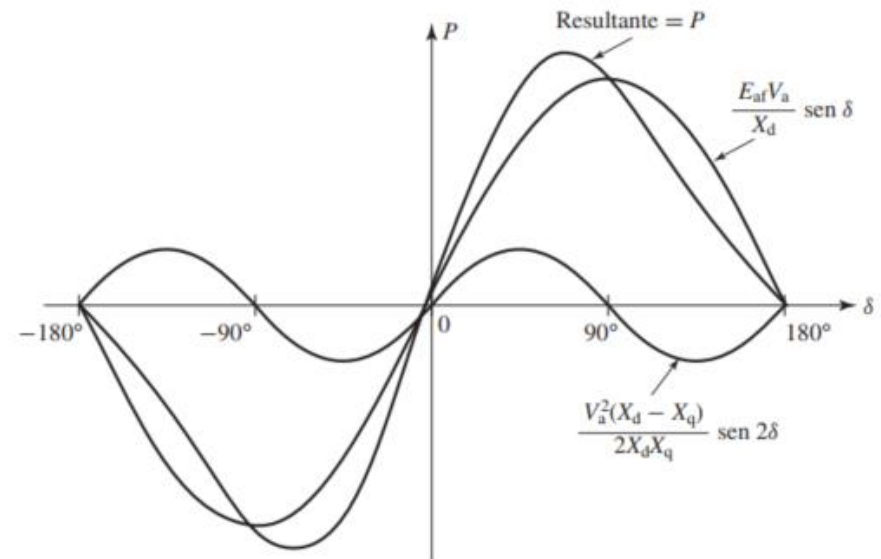
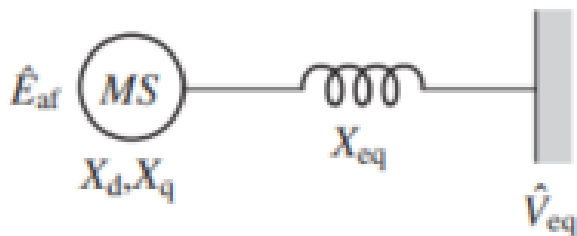
Gerador Síncrono Polos Salientes

■ Ângulo de carga

- Vamos reavaliar a equação da potência ativa

$$P = \text{Re} \left[\hat{V}_a \hat{I}_a^* \right] = V_d I_d + V_q I_q$$

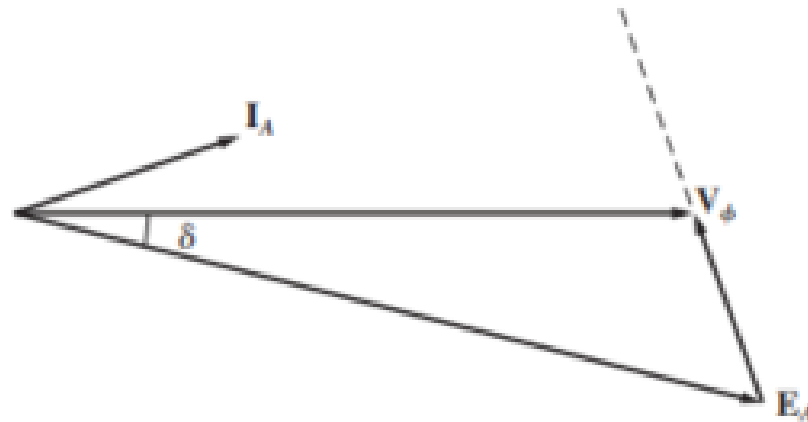
$$P = \frac{V_a E_{af} \sin(\delta)}{X_d} + \frac{V_a^2 (X_d - X_q)}{2 X_q X_d} \sin(2\delta)$$



Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Motor Síncrono

- Operação do motor síncrono
 - Tensão terminal constante
 - Diagrama fasorial de um motor síncrono
 - Com FP adiantado (capacitivo)



Exercício 12

Um motor síncrono trifásico, ligação Y, de 60 Hz tem uma tensão de linha de 460 V nos terminais e uma corrente de terminal de 120 A com um fator de potência de 0,95 indutivo. A corrente de campo é 47 A. A reatância síncrona da máquina é igual a $1,68 \Omega$. Suponha que a resistência de armadura seja desprezível. (A) Calcule a tensão gerada E_{af} em V. (B) O valor de indutância mútua L_{af} entre o campo e a armadura, e (C) a potência de entrada do motor em KW e em HP.

Exercício 12/a

Um motor síncrono trifásico, ligação Y, de 60 Hz tem uma tensão de linha de 460 V nos terminais e uma corrente de terminal de 120 A com um fator de potência de 0,95 indutivo. A corrente de campo é 47 A. A reatância síncrona da máquina é igual a 1,68 Ω . Suponha que a resistência de armadura seja desprezível. (A) Calcule a tensão gerada E_{af} em V. (B) O valor de indutância mútua L_{af} entre o campo e a armadura, e (C) a potência de entrada do motor em KW e em HP.

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_a - jX_s \hat{I}_a$$

$$\hat{E}_{af} = \frac{460}{\sqrt{3}} - j1,68 \cdot 120 \angle -\arccos(0,95)$$

$$\hat{E}_{af} = 265,6 - j1,68 \cdot 120 \angle -18,2^\circ = 278,8 \angle -43,4^\circ$$

$$E_{af} = 278,8 \text{ V}$$

Exercício 12/b

Um motor síncrono trifásico, ligação Y, de 60 Hz tem uma tensão de linha de 460 V nos terminais e uma corrente de terminal de 120 A com um fator de potência de 0,95 indutivo. A corrente de campo é 47 A. A reatância síncrona da máquina é igual a $1,68 \Omega$. Suponha que a resistência de armadura seja desprezível. (A) Calcule a tensão gerada E_{af} , em V. (B) O valor de indutância mútua L_{af} entre o campo e a armadura, e (C) a potência de entrada do motor em KW e em HP.

$$L_{af} = \frac{\sqrt{2}E_{af}}{\omega_e I_f} = \frac{279\sqrt{2}}{120\pi \cdot 47} = 22,3 mH$$

Exercício 12/c

Um motor síncrono trifásico, ligação Y, de 60 Hz tem uma tensão de linha de 460 V nos terminais e uma corrente de terminal de 120 A com um fator de potência de 0,95 indutivo. A corrente de campo é 47 A. A reatância síncrona da máquina é igual a $1,68 \Omega$. Suponha que a resistência de armadura seja desprezível. (A) Calcule a tensão gerada E_{af} em V. (B) O valor de indutância mútua L_{af} entre o campo e a armadura, e (C) a potência de entrada do motor em KW e em HP.

$$P = 3V_a I_a \cdot fp = 3 \cdot 265,6 \cdot 120 \cdot 0,95 = 90,8 \text{ KW} = 122 \text{ HP}$$

Exercício 13

Supondo que a potência de entrada e a tensão de terminal do motor do exercício anterior, permaneçam constantes. Calcule (A) o ângulo de fase da tensão gerada e (B) a corrente de campo necessária para conseguir um fator de potência unitário nos terminais do motor.

Exercício 13/a

Supondo que a potência de entrada e a tensão de terminal do motor do exercício anterior, permaneçam constantes. Calcule (A) o ângulo de fase da tensão gerada e (B) a corrente de campo necessária para conseguir um fator de potência unitário nos terminais do motor.

$$I_a = \frac{90,8 \text{ K}}{3 \cdot 256,6} = 114 \text{ A}$$

$$\hat{E}_{af} = \frac{460}{\sqrt{3}} - j1,68 \cdot 114 = 328 \angle -35,8^\circ$$

$$E_{af} = 328 \text{ V} \qquad \delta = -35,8^\circ$$

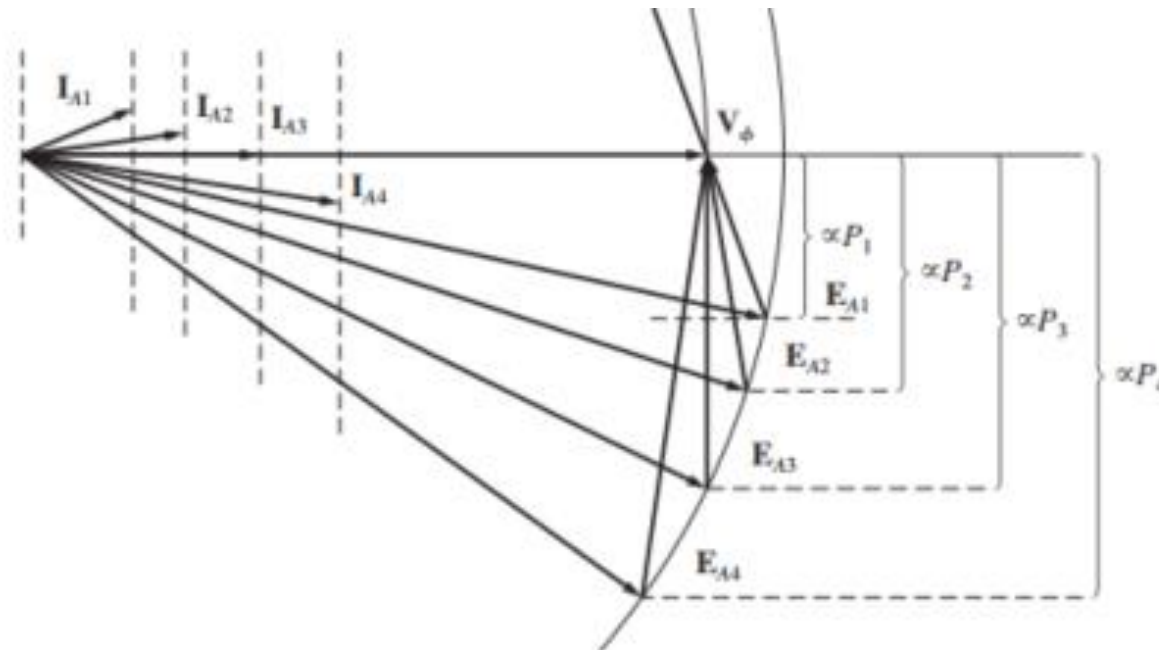
Exercício 13/b

Supondo que a potência de entrada e a tensão de terminal do motor do exercício anterior, permaneçam constantes. Calcule (A) o ângulo de fase da tensão gerada e (B) a corrente de campo necessária para conseguir um fator de potência unitário nos terminais do motor.

$$I_f = \frac{E_{af} \sqrt{2}}{\omega_e L_{af}} = \frac{328\sqrt{2}}{120\pi \cdot 0,0223} = 55,2 \text{ A}$$

Motor Síncrono

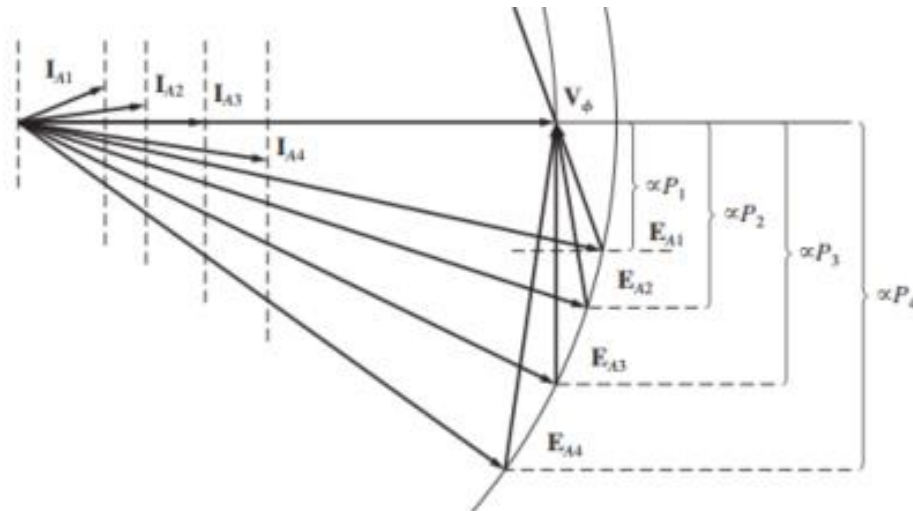
- Operação do motor síncrono
 - Tensão terminal constante
 - Diagrama fasorial do motor síncrono
 - Efeito de aumento de carga sobre o funcionamento do motor síncrono



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Motor Síncrono

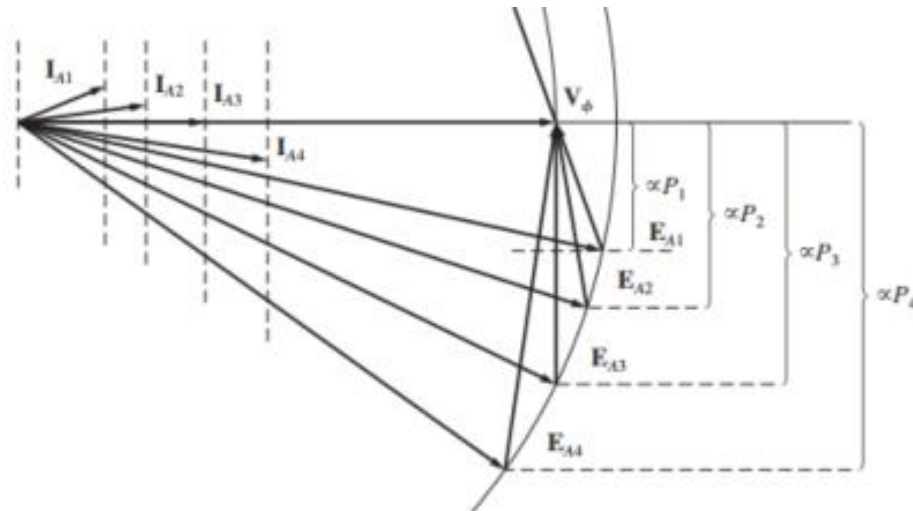
- Operação do motor síncrono
 - Tensão terminal constante
 - Diagrama fasorial do motor síncrono
 - Efeito de aumento de carga sobre o funcionamento do motor síncrono
 - Aumento de carga acompanhando de fornecimento de potência reativa indutiva crescente



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Motor Síncrono

- Operação do motor síncrono
 - Tensão terminal constante
 - Diagrama fasorial do motor síncrono
 - Efeito de aumento de carga sobre o funcionamento do motor síncrono
 - Aumento de carga acompanhando de fornecimento de potência reativa indutiva crescente



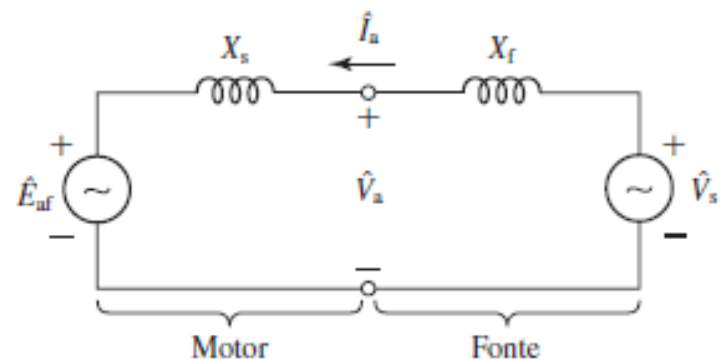
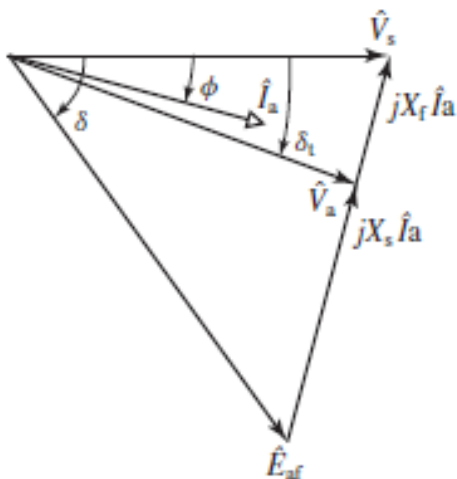
Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Exercício 14

Motor síncrono trifásico de 2000 HP, 2300 V, ligado em Y, 30 pólos e 60 Hz tem uma reatância síncrona de $1,95 \Omega/\text{fase}$ e $\text{CCAV} = 370 \text{ A}$. O motor está conectado a uma fonte de tensão constante de 60 Hz e 2300 V por meio de um alimentador de reatância $32 \Omega/\text{fase}$. Para os propósitos deste problema, despreze as perdas. Motor tem um RAT que é ajustado para manter sua tensão de terminal em 2300 V. Se o motor estiver operando com sua potência nominal, calcule sua corrente de terminal, a potência reativa fornecida ao motor em seus terminais e a respectiva corrente de campo do motor.

Exercício 14

Motor síncrono trifásico de 2000 HP, 2300 V, ligado em Y, 30 pólos e 60 Hz tem uma reatância síncrona de $1,95 \Omega/\text{fase}$ e $\text{CCAV} = 370 \text{ A}$. O motor está conectado a uma fonte de tensão constante de 60 Hz e 2300 V por meio de um alimentador de reatância $0,32 \Omega/\text{fase}$. Para os propósitos deste problemas, despreze as perdas. Motor tem um RAT que é ajustado para manter sua tensão de terminal em 2300 V. Se o motor estiver operando com sua potência nominal, calcule sua corrente de terminal, a potência reativa fornecida ao motor em seus terminais e a respectiva corrente de campo do motor.

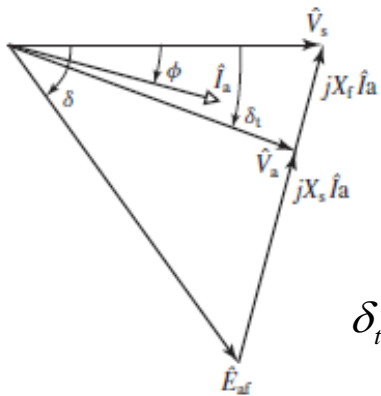


Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Exercício 14

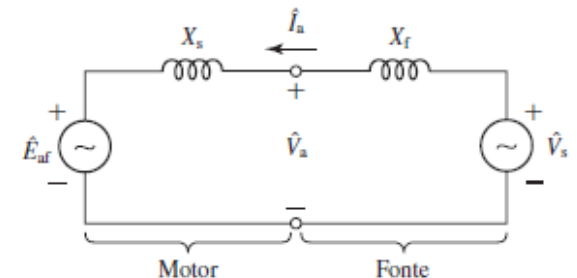
Motor síncrono trifásico de 2000 HP, 2300 V, ligado em Y, 30 pólos e 60 Hz tem uma reatância síncrona de $1,95 \Omega/\text{fase}$ e $\text{CCAV} = 370 \text{ A}$. O motor está conectado a uma fonte de tensão constante de 60 Hz e 2300 V por meio de um alimentador de reatância $0,32 \Omega/\text{fase}$. Para os propósitos deste problemas, despreze as perdas. Motor tem um RAT que é ajustado para manter sua tensão de terminal em 2300 V. Se o motor estiver operando com sua potência nominal, calcule sua corrente de terminal, a potência reativa fornecida ao motor em seus terminais e a respectiva corrente de campo do motor.



$$\hat{V}_a = V_a \angle \delta_t = \frac{2300}{\sqrt{3}} \angle \delta_t = 1328 \angle \delta_t$$

$$\delta_t = -\arcsin\left(\frac{P \cdot X_f}{3 \cdot V_a \cdot V_s}\right) = -\arcsin\left(\frac{1492 \cdot 10^3 \cdot 0,32}{3 \cdot (1328)^2}\right)$$

$$\delta_t = -5,18^\circ$$

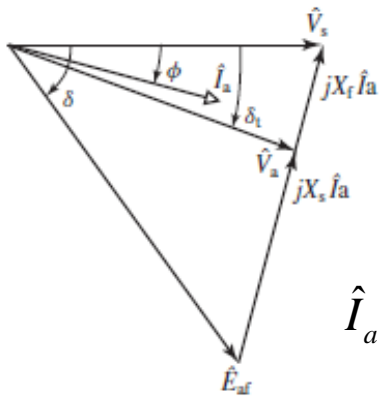


Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

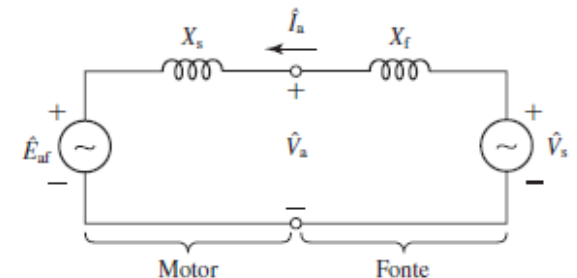
Exercício 14

Motor síncrono trifásico de 2000 HP, 2300 V, ligado em Y, 30 pólos e 60 Hz tem uma reatância síncrona de $1,95 \Omega/\text{fase}$ e $\text{CCAV} = 370 \text{ A}$. O motor está conectado a uma fonte de tensão constante de 60 Hz e 2300 V por meio de um alimentador de reatância $0,32 \Omega/\text{fase}$. Para os propósitos deste problemas, despreze as perdas. Motor tem um RAT que é ajustado para manter sua tensão de terminal em 2300 V. Se o motor estiver operando com sua potência nominal, calcule sua corrente de terminal, a potência reativa fornecida ao motor em seus terminais e a respectiva corrente de campo do motor.



$$\hat{V}_a = 1328 \angle -5,18^\circ$$

$$\hat{I}_a = \frac{\hat{V}_s - \hat{V}_a}{jX_f} = \frac{1328 - 1328 \angle -5,18^\circ}{j0,32} = 375,1 \angle -2,59^\circ$$



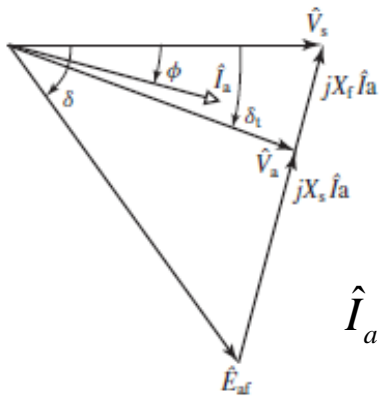
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

$$Q = \text{Im} \left[3 \cdot \hat{V}_a \cdot \hat{I}_a \right] = \text{Im} \left[3 \cdot 1328 \angle -5,18^\circ \cdot 375,1 \angle -2,59^\circ \right] = -202 \text{ kVA}_r$$

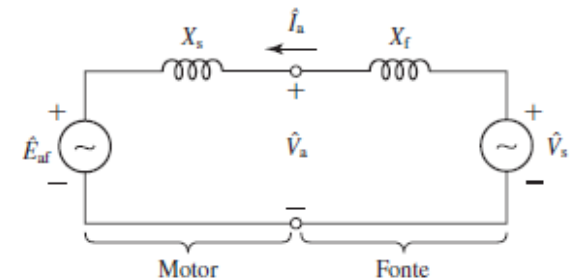
Exercício 14

Motor síncrono trifásico de 2000 HP, 2300 V, ligado em Y, 30 pólos e 60 Hz tem uma reatância síncrona de $1,95 \Omega/\text{fase}$ e $\text{CCAV} = 370 \text{ A}$. O motor está conectado a uma fonte de tensão constante de 60 Hz e 2300 V por meio de um alimentador de reatância $0,32 \Omega/\text{fase}$. Para os propósitos deste problemas, despreze as perdas. Motor tem um RAT que é ajustado para manter sua tensão de terminal em 2300 V. Se o motor estiver operando com sua potência nominal, calcule sua corrente de terminal, a potência reativa fornecida ao motor em seus terminais e a respectiva corrente de campo do motor.



$$\hat{V}_a = 1328 \angle -5,18^\circ$$

$$\hat{I}_a = \frac{\hat{V}_s - \hat{V}_a}{jX_f} = \frac{1328 - 1328 \angle -5,18^\circ}{j0,32} = 375,1 \angle -2,59^\circ$$



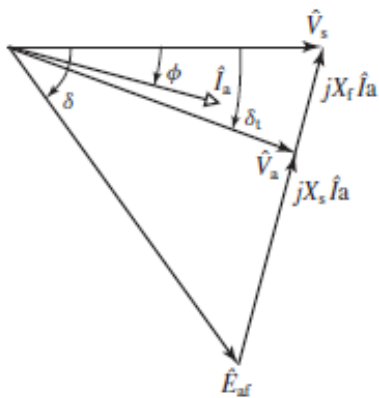
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

$$P = \text{Re} \left[3 \cdot \hat{V}_a \cdot \hat{I}_a \right] = \text{Im} \left[3 \cdot 1328 \angle -5,18^\circ \cdot 375,1 \angle -2,59^\circ \right] = 1480,7 \text{ kW}$$

Exercício 14

Motor síncrono trifásico de 2000 HP, 2300 V, ligado em Y, 30 pólos e 60 Hz tem uma reatância síncrona de $1,95 \Omega/\text{fase}$ e $\text{CCAV} = 370 \text{ A}$. O motor está conectado a uma fonte de tensão constante de 60 Hz e 2300 V por meio de um alimentador de reatância $0,32 \Omega/\text{fase}$. Para os propósitos deste problemas, despreze as perdas. Motor tem um RAT que é ajustado para manter sua tensão de terminal em 2300 V. Se o motor estiver operando com sua potência nominal, calcule sua corrente de terminal, a potência reativa fornecida ao motor em seus terminais e a respectiva corrente de campo do motor.



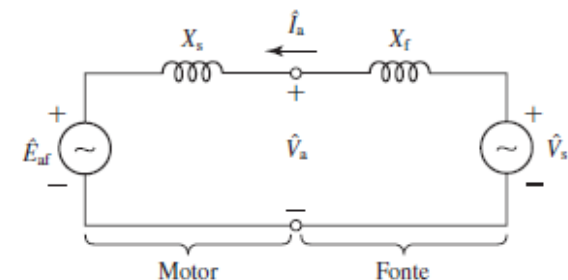
$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_s - j(X_s + X_f) \hat{I}_a$$

$$\hat{E}_{af} = 1328 + j(1,95 + 0,32) \cdot 375 \angle -2,59^\circ$$

$$\hat{E}_{af} = 1328 + 851,3 \angle 87,4^\circ$$

$$\hat{E}_{af} = 1366,5 + j850,4 = 1609,5 \angle 31,9^\circ$$

$$\hat{E}_{af} = 1609,5 \cdot \sqrt{3} = 2787,7 \text{ V}$$



Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

$$\hat{E}_{af} = \frac{2787,7}{2300} = 1,21204 \text{ p.u.} \rightarrow I_f = 1,21204 \cdot 370 = 448,5 \text{ A}$$

Exemplo 9

Um motor síncrono de 208 V, 45 HP, FP 0,8 adiantado, ligado em Δ e 60 Hz tem uma reatância síncrona de $2,5 \Omega$ e uma resistência de armadura desprezível. Suas perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW. Inicialmente, o eixo está impulsionando uma carga de 15 HP e o fator de potência do motor é 0,80 adiantado. (a) Desenhe o diagrama fasorial desse motor e encontre os valores de I_a , I_L e E_{af} . (b) A carga no eixo foi aumentada para 30 HP. Desenhe o diagrama fasorial desse aumento. (c) Encontre I_a , I_L e E_{af} após a alteração da carga. Qual é o novo fator de potência?

Exemplo 9

Um motor síncrono de 208 V, 45 HP, FP 0,8 adiantado, ligado em Δ e 60 Hz tem uma reatância síncrona de $2,5 \Omega$ e uma resistência de armadura desprezível. Suas perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW. Inicialmente, o eixo está impulsinando uma carga de 15 HP e o fator de potência do motor é 0,80 adiantado. (a) Desenhe o diagrama fasorial desse motor e encontre os valores de I_a , I_L e E_{af} . (b) A carga no eixo foi aumentada para 30 HP. Desenhe o diagrama fasorial desse aumento. (c) Encontre I_a , I_L e E_{af} após a alteração da carga. Qual é o novo fator de potência?

$$P_{saída} = 15 \cdot 0,746 = 11,19 \text{ kW}$$

$$P_{entrada} = P_{saída} + P_{AV} + P_{fe} = 11,19 + 1,5 + 1,0 = 13,69 \text{ kW}$$

$$I_L = \frac{13,69 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 208 \cdot 0,8} = 47,5 \text{ A} \rightarrow I_a = \frac{47,5}{\sqrt{3}} = 27,4 \text{ A}$$

$$\hat{I}_a = 27,4 \angle 36,87^\circ$$

Exemplo 9

Um motor síncrono de 208 V, 45 HP, FP 0,8 adiantado, ligado em Δ e 60 Hz tem uma reatância síncrona de $2,5 \Omega$ e uma resistência de armadura desprezível. Suas perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW. Inicialmente, o eixo está impulsinando uma carga de 15 HP e o fator de potência do motor é 0,80 adiantado. (a) Desenhe o diagrama fasorial desse motor e encontre os valores de I_a , I_L e E_{af} . (b) A carga no eixo foi aumentada para 30 HP. Desenhe o diagrama fasorial desse aumento. (c) Encontre I_a , I_L e E_{af} após a alteração da carga. Qual é o novo fator de potência?

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_t - jX_s \hat{I}_a$$

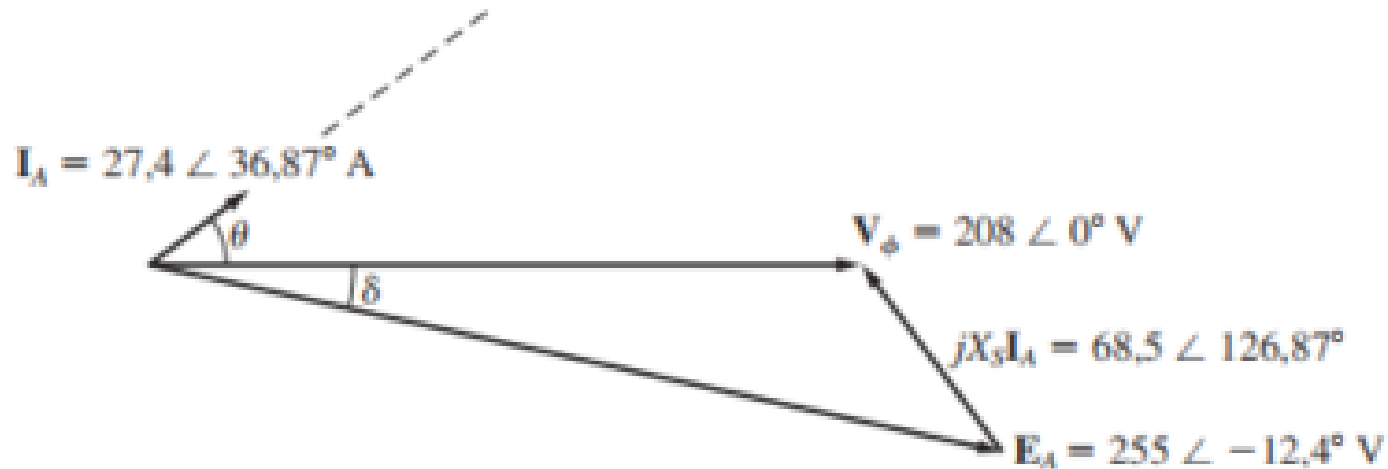
$$\hat{E}_{af} = 208 - j2,5 \cdot 27,4 \angle 36,87^\circ$$

$$\hat{E}_{af} = 208 - 68,75 \angle 126,87^\circ = 249,25 - j55$$

$$\hat{E}_{af} = 255,25 \angle -12,44^\circ$$

Exemplo 9

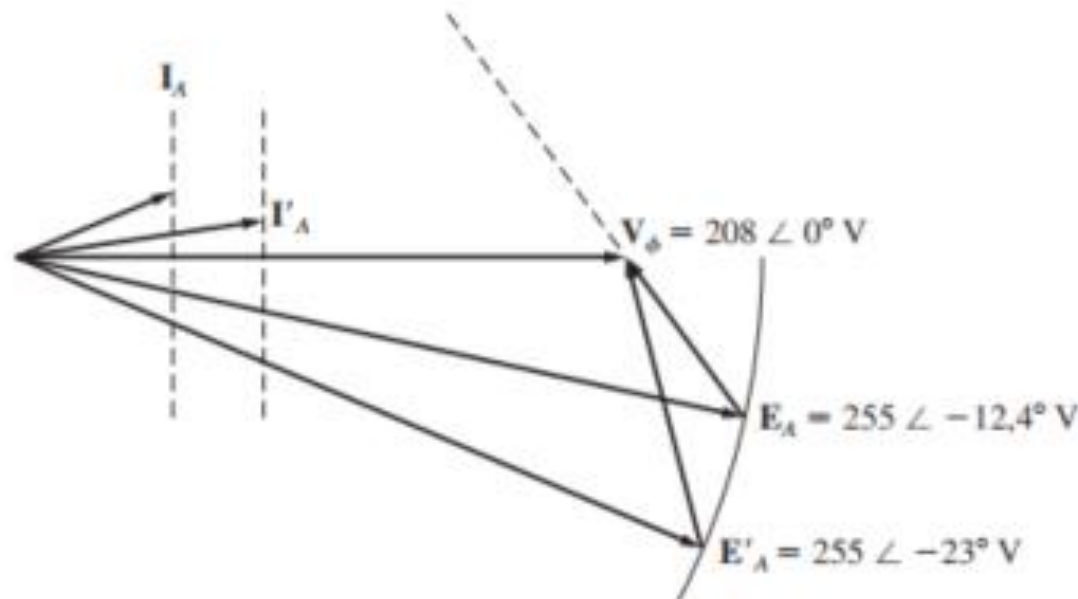
Um motor síncrono de 208 V, 45 HP, FP 0,8 adiantado, ligado em Δ e 60 Hz tem uma reatância síncrona de $2,5 \Omega$ e uma resistência de armadura desprezível. Suas perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW. Inicialmente, o eixo está impulsinando uma carga de 15 HP e o fator de potência do motor é 0,80 adiantado. (a) Desenhe o diagrama fasorial desse motor e encontre os valores de I_a , I_L e E_{af} . (b) A carga no eixo foi aumentada para 30 HP. Desenhe o diagrama fasorial desse aumento. (c) Encontre I_a , I_L e E_{af} após a alteração da carga. Qual é o novo fator de potência?



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Exemplo 9

Um motor síncrono de 208 V, 45 HP, FP 0,8 adiantado, ligado em Δ e 60 Hz tem uma reatância síncrona de $2,5 \Omega$ e uma resistência de armadura desprezível. Suas perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW. Inicialmente, o eixo está impulsinando uma carga de 15 HP e o fator de potência do motor é 0,80 adiantado. (a) Desenhe o diagrama fasorial desse motor e encontre os valores de I_a , I_L e E_{af} . (b) A carga no eixo foi aumentada para 30 HP. Desenhe o diagrama fasorial desse aumento. (c) Encontre I_a , I_L e E_{af} após a alteração da carga. Qual é o novo fator de potência?



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Exemplo 9

Um motor síncrono de 208 V, 45 HP, FP 0,8 adiantado, ligado em Δ e 60 Hz tem uma reatância síncrona de $2,5 \Omega$ e uma resistência de armadura desprezível. Suas perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW. Inicialmente, o eixo está impulsinando uma carga de 15 HP e o fator de potência do motor é 0,80 adiantado. (a) Desenhe o diagrama fasorial desse motor e encontre os valores de I_a , I_L e E_{af} . (b) A carga no eixo foi aumentada para 30 HP. Desenhe o diagrama fasorial desse aumento. (c) Encontre I_a , I_L e E_{af} após a alteração da carga. Qual é o novo fator de potência?

$$P_{saída} = 30 \cdot 0,746 = 22,38 \text{ kW}$$

$$P_{entrada} = P_{saída} + P_{AV} + P_{fe} = 22,38 + 1,5 + 1,0 = 24,88 \text{ kW}$$

$$\delta = \arcsen \left(\frac{X_s \cdot P}{3 \cdot V_t \cdot E_{af}} \right) = \arcsen \left(\frac{2,5 \cdot 24,88 \text{ k}}{3 \cdot 208 \cdot 255} \right)$$

$$\delta = \arcsen(0,391) \rightarrow \delta = 23^\circ$$

Exemplo 9

Um motor síncrono de 208 V, 45 HP, FP 0,8 adiantado, ligado em Δ e 60 Hz tem uma reatância síncrona de $2,5 \Omega$ e uma resistência de armadura desprezível. Suas perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW. Inicialmente, o eixo está impulsinando uma carga de 15 HP e o fator de potência do motor é 0,80 adiantado. (a) Desenhe o diagrama fasorial desse motor e encontre os valores de I_a , I_L e E_{af} . (b) A carga no eixo foi aumentada para 30 HP. Desenhe o diagrama fasorial desse aumento. (c) Encontre I_a , I_L e E_{af} após a alteração da carga. Qual é o novo fator de potência?

$$\hat{E}_{af} = 255 \angle -23^\circ$$

$$\hat{I}_a = \frac{\hat{V}_t - \hat{E}_{af}}{jX_s} = \frac{208 \angle 0^\circ - 255 \angle -23^\circ}{j2,5} = j10,7 + 39,9 = 41,3 \angle 15^\circ$$

$$I_L = \sqrt{3} \cdot 41,3 = 71,5 \text{ A}$$

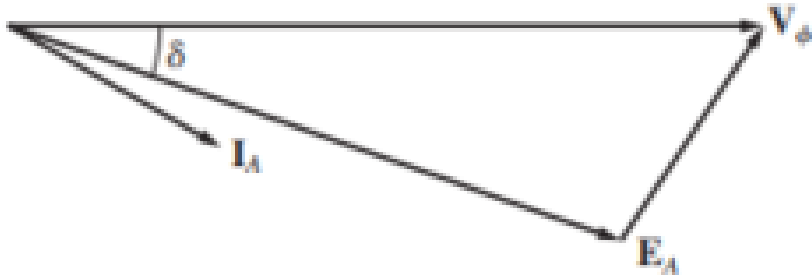
Exemplo 9

Um motor síncrono de 208 V, 45 HP, FP 0,8 adiantado, ligado em Δ e 60 Hz tem uma reatância síncrona de $2,5 \Omega$ e uma resistência de armadura desprezível. Suas perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW. Inicialmente, o eixo está impulsinando uma carga de 15 HP e o fator de potência do motor é 0,80 adiantado. (a) Desenhe o diagrama fasorial desse motor e encontre os valores de I_a , I_L e E_{af} . (b) A carga no eixo foi aumentada para 30 HP. Desenhe o diagrama fasorial desse aumento. (c) Encontre I_a , I_L e E_{af} após a alteração da carga. Qual é o novo fator de potência?

$$\frac{\hat{V}_t}{\hat{I}_a} = \frac{208 \angle 0^\circ}{41,3 \angle 15^\circ} = 5,0363 \angle -15^\circ \rightarrow FP = \cos(-15) = 0,966 \text{ cap.}$$

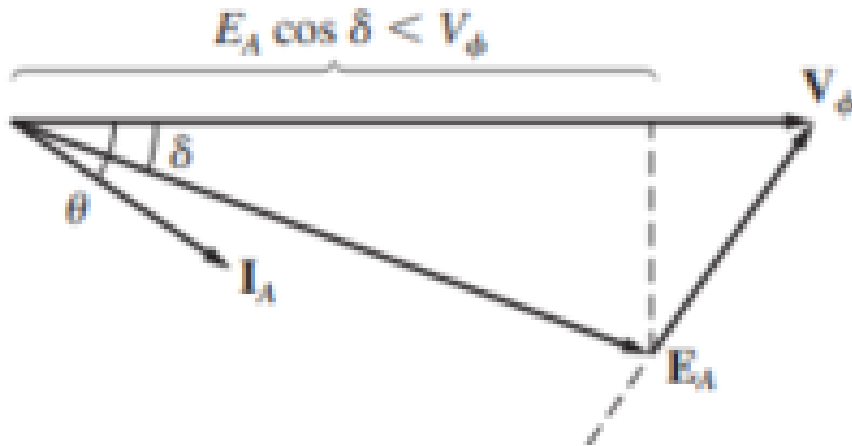
Motor Síncrono

- Operação do motor síncrono
 - Tensão terminal constante
 - Efeito da mudança da corrente de campo – potência ativa é mantida constante



Motor Síncrono

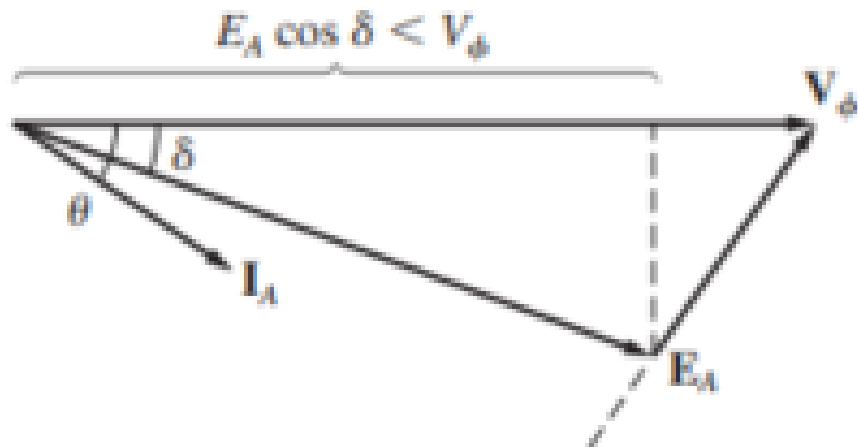
- Operação do motor síncrono
 - Tensão terminal constante
 - Efeito da mudança da corrente de campo – potência ativa é mantida constante



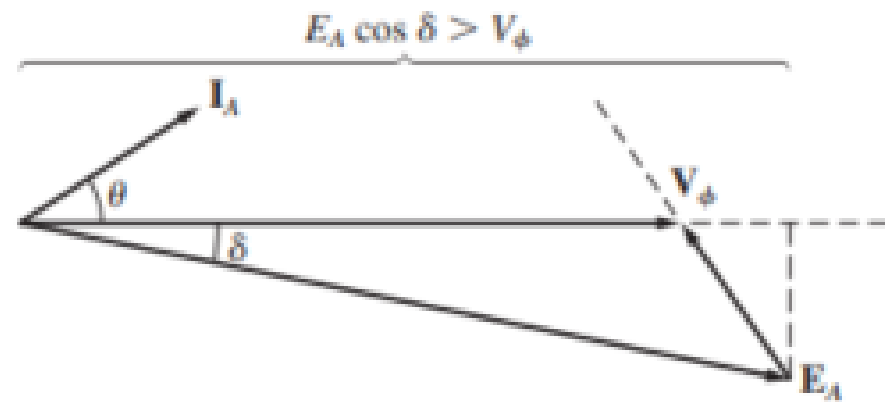
Motor síncrono subexcitado

Motor Síncrono

- Operação do motor síncrono
 - Tensão terminal constante
 - Efeito da mudança da corrente de campo – potência ativa é mantida constante



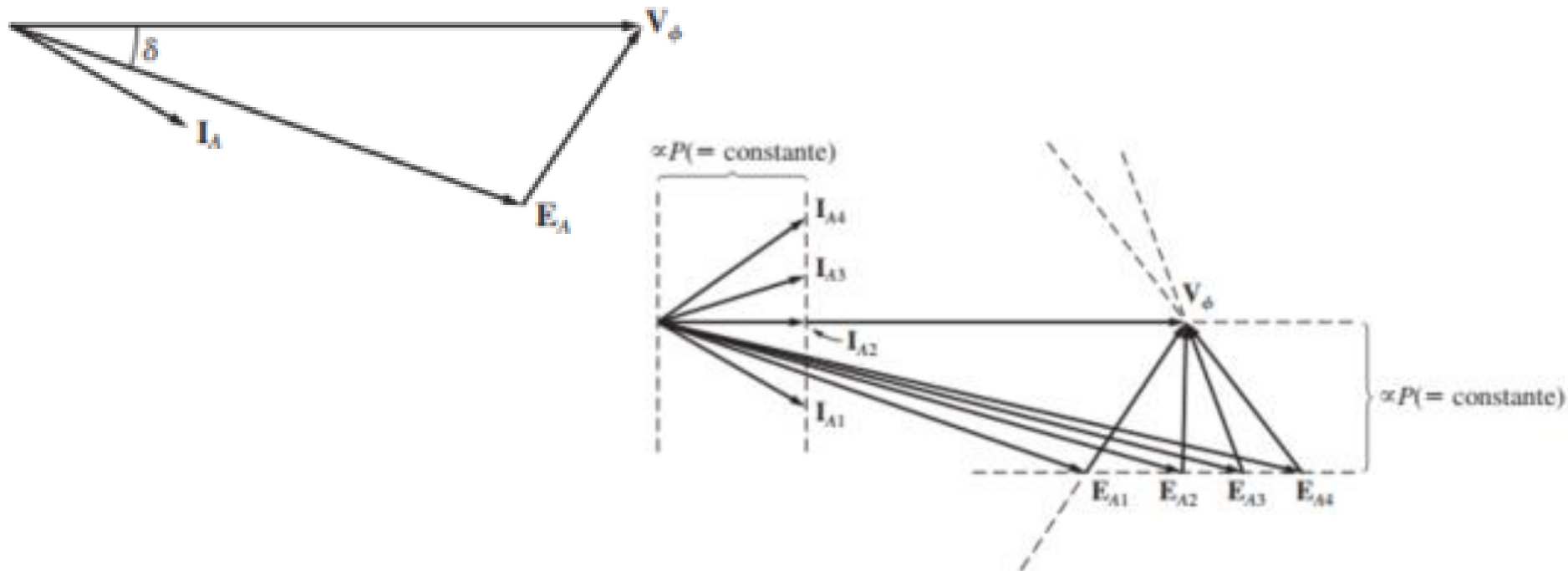
Motor síncrono subexcitado



Motor síncrono sobre-excitado

Motor Síncrono

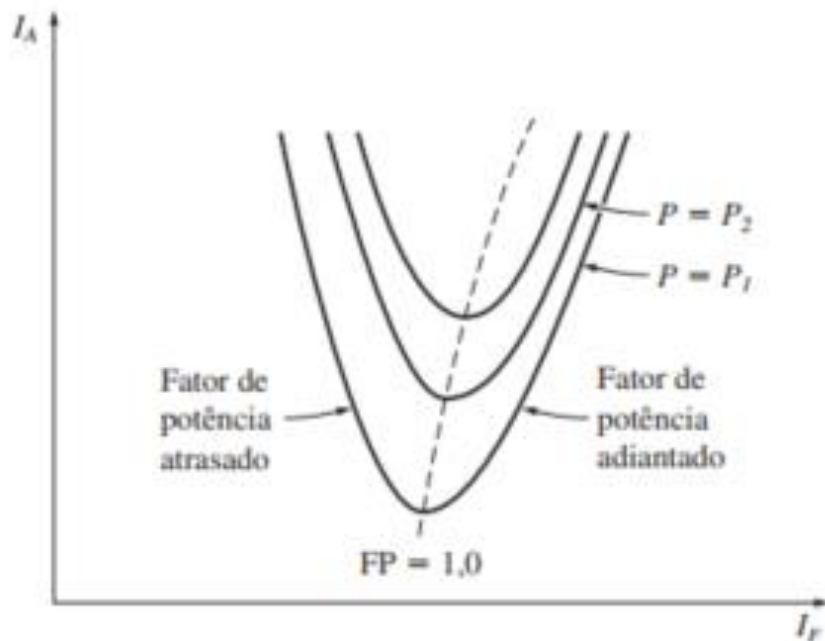
- Operação do motor síncrono
 - Tensão terminal constante
 - Efeito da mudança da corrente de campo – potência ativa é mantida constante



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

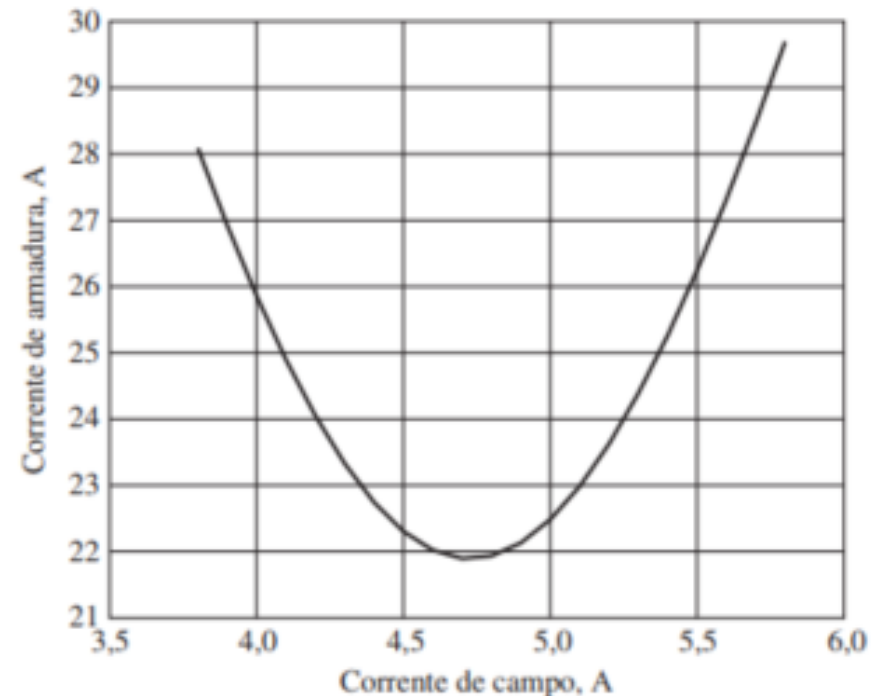
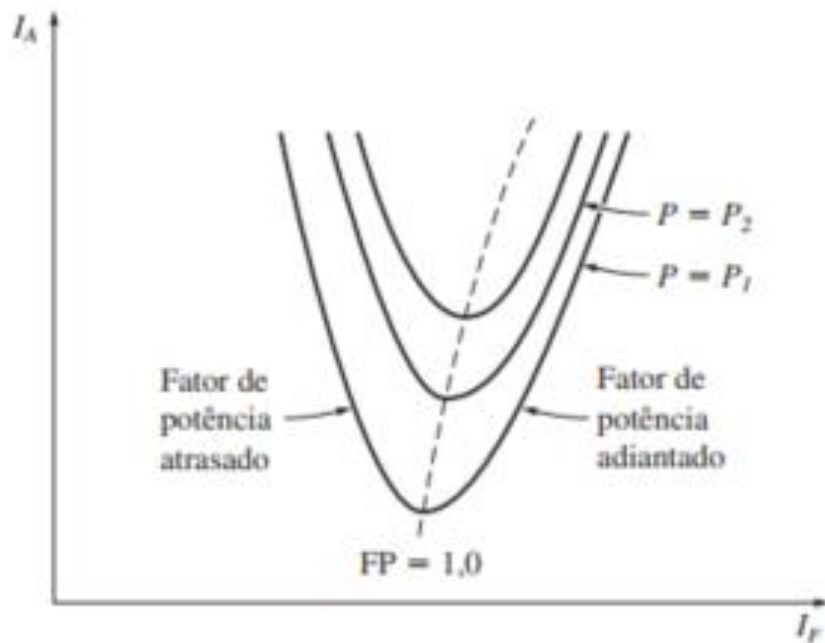
Motor Síncrono

- Operação do motor síncrono
 - Tensão terminal constante
 - Curvas V do motor síncrono



Motor Síncrono

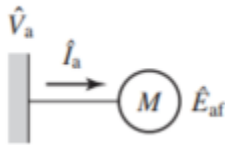
- Operação do motor síncrono
 - Tensão terminal constante
 - Curvas V do motor síncrono



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

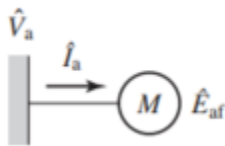
Exercício 15

Motor síncrono trifásico de 2000 HP, 2300 V, ligado em Y, 30 pólos e 60 Hz tem uma reatância síncrona de $1,95 \Omega/\text{fase}$. Na realidade, trata-se de uma máquina de polos salientes com reatâncias $X_d = 1,95 \Omega/\text{fase}$ e $X_q = 1,40 \Omega/\text{fase}$. Desprezando todas as perdas, calcule a potência mecânica máxima, em kW, que esse motor poderá entregar se for alimentado com potência elétrica diretamente a partir de um barramento infinito (Figura abaixo), na tensão e frequência nominais, e se sua excitação de campo for mantida constante com o valor do qual resulta um funcionamento com fator de potência unitário para a carga nominal. Supõe-se que a carga no eixo seja incrementada gradualmente, de modo que as oscilações transitórias são desprezíveis e que o limite de potência em regime permanente seja aplicável. Calcule também o valor de δ correspondente a esse funcionamento em potência máxima.



Exercício 15

Motor síncrono trifásico de 2000 HP, 2300 V, ligado em Y, 30 pólos e 60 Hz tem uma reatância síncrona de $1,95 \Omega/\text{fase}$. Na realidade, trata-se de uma máquina de polos salientes com reatâncias $X_d = 1,95 \Omega/\text{fase}$ e $X_q = 1,40 \Omega/\text{fase}$. Desprezando todas as perdas, calcule a potência mecânica máxima, em kW, que esse motor poderá entregar se for alimentado com potência elétrica diretamente a partir de um barramento infinito (Figura abaixo), na tensão e frequência nominais, e se sua excitação de campo for mantida constante com o valor do qual resulta um funcionamento com fator de potência unitário para a carga nominal. Supõe-se que a carga no eixo seja incrementada gradualmente, de modo que as oscilações transitórias são desprezíveis e que o limite de potência em regime permanente seja aplicável. Calcule também o valor de δ correspondente a esse funcionamento em potência máxima.



$$P = 2000 \cdot 0,746 = 1492 \text{ kW}$$

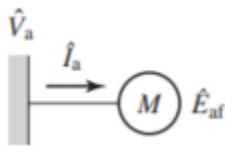
$$Z_b = \frac{2300^2}{1492000} = 3,546 \Omega$$

$$X_d = 0,55 \text{ pu}$$

$$X_q = 0,395 \text{ pu}$$

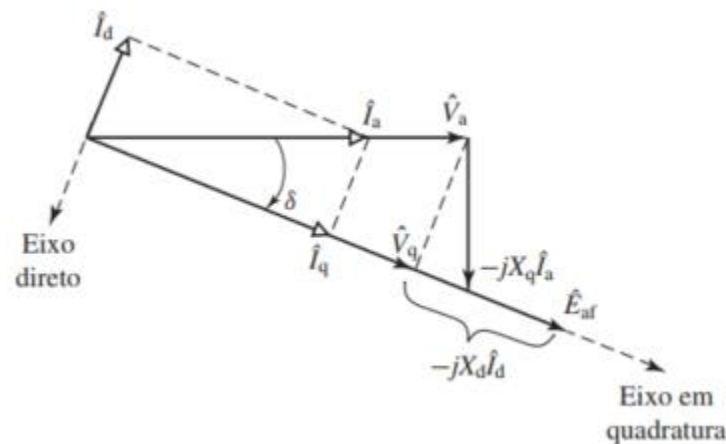
Exercício 15

Motor síncrono trifásico de 2000 HP, 2300 V, ligado em Y, 30 pólos e 60 Hz tem uma reatância síncrona de $1,95 \Omega/\text{fase}$. Na realidade, trata-se de uma máquina de polos salientes com reatâncias $X_d = 1,95 \Omega/\text{fase}$ e $X_q = 1,40 \Omega/\text{fase}$. Desprezando todas as perdas, calcule a potência mecânica máxima, em kW, que esse motor poderá entregar se for alimentado com potência elétrica diretamente a partir de um barramento infinito (Figura abaixo), na tensão e frequência nominais, e se sua excitação de campo for mantida constante com o valor do qual resulta um funcionamento com fator de potência unitário para a carga nominal. Supõe-se que a carga no eixo seja incrementada gradualmente, de modo que as oscilações transitórias são desprezíveis e que o limite de potência em regime permanente seja aplicável. Calcule também o valor de δ correspondente a esse funcionamento em potência máxima.



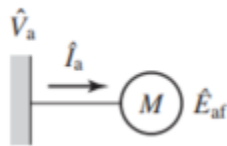
$$V_t = 1,0 \text{ pu}$$

$$I_a = 1,0 \text{ pu}$$



Exercício 15

Motor síncrono trifásico de 2000 HP, 2300 V, ligado em Y, 30 pólos e 60 Hz tem uma reatância síncrona de $1,95 \Omega/\text{fase}$. Na realidade, trata-se de uma máquina de polos salientes com reatâncias $X_d = 1,95 \Omega/\text{fase}$ e $X_q = 1,40 \Omega/\text{fase}$. Desprezando todas as perdas, calcule a potência mecânica máxima, em kW, que esse motor poderá entregar se for alimentado com potência elétrica diretamente a partir de um barramento infinito (Figura abaixo), na tensão e frequência nominais, e se sua excitação de campo for mantida constante com o valor do qual resulta um funcionamento com fator de potência unitário para a carga nominal. Supõe-se que a carga no eixo seja incrementada gradualmente, de modo que as oscilações transitórias são desprezíveis e que o limite de potência em regime permanente seja aplicável. Calcule também o valor de δ correspondente a esse funcionamento em potência máxima.

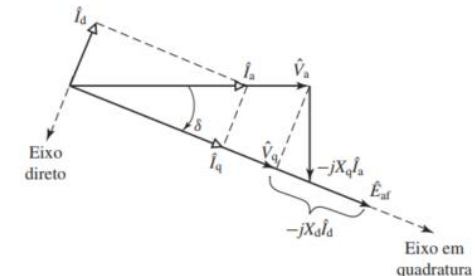


$$\delta = -\arctg\left(\frac{I_a X_q}{V_t}\right) = -\arctg(0,395) = -21,6$$

$$I_d = I_a \sin(\delta) = -0,367$$

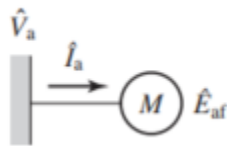
$$V_t = 1,0 \text{ pu} \quad V_q = V_a \cos(\delta) = 0,93$$

$$I_a = 1,0 \text{ pu} \quad E_{af} = V_q - I_d X_d = 0,93 - (-0,367)0,55 = 1,132$$



Exercício 15

Motor síncrono trifásico de 2000 HP, 2300 V, ligado em Y, 30 pólos e 60 Hz tem uma reatância síncrona de $1,95 \Omega/\text{fase}$. Na realidade, trata-se de uma máquina de polos salientes com reatâncias $X_d = 1,95 \Omega/\text{fase}$ e $X_q = 1,40 \Omega/\text{fase}$. Desprezando todas as perdas, calcule a potência mecânica máxima, em kW, que esse motor poderá entregar se for alimentado com potência elétrica diretamente a partir de um barramento infinito (Figura abaixo), na tensão e frequência nominais, e se sua excitação de campo for mantida constante com o valor do qual resulta um funcionamento com fator de potência unitário para a carga nominal. Supõe-se que a carga no eixo seja incrementada gradualmente, de modo que as oscilações transitórias são desprezíveis e que o limite de potência em regime permanente seja aplicável. Calcule também o valor de δ correspondente a esse funcionamento em potência máxima.



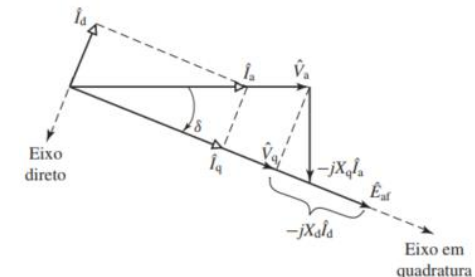
$$P = - \left[\frac{V_a E_{af} \sin(\delta)}{X_d} + \frac{V_a^2 (X_d - X_q)}{2 X_q X_d} \sin(2\delta) \right]$$

$$P = -2,058 \cdot \sin(\delta) - 0,357 \cdot \sin(2\delta)$$

$$V_t = 1,0 \text{ pu} \quad \frac{dP}{d\theta} = 0 = -2,058 \cdot \cos(\delta) - 0,714 \cdot \cos(2\delta)$$

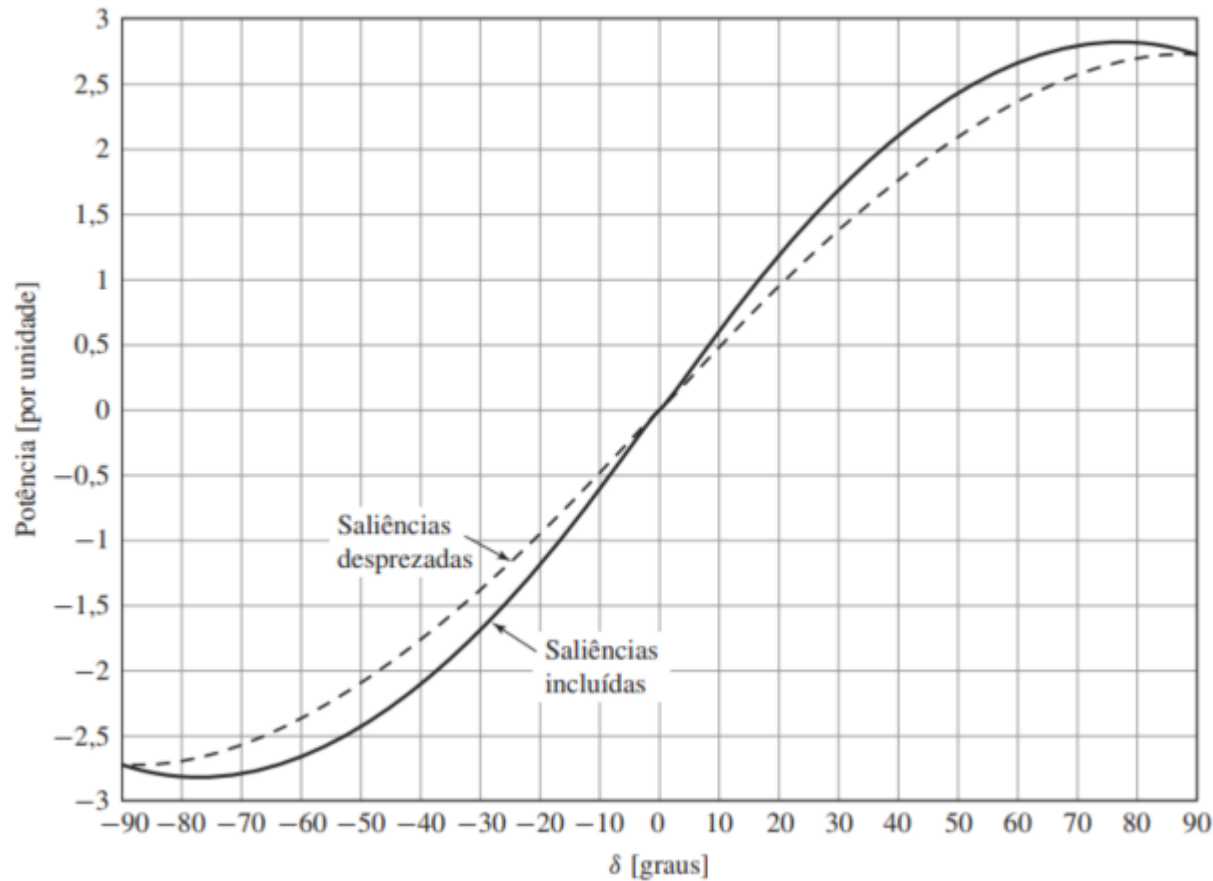
$$I_a = 1,0 \text{ pu} \quad \delta = -73,2^\circ$$

$$P_{\max} = 2,17 \text{ pu} \rightarrow P_{\max} = 3240 \text{ kW} \rightarrow P_{\max} = 4340 \text{ HP}$$



Curiosidade 1

Na prática, qual a relação potência x ângulo de potência levando em conta as saliências e desprezando-as?

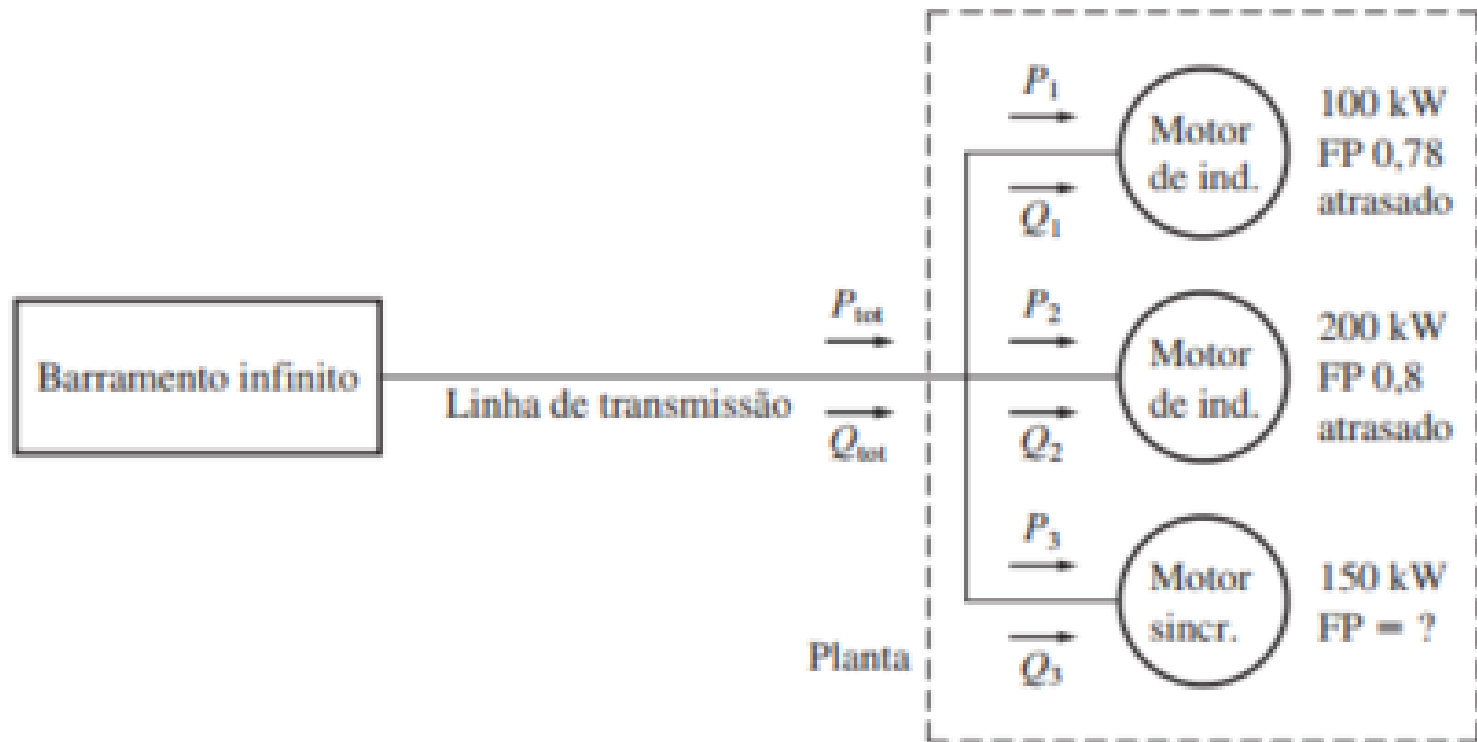


Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Conversão Eletromecânica de Energia II

Motor Síncrono

- Operação do motor síncrono
 - Correção de fator de potência
 - Condensador síncrono

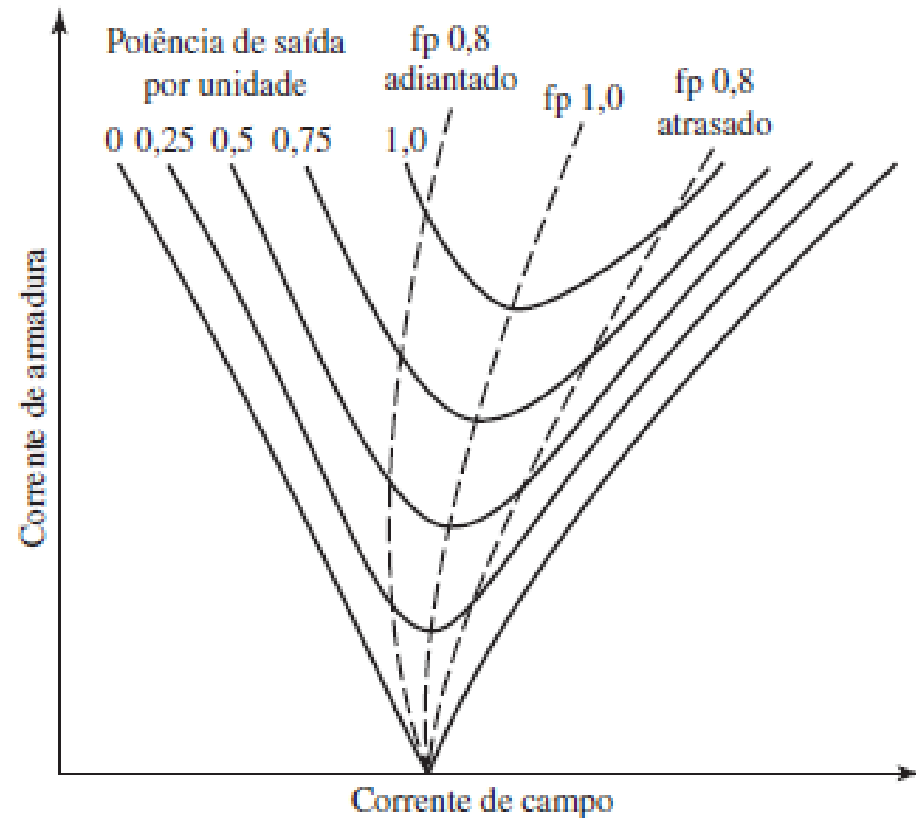


Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Condensador Síncrono

■ Condensador Síncrono

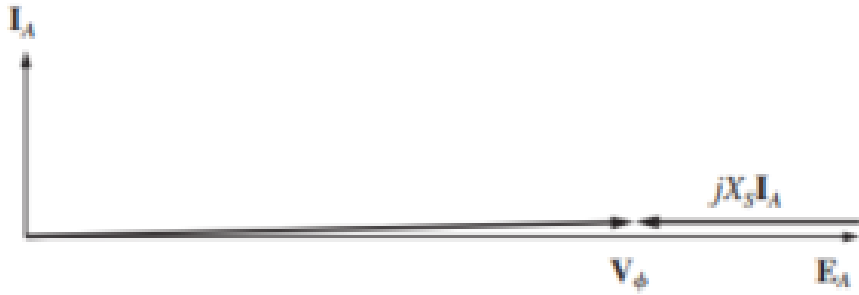
- ❑ potência de saída por unidade nula
- ❑ Função motor, apenas para correção de fator de potência



Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

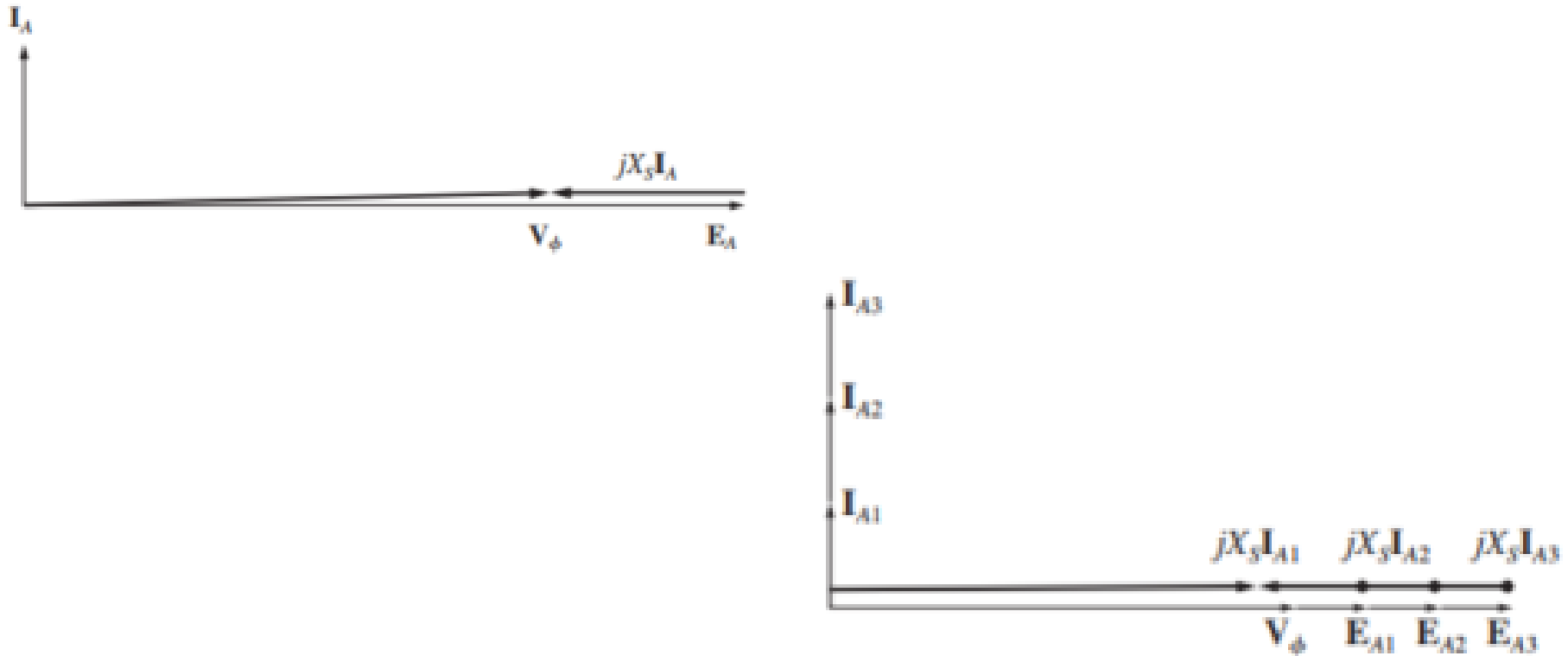
Condensador Síncrono

- Condensador Síncrono
 - Diagrama fasorial do condensador



Condensador Síncrono

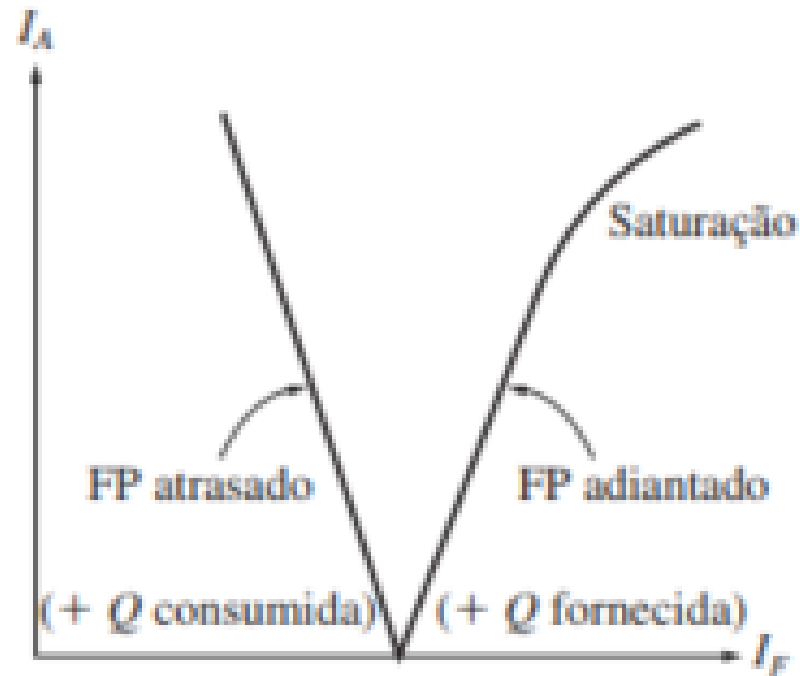
- Condensador Síncrono
 - Diagrama fasorial do condensador



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Condensador Síncrono

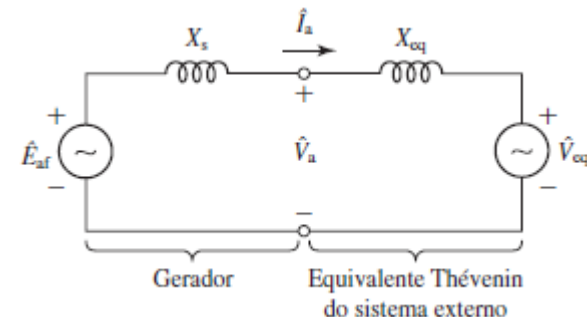
- Condensador Síncrono
 - Curva V do condensador



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Exercício 15

Considere um condensador síncrono conectado a um sistema de potência que pode ser representado conforme abaixo. O condensador tem especificações nominais de 75 MVA e 13,8 kV com uma reatância síncrona de 0,95 p.u. e $CCAV=830$ A. Se a tensão equivalente do sistema for 13,75 kV e $X_{eq}=0,02$ p.u. tomando como base o gerador, calcule a corrente de campo do gerador necessária para elevar a tensão de terminal do gerador e conseqüentemente a tensão local do sistema para 13,8 kV e a potência reativa fornecida nessa condição de operação;



Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

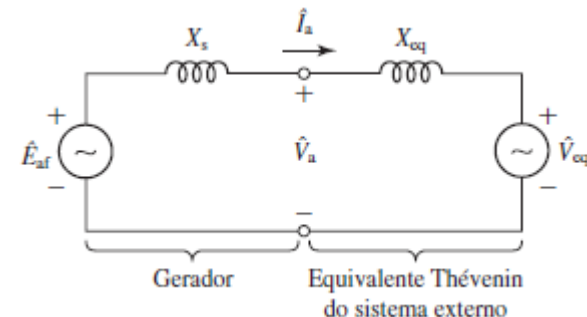
Exercício 15

Considere um condensador síncrono conectado a um sistema de potência que pode ser representado conforme abaixo. O condensador tem especificações nominais de 75 MVA e 13,8 kV com uma reatância síncrona de 0,95 p.u. e CCAV=830 A. Se a tensão equivalente do sistema for 13,75 kV e $X_{eq}=0,02$ p.u. tomando como base o gerador, calcule a corrente de campo do gerador necessária para elevar a tensão de terminal do gerador e conseqüentemente a tensão local do sistema para 13,8 kV e a potência reativa fornecida nessa condição de operação;

$$V_{eq} = \frac{13,75}{13,8} = 0,9964 \text{ p.u.}$$

Como não há circulação de potência ativa as tensões de terminal e induzida estão em fase

$$\hat{I}_{\tilde{a}} = \frac{(V_a - V_{eq})}{jX_{eq}} = \frac{1,0 - 0,9964}{j0,02} = -j0,18$$



Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Exercício 15

Considere um condensador síncrono conectado a um sistema de potência que pode ser representado conforme abaixo. O condensador tem especificações nominais de 75 MVA e 13,8 kV com uma reatância síncrona de 0,95 p.u. e CCAV=830 A. Se a tensão equivalente do sistema for 13,75 kV e $X_{eq}=0,02$ p.u. tomando como base o gerador, calcule a corrente de campo do gerador necessária para elevar a tensão de terminal do gerador e consequentemente a tensão local do sistema para 13,8 kV e a potência reativa fornecida nessa condição de operação;

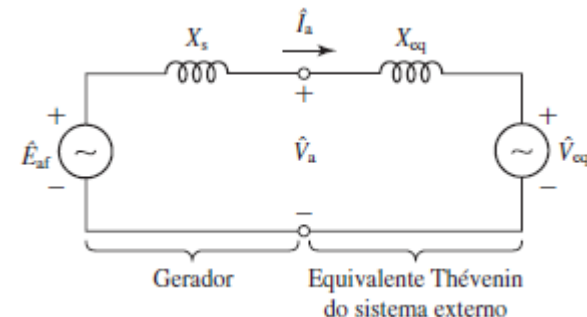
Como não há circulação de potência ativa as tensões de terminal e induzida estão em fase

$$\hat{I}_a = \frac{(V_a - V_{eq})}{jX_{eq}} = \frac{1,0 - 0,9964}{j0,02} = -j0,18$$

$$\hat{E}_{af} = V_a + jX_s \hat{I}_a = 1 + j0,95 \cdot (-0,18j)$$

$$\hat{E}_{af} = 1 + 0,171 = 1,171 \text{ p.u.}$$

$$I_f = 830 \cdot 1,171 = 972 \text{ A}$$



Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

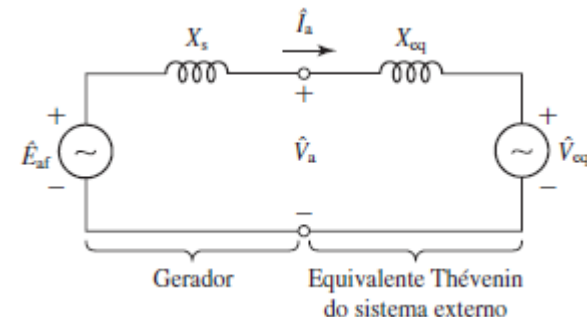
Exercício 15

Considere um condensador síncrono conectado a um sistema de potência que pode ser representado conforme abaixo. O condensador tem especificações nominais de 75 MVA e 13,8 kV com uma reatância síncrona de 0,95 p.u. e CCAV=830 A. Se a tensão equivalente do sistema for 13,75 kV e $X_{eq}=0,02$ p.u. tomando como base o gerador, calcule a corrente de campo do gerador necessária para elevar a tensão de terminal do gerador e consequentemente a tensão local do sistema para 13,8 kV e a potência reativa fornecida nessa condição de operação;

$$\hat{I}_a = -j0,18$$

$$Q = \text{Im}[1,0 \cdot (0,181j)] = 0,181 \text{ p.u.}$$

$$Q = 0,181 \cdot 75 = 13,6 \text{ MVA}$$



Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Avaliação L

Um gerador síncrono tem especificações nominais de 380 V, 500 kVA, 0,8 de fator de potência (FP) indutivo, com resistência de armadura de 0,01 p.u., reatância síncrona de 1,5 p.u. e $CCAV = 40$ A. Sabendo que o fator de potência nominal do gerador é determinado pela intersecção das curvas-limites de aquecimento da armadura e do campo, calcule a corrente de campo máxima que pode ser fornecida ao gerador sem ultrapassar o limite de aquecimento do campo.

Avaliação M

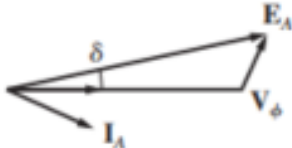
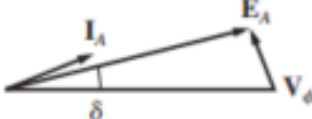
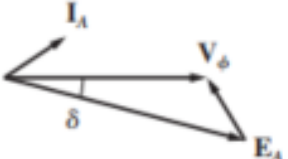
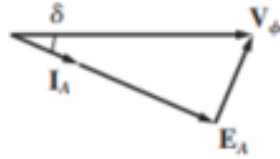
Plote a corrente de campo pela corrente de armadura do gerador síncrono com especificações nominais de 380 V, 500 kVA, com resistência de armadura de 0,01 p.u. e reatância síncrona de 1,5 p.u. e $CCAV = 40$ A, se ele estiver operando sua tensão de terminal nominal, potência ativa de 0,5 p.u. variando o fator de potência de 0,92 capacitivo a 0,92 indutivo.

Avaliação N

Repita a avaliação 3 para as potências de 0,6 p.u, 0,7 p.u, 0,8 p.u e 0.9 p.u. Plote as curvas V em um único gráfico.

RESUMO

■ Geradores e motores síncronos

	Fornecendo potência reativa Q $E_A \cos \delta > V_\phi$	Consumindo potência reativa Q $E_A \cos \delta < V_\phi$
Fornecendo potência P Gerador E_A adiantada V_ϕ		
Consumindo potência P Motor E_A atrasada V_ϕ		

Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.



FIM DO MÓDULO IV



Avaliação

A ser descrito pelo professor/instrutor na plataforma SIGAA/UFERSA