

Capítulo V
Máquinas Síncronas

5 MÁQUINAS SINCRONAS – Regime Permanente	205
5.1 CLASSIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS	205
5.1.1 CLASSIFICAÇÃO.....	205
5.1.2 Características gerais.....	205
5.1.3 Características a vazio	205
5.1.4 Características em curto-circuito	206
5.1.5 Relação de curto-circuito.....	207
5.1.6 Influência da frequência na característica em curto-circuito.....	209
5.2 MÁQUINA SÍNCRONA SOB CARGA	210
5.2.1 Reação da armadura em uma máquina síncrona monofásica	210
5.3. MÁQUINA SÍNCRONA DE PÓLOS SALIENTES - TEORIA DAS DUAS REAÇÕES OU TEORIA DE BLONDEL	214
5.4 Situações diferentes para cargas nos geradores síncronos de pólos salientes	219
5.5 Geradores e motores de pólos lisos.....	220
5.5.1 - Geradores	220
5.5.2 - Motores	221
5.6 Ensaio para determinação dos parâmetros X_d e X_q em uma máquina síncrona de pólos salientes	222
5.7 Torque desenvolvido por fase em uma máquina síncrona de pólos lisos	225
5.8 Potência desenvolvida por fase em uma máquina síncrona de pólos salientes ($R_a=0$).....	227
5.9 Potência sincronizante	229
5.10 Métodos de partida de motores síncronos	230
5.10.1 Partida através de um motor auxiliar.....	230
5.10.2 Partida através da variação da frequência	230
5.10.3 Partida assíncrona	230
5.11 Colocação de alternadores em paralelo.....	230
5.11.1 Introdução:	230
5.11.2 Condição para o estabelecimento do Paralelismo:	230
5.11.3 Métodos para colocação de Alternadores em Paralelo	231
5.11.3.1 Método do sincronoscópio (aparelho):	231
5.11.3.2 Método das lâmpadas:	232
EXERCÍCIOS PROPOSTOS	233

5 MÁQUINAS SINCRONAS – Regime Permanente

5.1 CLASSIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS

5.1.1 CLASSIFICAÇÃO

- a. Máquinas de pólos lisos - Fig.5.1.1a
- b. Máquinas de pólos salientes – Fig.5.1.1b

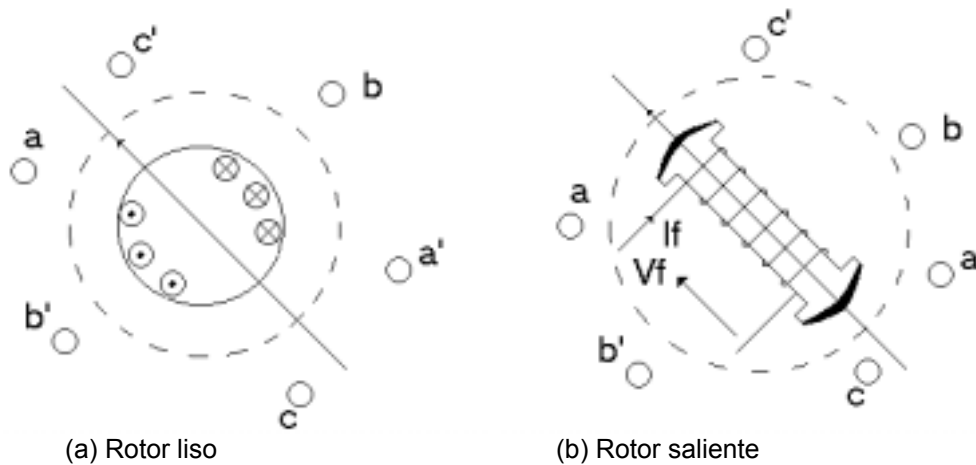


Fig. 5.1.1

5.1.2 Características gerais

- Como para máquinas de corrente contínua, o fluxo magnético é produzido por corrente contínua.

- Os polos de uma máquina síncrona (M.S.) é a parte girante (rotor) e a armadura forma a parte externa (estator).

- A relação entre rotação e frequência, bem como tensão gerada, podem ser vistas no cap. III, onde as tensões trifásicas geradas são dadas por:

$$\begin{aligned} E_a &= E_{\max} \cdot \text{sen}(Wt) \\ E_b &= E_{\max} \cdot \text{sen}(Wt - 120^\circ) \\ E_c &= E_{\max} \cdot \text{sen}(Wt + 120^\circ) \\ E_{\max} &= 2\pi \cdot f \cdot \phi \cdot N \\ n &= \frac{120}{p} \cdot f \end{aligned} \quad 1.1$$

5.1.3 Características a vazio

Denomina-se característica a vazio, a curva obtida pelo relacionamento em um plano cartesiano da fem gerada e a corrente de excitação (I_f), conforme Fig. 5.1.3.

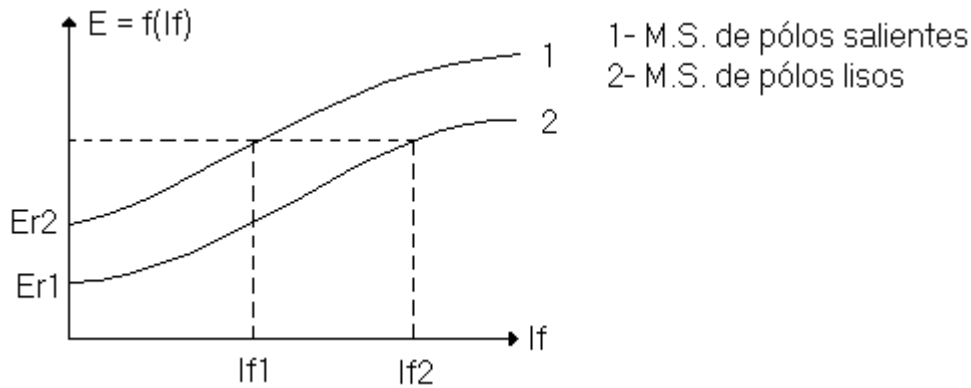


Fig. 5.1.3

Considerações:

- A velocidade nas máquinas de pólos lisos é maior que nas máquinas de pólos salientes, conseqüentemente por exigências mecânicas, o espaçamento entreferro é maior nas primeiras.
- A relutância nas máquinas de pólos lisos é maior que nas máquinas de pólos salientes.
- Para uma mesma fem gerada a corrente de excitação é maior para as máquinas de pólos lisos.
- A saturação nas M.S. se manifesta mais acentuadamente nas máquinas de pólos salientes.
- A parte retilínea caracteriza a linha do entreferro (ar), daí a proporcionalidade entre fem e corrente.
- Durante o ensaio da curva característica, a velocidade deverá ser mantida constante e igual a nominal, caso contrário a fem deverá sofrer correção (com I_f cte).

$$E_d = E_2 \cdot \frac{n_{2N}}{n_2}$$

n_{2N} – velocidade síncrona do rotor

n_2 – velocidade de ensaio do rotor

E_d – fem para n_{2N}

E_2 – fem para n_2

5.1.4 Características em curto-circuito

Denomina-se característica em curto-circuito a curva correspondente à representação $I_{cc} = f(I_f)$.

Para a realização deste ensaio, estabelece-se um curto-circuito nos terminais do estator e, aumenta-se gradativamente o valor da corrente de excitação. É fácil imaginar que estando a máquina curto-circuitada, uma pequena fem induzida poderia originar uma grande corrente. Assim sendo, o ensaio iniciado com $I_f = 0$ e, aumentando-se lentamente o seu valor até que a corrente no estator assuma valores permissíveis pela máquina. A Fig. 5.1.4 mostra esta curva.

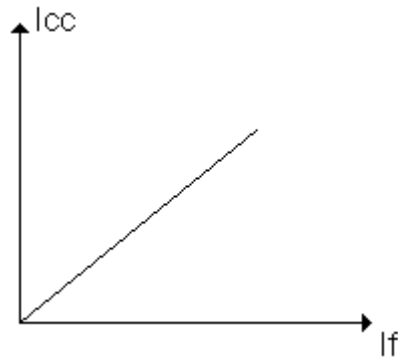


Fig. 5.1.4

Superpondo-se as curvas das figuras 5.1.3 e 5.1.4, obtém-se a curva da impedância síncrona da máquina, conforme Fig. 5.1.5.

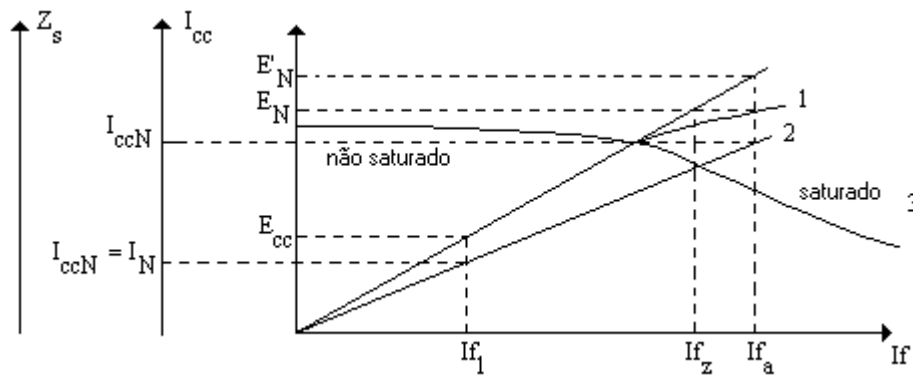


Fig. 5.1.5

- 1- curva a vazio
- 2- curva de curto-circuito
- 3- impedância síncrona

I_{f1} – Corrente de excitação que produz a corrente nominal, estando os terminais do gerador em curto-circuito.

I_{fa} – Corrente de excitação que produz a tensão nominal a vazio.

I_{ccN} - Corrente na armadura, estando a mesma curto-circuitada, quando no seu campo circular $I_{fa} = I_{fN}$.

OBS: Deve-se ressaltar que a característica $I_{cc} = f (I_f)$, é normalmente construída por fase do alternador.

5.1.5 Relação de curto-circuito

A relação de curto-circuito é definida como sendo:

$$r = \frac{I_{fa}}{I_{f1}} \quad 1.1$$

Deprezoando-se o efeito da saturação, tem-se que $E'_N = E_N$ e, a relação de curto-circuito torna-se:

$$r = \frac{I_{fa}}{I_{fl}} = \frac{E_N}{E_{cc}} = \frac{1}{\frac{E_{cc}}{E_N}} \quad e,$$

$E_{cc} = Z_S \cdot I_N$ (M.S. curto-circuitada), então:

$$r = \frac{1}{\frac{Z_S \cdot I_N}{E_N}} = \frac{1}{\frac{Z_S}{\left(\frac{E_N}{I_N}\right)} \rightarrow Z_{Base}}$$

$$r = \frac{1}{Z_{Spu}} \quad 1.2$$

Z_S – impedância síncrona da máquina (valor não saturado).

Conclusões:

a. Para a máquina síncrona não saturada a relação de curto-circuito expressa em p.u. o inverso da impedância da máquina.

b. Quando da consideração do efeito da saturação, este valor de “r” deverá ser multiplicado pela relação das correntes de excitação I_{fa}/I_{fz} , obtida da característica a vazio, para a tensão nominal sobre as características a vazio saturada e não saturada.

c. Máquinas síncronas com baixos valores para r podem apresentar grandes flutuações de tensão com variações de carga.

d. Máquinas síncronas com baixo r possuem uma menor corrente de curto-circuito.

e. O custo das máquinas com altas impedâncias são menores.

f. Embora os custos sejam mais elevados para máquinas com baixas impedâncias, prefere-se comumente a utilização destas em detrimento das máquinas com baixo r.

g. A impedância síncrona é composta de:

$$Z_s = R_a + jX_s$$

R_a - Resistência por fase do circuito da armadura.

$$X_s = X_a + X_{ra}$$

X_a - Reatância própria do circuito da armadura.

X_{ra} - Reatância devido ao efeito da reação da armadura (sujeito à saturação).

5.1.6 Influência da frequência na característica em curto-circuito.

Em qualquer máquina, cada fase do alternador pode ser encarada como um enrolamento no qual é induzida uma fem "E". internas, as quais podem ser representadas por uma impedância Z_s . À fig.1.6 apresenta o circuito equivalente simplificado, onde, V é a tensão terminal:

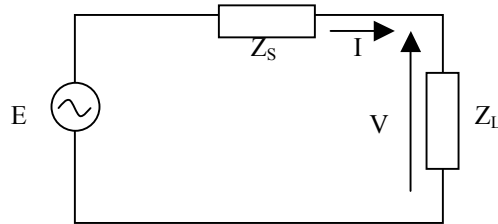


Fig.1.6

Do circuito da fig.1.6, tem-se:

$$E = V + Z_s \cdot I \quad 1.6.1$$

Na condição de curto-circuito, tem-se:

$$\begin{aligned} V &= 0 \\ E &= E_{cc} \\ I &= I_{cc} \end{aligned}$$

Desse modo,

$$E_{cc} = Z_s \cdot I_{cc} \quad 1.6.2$$

Sabe-se que $Z_s = R_a + j X_s$, porém, os alternadores normalmente, possuem $X_s \gg R_a$, assim:

$$Z_s \approx j X_s$$

Substituindo-se $Z_s \approx j X_s$ em 1.6.2, tem-se:

$$|E_{cc}| = X_s \cdot |I_{cc}| = 2 \pi \cdot f \cdot L_s \cdot |I_{cc}| \quad 1.6.3$$

Sabe-se que a fem gerada eficaz é dada por:

$$|E_{cc}| = 4,44 \cdot N \cdot \phi \cdot f \quad 1.6.4$$

Substituindo-se 1.6.4 em 1.6.3 e lembrando-se da proporcionalidade existente entre fluxo e corrente, conforme fig.1.4, tem-se:

$$4,44 N \cdot \phi \cdot f = 2 \pi \cdot f \cdot L_s \cdot |I_{cc}|$$

$$|I_{cc}| = A_1 \cdot \phi$$

A_1 - cte que relaciona I_{cc} e ϕ .

De onde conclui-se que dentro de certos limites, a corrente independe da frequência.

A independência entre a corrente de curto e a velocidade é mostrada na fig.1.6.I. Observa-se que para pequenas velocidades existe uma dependência entre I_{cc} e a rotação da máquina. A justificativa prende-se no fato que para baixas frequências a resistência R_a é apreciável.

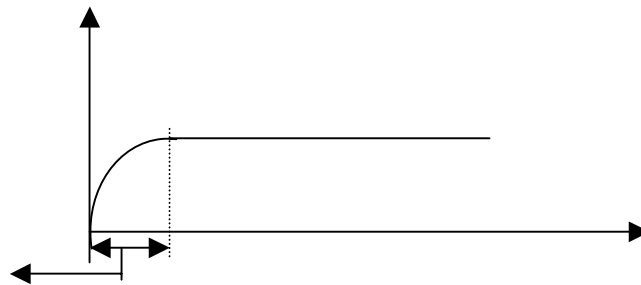


Fig.1.6.1

5.2 MÁQUINA SÍNCRONA SOB CARGA

5.2.1 Reação da armadura em uma máquina síncrona monofásica.

Entende-se por reação da armadura, o efeito magnético das correntes da armadura ou estator na excitação efetiva da máquina. A fmm de reação da armadura para uma máquina monofásica é indicada na fig. 2.1.

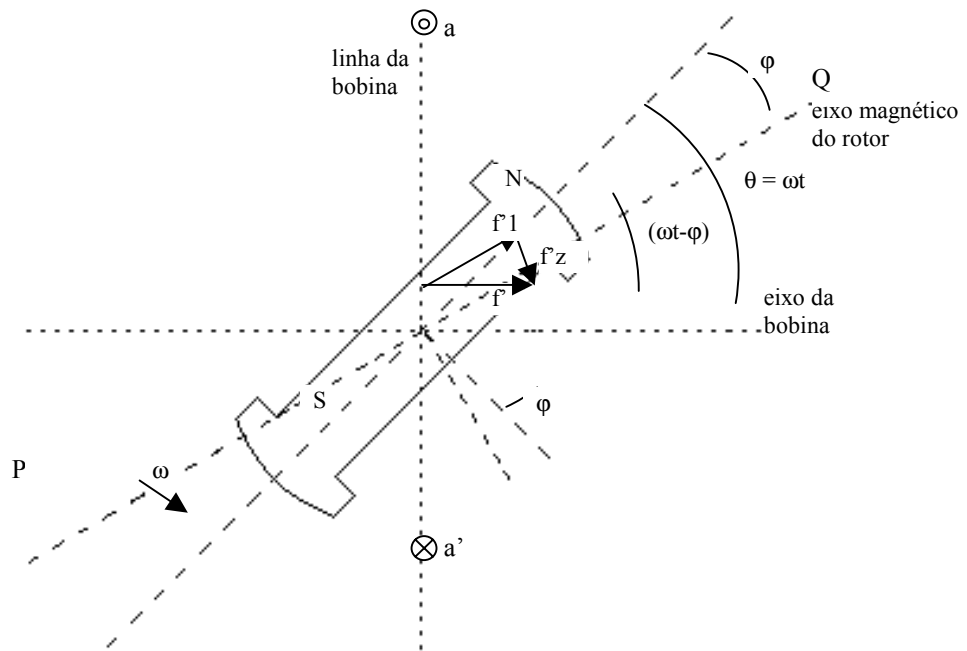


Fig.2.1

Conforme ϵ

$$e = E_{\max} \cdot \text{sen}(\omega t)$$

A bobina sendo conectada a um circuito externo, ocasionará uma corrente dada por:

$$i = I_{\max} \cdot \text{sen}(\omega t - \phi)$$

2.1

onde, φ é o ângulo de fase interno, que leva em consideração as impedâncias internas e externa à máquina síncrona.

Nota-se que a fem atingirá seu máximo quando $\theta = \pi/2$, ou seja, quando o eixo magnético coincidir com a linha da bobina.

Para uma corrente indutiva, a linha p-q, deslocada de um ângulo φ do eixo magnético, será coincidente com a linha da bobina quando $i = I_{\max}$.

A corrente i resultará em uma fmm ao longo do eixo da bobina. Esta fmm será também senoidal ($f_{mm} = Ni$) e, dada por:

$$f_{mm} = F_{\max} \cdot \text{sen}(\omega t - \varphi) \quad 2.2$$

onde,

$$F_{\max} = N \cdot I_{\max} \quad 2.3$$

Se a fmm for decomposta em $f'1$ e $f'2$, conforme fig.2.1, tem-se:

$$f'1 = f_{mm} \cdot \cos(\theta - \varphi) = F_{\max} \cdot \text{sen}(\omega t - \varphi) \cdot \cos(\omega t - \varphi)$$

$$f'1 = 0,5 \cdot F_{\max} \cdot \text{sen}[2(\omega t - \varphi)] \quad 2.4$$

e,

$$f'2 = f_{mm} \cdot \text{sen}(\omega t - \varphi) = F_{\max} \cdot \text{sen}(\omega t - \varphi) \cdot \text{sen}(\omega t - \varphi)$$

$$f'2 = 0,5 \cdot F_{\max} \cdot \{1 - \cos[2(\omega t - \varphi)]\} \quad 2.5$$

O valor médio dos termos de frequência dupla ao longo de um ciclo elétrico completo, será nulo, logo:

$$F_{1M} = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} f'1 \cdot d\omega'1 = 0$$

$$F_{2m} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f'2 \cdot d\omega t = 0,5 F_{\max} = 0,5 N \cdot I_{\max} = F_z$$

Dos resultados acima conclui-se que o efeito magnético da corrente é de produzir uma fmm $f'z$ de valor médio 0, $0,5N \cdot I_{\max}$, agindo em quadratura com a linha pq.

Da geometria da fig.2.1, F_{2m} forma um ângulo com a linha normal ao eixo do rotor. É importante lembrar que φ é constante, pois depende da impedância do estator e da carga.

É conveniente separar F_z em duas outras componentes, conforme ilustrado na fig.2.2, onde:

$F_z \cos\varphi$ - Componente de eixo q, tentando a distorcer a fmm resultante.

$F_z \text{sen}\varphi$ - Componente de eixo d, tentando a alterar a magnitude do campo.

Se φ for capacitivo, haverá reforço da fmm do campo e, caso φ seja indutivo, o efeito será de desmagnetização, conforme fig.2.2.

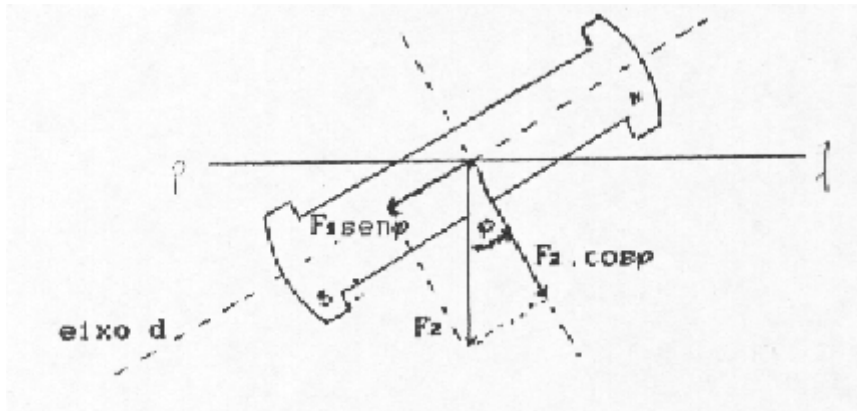


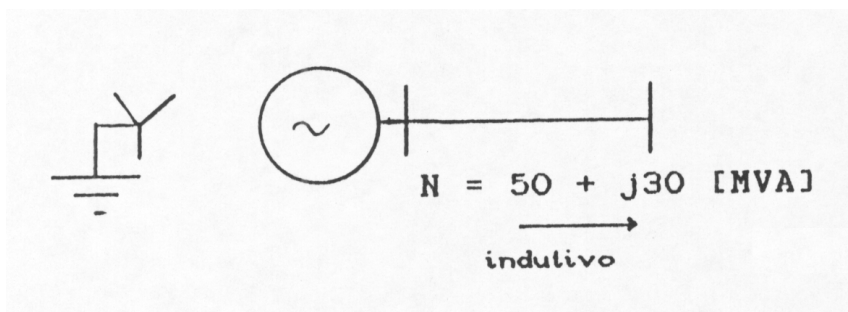
Fig. 2.2 Diagrama fasorial para a máquina síncrona de polos lisos, carga "RL".

Inicia-se o traçado a partir da tensão terminal e , admite-se que a corrente da armadura " i " esteja atrasada de um ângulo " φ_c ", onde φ_c é o ângulo de carga.

A soma das tensões: terminal (V), queda na resistência própria da bobina do estator ($R_a I$) e, a queda na reatância síncrona, fornece a tensão gerada. O exemplo que se segue mostra o diagrama fasorial desta máquina, operando como gerador.

Na condição à vazio $I = 0$ e, portanto, $F_z = 0$. Neste caso $F_r = F_f$ e o fluxo é aumentado, aproximando-se de F_f . A fem gerada é então a fem à vazio E que estará em quadratura com o fluxo. O ângulo medido " δ " entre a fem e a tensão terminal " V " é denominado ângulo de potência de máquina.

Exemplo 1:



Traçar o diagrama fasorial para a máquina síncrona nas seguintes condições:

Gerador

100 [MVA]
 13,8 [kV], 60 [Hz]
 $X_s = 0,2$ [Ohm/fase]
 $R_a = 0,02$ [Ohm/fase]

Solução:

Cálculo da corrente.

$$|I| = \frac{|N|}{\sqrt{3} \cdot V_n} = \frac{\sqrt{50^2 + 30^2} \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 13,8 \cdot 10^3} = 2439 [A]$$

$$\varphi_c = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{30}{50}\right) = 31^\circ$$

$$I = 2439 \angle -31^\circ [A]$$

Tensão entre fase e neutro.

$$V = \frac{13800}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ [V]$$

-Queda na resistência de armadura "Ra.I".

$$Ra.I = 0,02 \cdot 1439 \angle -31^\circ = 48,78 \angle -31^\circ [V]$$

- Queda na reatância síncrona "jXs.I".

$$jX_s.I = 0,2 \cdot 2439 \angle -31^\circ + 90^\circ$$

Portanto o diagrama fasorial fica:

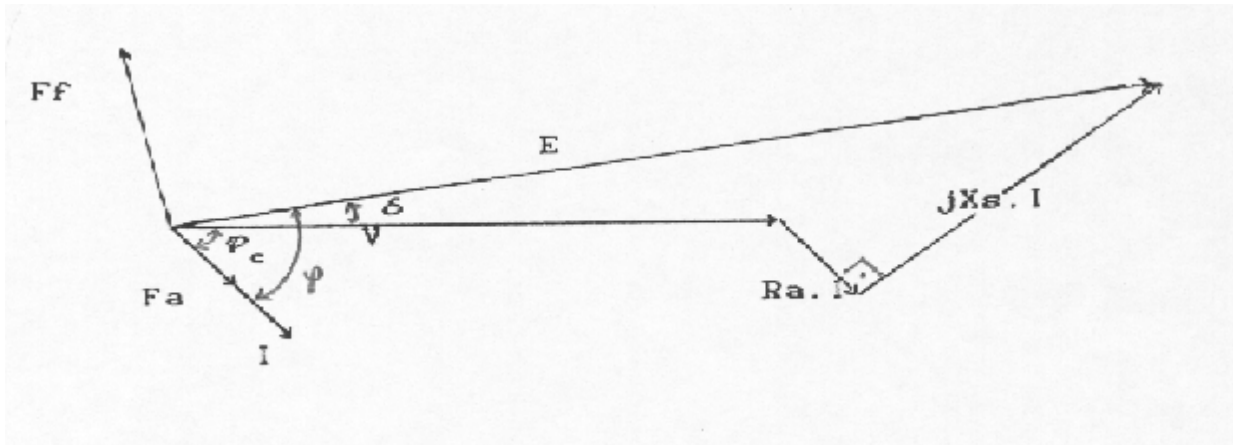
$$E = V + jX_s.I + Ra.I$$

$$E = 7968 + 48,78 \angle -31^\circ + 487,8 \angle -31^\circ + 90^\circ$$

$$E = 8270,39 \angle 2,72^\circ [V]$$

O ângulo de potência da máquina $\delta = 2,72^\circ$.

Diagrama fasorial.



5.3. MÁQUINA SÍNCRONA DE PÓLOS SALIENTES - TEORIA DAS DUAS REAÇÕES OU TEORIA DE BLONDEL.

Conforme mostrado anteriormente a fmm total pode ser dividida em duas componentes, a saber:

- uma componente ao longo do eixo polar ou eixo direto (eixo d).
- uma outra componente perpendicular a de eixo direto, ou seja, ao longo do eixo em quadratura (eixo q).

Na máquina de pólos salientes as relutâncias dos circuitos magnéticos destes eixos são substancialmente diferentes. A relutância do circuito magnético de eixo direto deve-se ao núcleo e dentes do estator, ao entre-ferro, ao pólo e ao núcleo do rotor. Isto corresponde aproximadamente a mesma situação magnética encontrada em máquinas de pólos lisos. Para o circuito magnético de eixo q, entretanto, a relutância é quase que totalmente concentrada no grande entre-ferro (espaço interpolar). Desta forma deve-se esperar que a relutância magnética do eixo d apresentará propriedades de saturação semelhantes àquelas para máquinas de pólos lisos. Já para o eixo q, os efeitos de saturação são menos significativos.

A idéia de usar as duas componentes de fmm agindo sobre circuitos de diferentes relutâncias deve-se a Blondel e, a teoria é denominada: "Teoria das duas reações"

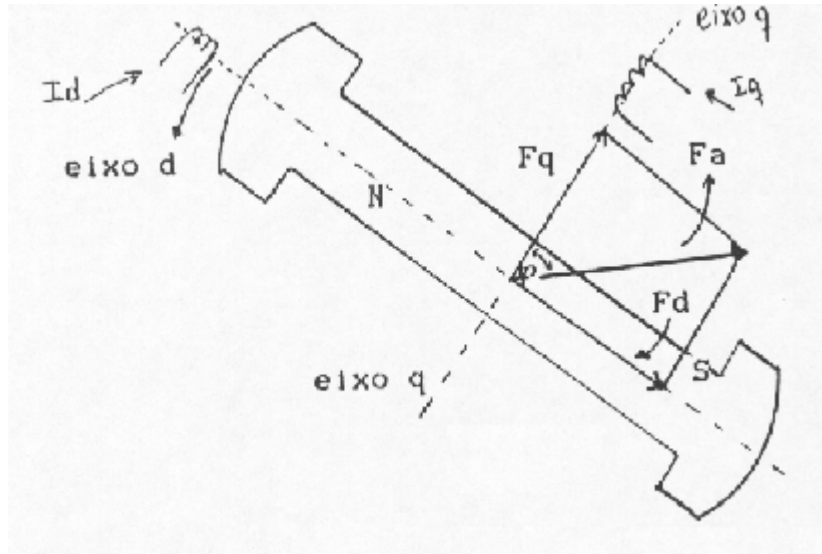


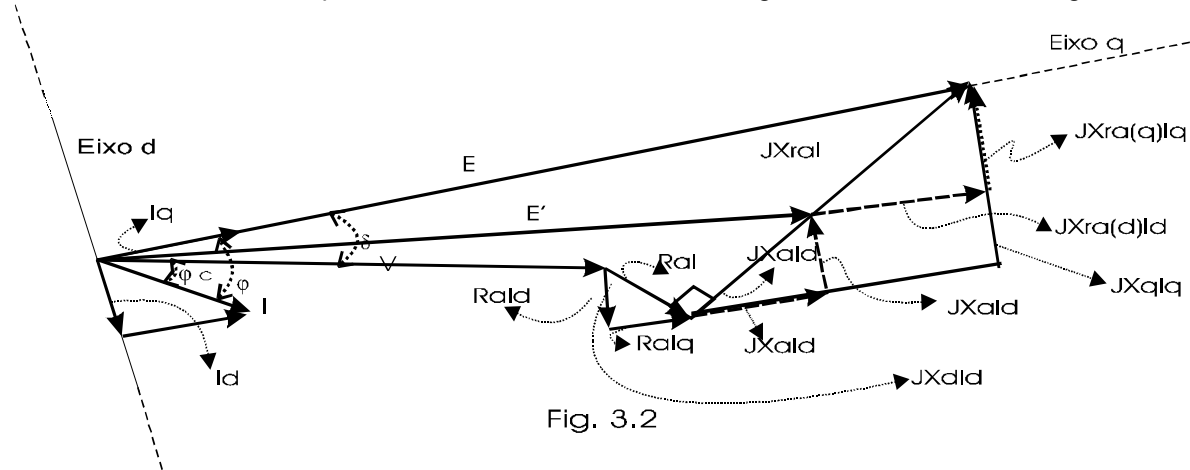
fig.3.1

Na fig.3.1, a decomposição de $F_a = F_z$ sobre os dois eixos, dá:

$$F_q = F_a \cdot \cos\phi$$

$$F_d = F_a \cdot \sin\phi$$

Tendo-se em vista que a fmm de reação da armadura "Fa" é produzida pela corrente da armadura "I", poder-se-ia associar as fmm de eixos d e q duas correntes, Id e Iq, que nada mais seria que as componentes de I sobre os eixos d e q, conforme ilustrado no diagrama fasorial da fig. 3.2.



A reatância X_a foi mantida a mesma quer para o eixo d como para o eixo q. A razão disto é a similaridade dos circuitos magnéticos de dispersão para as bobinas e eixo d e q. Já o efeito de reação da armadura possuirá circuitos de diferentes relutâncias e daí, a substituição de X_{ra} por $X_{ra}(d)$ e $X_{ra}(q)$, que são respectivamente responsáveis pelas componentes de reação da armadura de eixos d e q.

Conforme ilustrado no diagrama fasorial da fig.3.2, tem-se as seguintes reatâncias.

$$X_a + X_{ra}(d) = X_d \text{ - reatância síncrona de eixo direto}$$

$$X_a + X_{ra}(q) = X_q \text{ - reatância síncrona de eixo de quadratura.}$$

E para as correntes:

$$I = I_d + I_q$$

Assim sendo, com base no diagrama fasorial da fig. 3.2, pode-se escrever:

$$E = v + R_a \cdot I + jX_d \cdot I_d + jX_q \cdot I_q$$

De onde traça-se o diagrama fasorial da fig. 3.3.

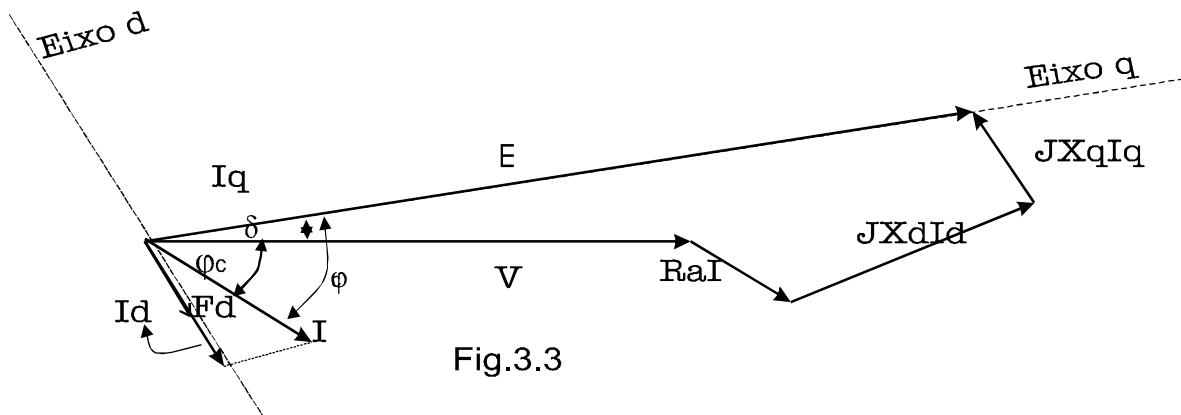


Fig.3.3

Para o traçado da fig.3.3 pressupõe-se o conhecimento do ângulo de potência δ , ou seja, a posição dos eixos d e q, pois há a necessidade da decomposição de I em I_d e I_q . Na prática conhece-se V , I e ϕ_c (pelo fluxo de potência), assim deve-se determinar δ , ou seja, a posição dos eixos d e q para a determinação de E . Para tal façamos:

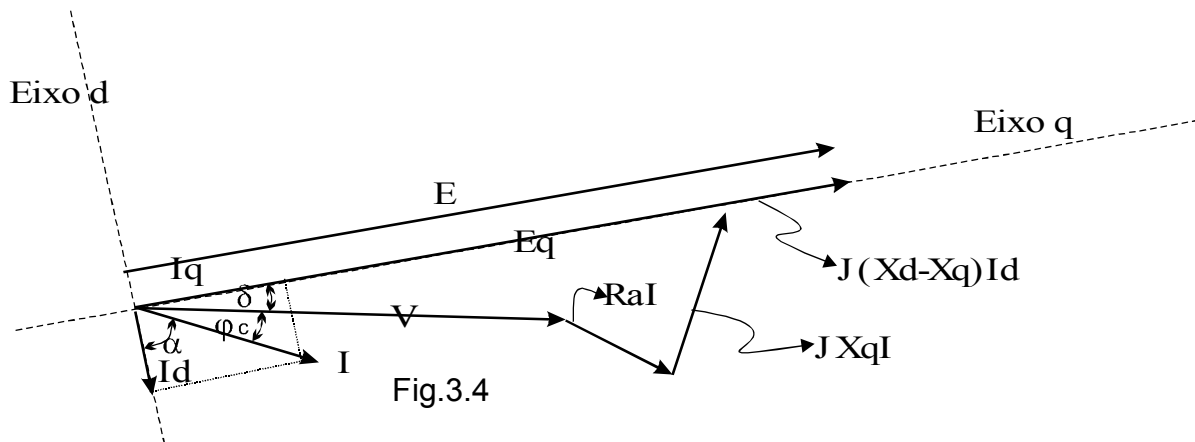
$$I_q = I - I_d$$

e,

$$E = V + R_a \cdot I + jX_q \cdot I = j(X_d - X_q) \cdot I_d \quad \text{ou ainda,}$$

$$E = E_q + j(X_d - X_q).I_d$$

O termo $j(X_d - X_q).I_d$ é perpendicular ao eixo d no sentido horário e, o termo $E_q = V + R_a.I + jX_q.I$ define o eixo q e, portanto, o eixo d. Assim:



$$|I_d| = |I| \cdot \cos[90 - (\varphi_c + \delta)]$$

$$|I_d| = |I| \cdot \text{sen}(\varphi_c + \delta)$$

Roteiro para o procedimento do traçado do diagrama fasorial de tensões da máquina síncrona de pólos salientes.

Através da análise do fluxo de carga, determina-se V , φ_c e I e, marca-se no papel.

Calcular os valores dos fasores $R_a.I$ e $jX_q.I$.

Ligar a origem de V ao ponto de $jX_q.I$, este será o fasor E_q , sem significado físico.

O eixo q é suporte do fasor E_q , então traça-se os eixos q e d.

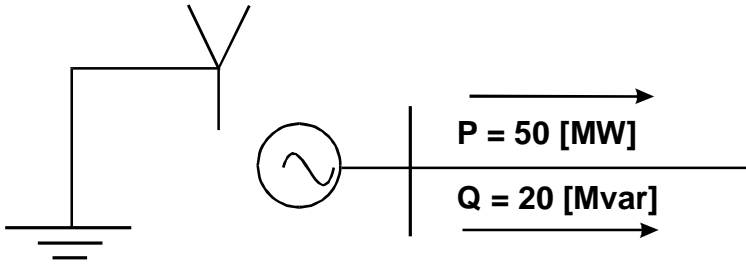
Localiza-se no diagrama os ângulos φ_c e δ . Calcula-se I_d . Para o diagrama anterior $|I_d| = |I| \cdot \text{sen}(\varphi_c + \delta)$.

Calcula-se a fem E de acordo com o diagrama e não algebricamente.

Nota: O fasor E_q possui a mesma direção que o termo $j(X_d - X_q).I_d$, portanto deve-se somar os módulos de E_q e $j(X_d - X_q).I_d$ para obtenção do fasor "E" que terá o mesmo ângulo de E_q .

Exemplo 2

Traçar o diagrama fasorial para a máquina abaixo.



$X_d = 1,0 \text{ pu}$
 $X_q = 0,5 \text{ pu}$
 $R_a = 0,1 \text{ pu}$
 100 [MVA]
 $13,8 \text{ [KV]}, 60 \text{ [Hz]}$

Solução:

Valores de base

$$V_B = 13800 \text{ [V]}$$

$$N_B = 100 \text{ [MVA]}$$

Valores pu.

$$N_{pu} = 0,5 + j0,2$$

$$V_{pu} = 1 \mid 0^\circ \quad - \quad \text{Tensão terminal.}$$

$$I_{pu} = \frac{[N_{pu}]}{[V_{pu}]} = 0,5 - j0,2 = 0,54 \mid -21,8^\circ$$

Quedas de tensão.

$$R_a \cdot I = 0,1 \cdot 0,54 \mid -21,8^\circ = 0,054 \mid -21,8 \text{ pu}$$

$$jX_q \cdot I = 0,5 \cdot 0,54 \mid -21,8^\circ + 90^\circ = 0,27 \mid -21,8^\circ + 0,27 \mid -21,8^\circ + 90^\circ \text{ pu}$$

Logo:

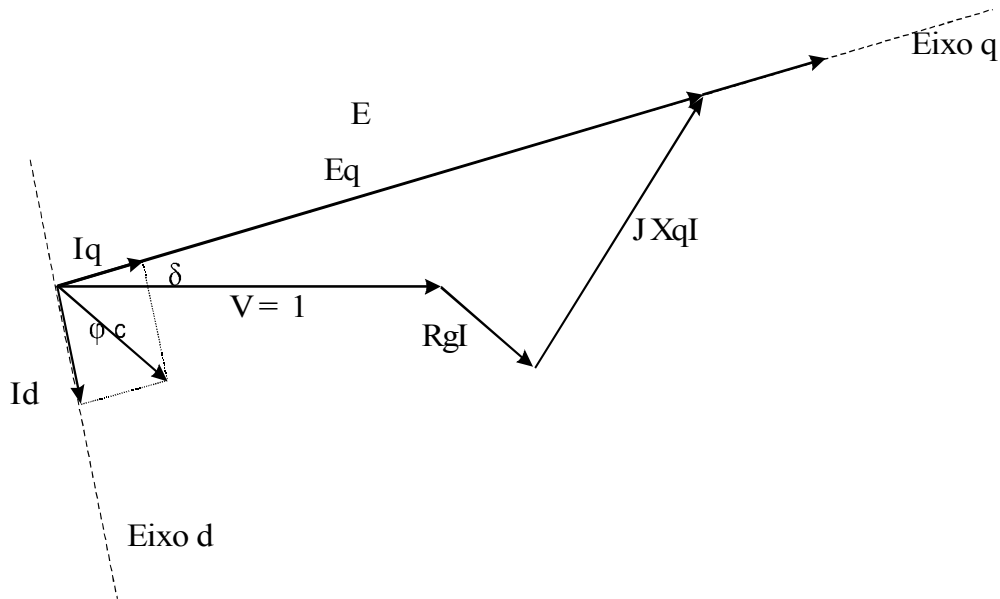
$$E_q = V + (R_a + jX_q) \cdot I = 1 + 0,054 \mid -21,8^\circ + 0,27 \mid 68,2^\circ$$

$$E_q = 1,173 \mid 11,4^\circ \text{ pu}$$

$$\delta = 11,4^\circ$$

Calculo de I_d .

Traça-se até aqui o gráfico dos fasores.



$$| I_d | = | I | \cdot \cos[90^\circ - (\varphi_c + \delta)] = | I | \cdot \sin(\varphi_c + \delta)$$

$$| I_d | = 0,54 \sin (11,4^\circ + 21,8^\circ) = 0,296 \text{ pu}$$

- Calculo de $(x_d - x_q)|I_d|$
 $(x_d - x_q)|I_d| = (1,0 - 0,5) \cdot 0,296 = 0,148 \text{ pu}$

- Calculo de E_{pu} .
 $E_{pu} = [|E_q| + (x_d - x_q) \cdot |I_d|] \square$
 $E_{pu} = [1,173 + 0,148] 11,4 \square$
 $E_{pu} = 1,321 11,4 \square$

- Por fase e em valor real, tem - se :

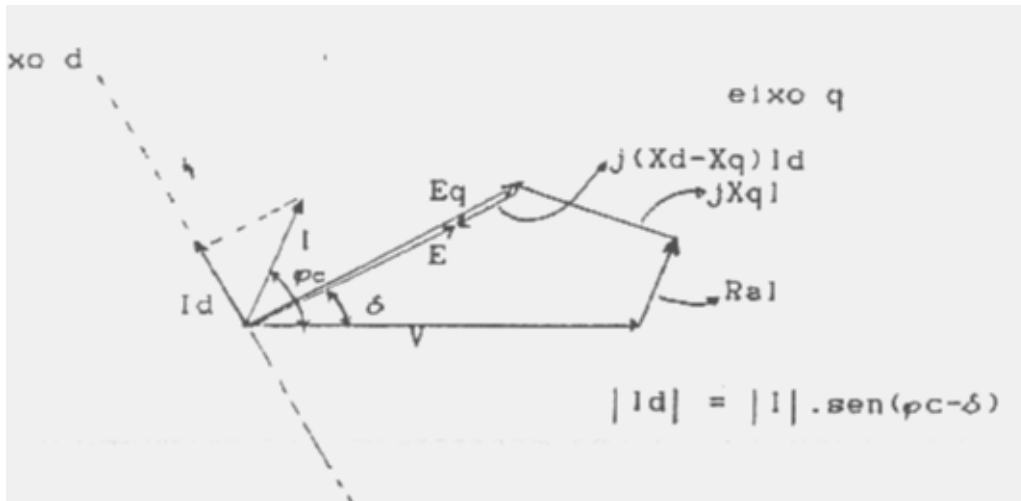
$$E = 1,321 \cdot 11,4 \square \cdot 1380 \cdot (3)^{-1/2}$$

$$E = 10,525 11,4 \square$$

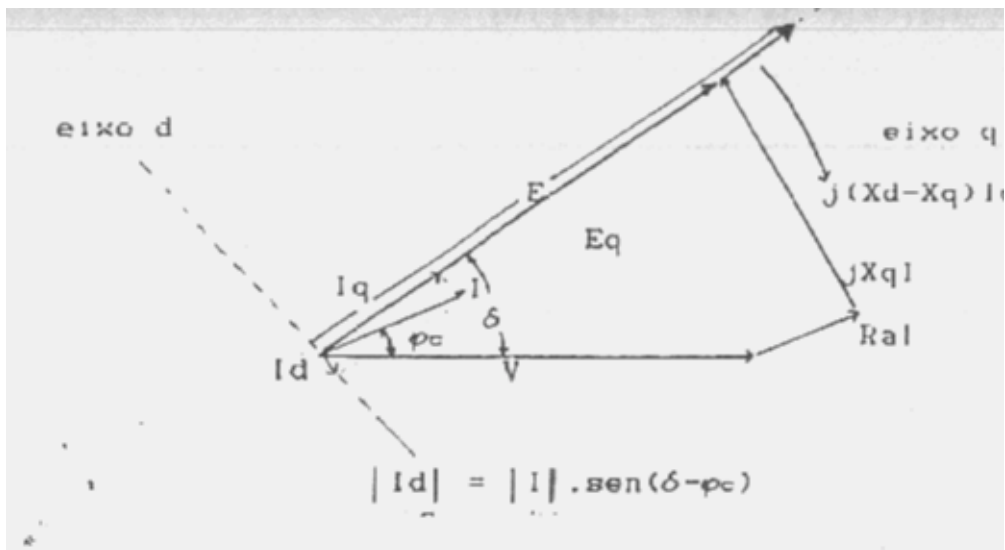
5.4 Situações diferentes para cargas nos geradores síncronos de pólos salientes.

- a) carga indutiva (ver Exemplo 2)
- b) Carga capacitiva I
- c) Carga capacitiva II

b) Carga Capacitiva I - ($\square_c > \square$)



c) Carga capacitiva II - ($\varphi_c < 0$)

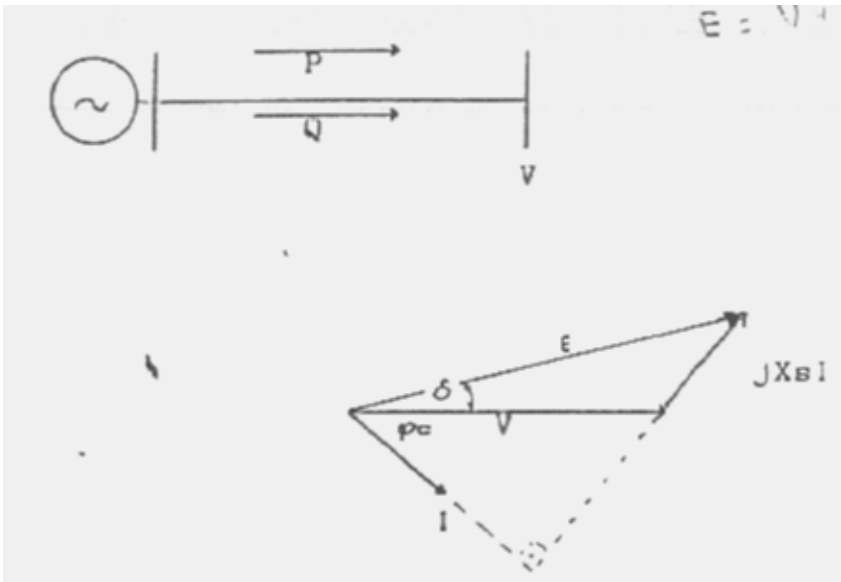


5.5 Geradores e motores de pólos lisos.

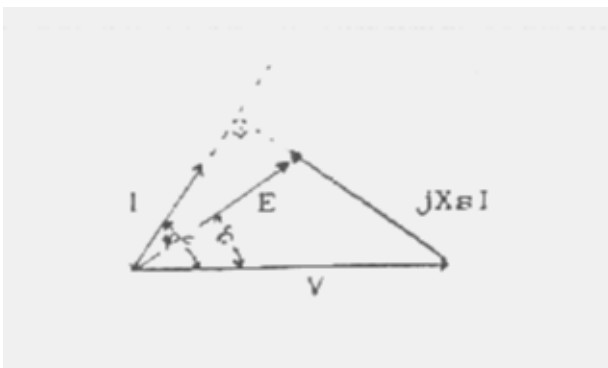
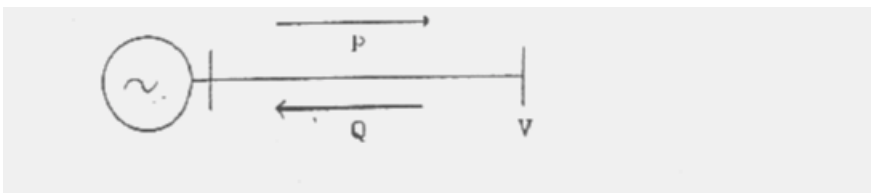
5.5.1 - Geradores

a) Fornecendo reativo (indutivo)

$$X_d = X_q = X_s \quad \text{supor } R_a = 0$$

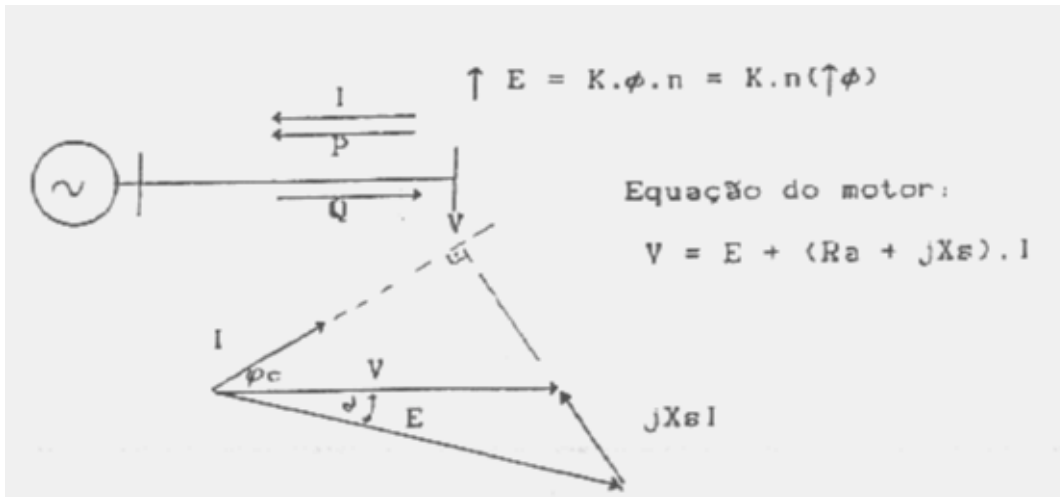


b) Recebendo reativo (carga capacitiva)

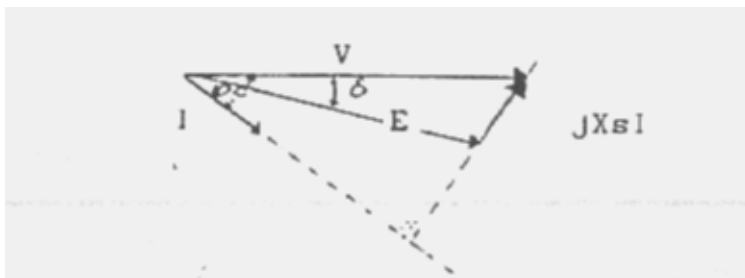
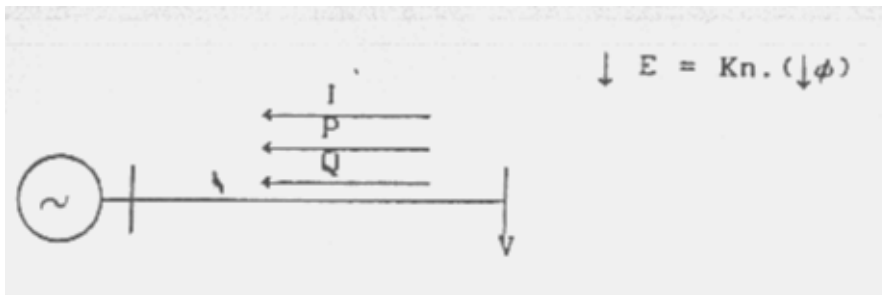


5.5.2 - Motores

a) Fornecendo reativo (motor sobre excitado)



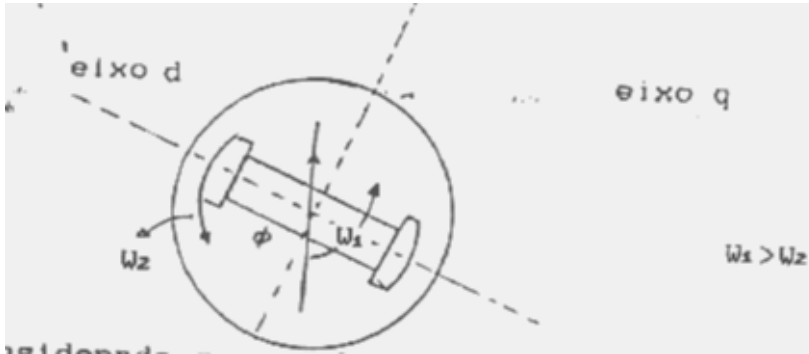
b) Recebendo reativo (motor sub-excitado)



5.6 Ensaio para determinação dos parâmetros X_d e X_q em uma máquina síncrona de pólos salientes .

Procedimento

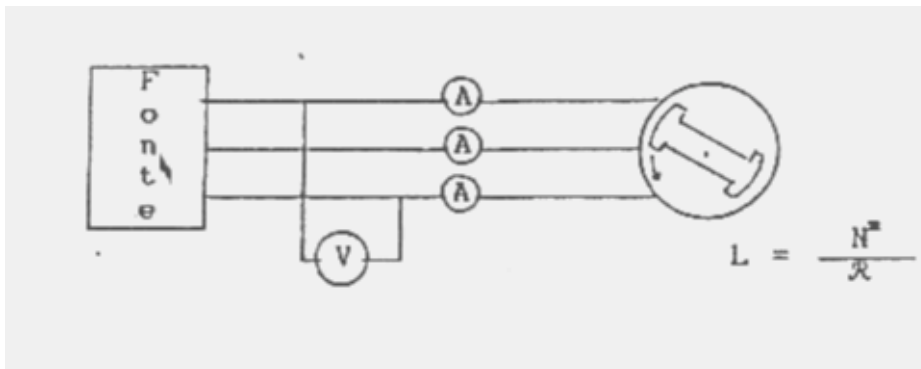
Alimenta-se o estator da M.S. através de tensão trifásica equilibrada e reduzida. O campo do rotor deverá estar desenergizado. Através de uma máquina primária (motor c.c.) movimenta-se o rotor para uma velocidade bem perto da velocidade síncrona, conforme figura 6.1



Considerando-se o referencial como sendo a velocidade do rotor e analisando-se o comportamento da velocidade reativa, enxerga-se o vetor campo girante cruzar os eixos direto e em quadratura de maneira lenta. Dessa forma, os parâmetros X_d e X_q podem ser calculados da seguinte forma.

Supondo que a máquina esteja ligada em Y, têm-se:

A figura 6.2 mostra o esquema da ligação para o ensaio, sendo que, os instrumentos deverão ser de preferência analógicos.



As impedâncias podem ser calculadas por :

$$Z_d = V_{\max} \cdot [(3)^{1/2} \cdot I_{\min}]^{-1} \quad \text{---- relutância menor}$$

$$Z_q = V_{\min} \cdot [(3)^{1/2} \cdot I_{\max}]^{-1} \quad \text{---- relutância maior}$$

O valor de R_a é obtido por medição direta, logo as reatâncias X_d e X_q serão:

$$X_d = (Z_d^2 - R_a^2)^{1/2}$$

$$X_q = (Z_q^2 - R_a^2)^{1/2}$$

Obs. Este ensaio é também chamado de ensaio de escorregamento, que determina os parâmetros X_d e X_q de uma máquina síncrona de polos salientes.

Exemplo 3

Um alternador trifásico apresenta $X_d=1,0$ pu e $X_q=0,65$ pu por fase. Admitindo-se que o alternador esteja fornecendo 2/3 de sua potência, à tensão nominal e $\text{fp}=0,8$ capacitivo, determine :

- a) O ângulo de potência.
 B) Se a máquina for desconectada da carga e, se for mantida a mesma corrente de excitação, para quanto irá a tensão terminal da máquina ?

Solução :

supor $R_a = 0$

a. $\delta = ?$

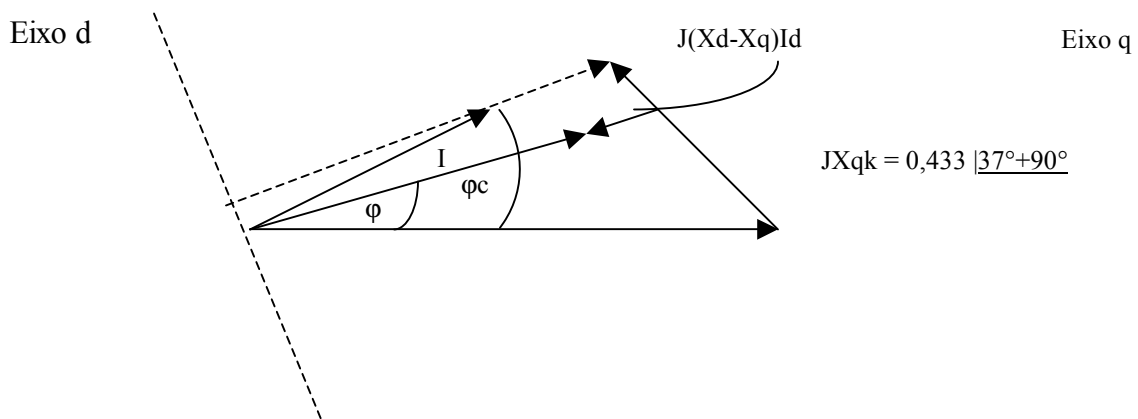
- Potência

$$N = (2/3) \cdot (0,8 - j0,6) = (2/3) \cdot -37^\circ \text{ pu}$$

- Corrente

$$I = (N / V)^* = (2/3) \cdot 37^\circ$$

Diagrama fasorial



$$E_q = 1 + 0,433 \cdot |37^\circ + 90^\circ$$

$$E_q = 0,816 \cdot |25,1^\circ \text{ pu}$$

Portanto δ será igual a $25,1^\circ$

b. A tensão terminal será a tensão gerada sob carga.

$$E = [E_q - (1X_d - X_d) | I |] |25,1^\circ$$

Pelo gráfico: $|I_d| = |I| \cdot \text{Sen}(\phi_c - \delta)$

$$|I_d| = 2/3 \cdot \text{sen}(37^\circ - 25,1^\circ)$$

$$|I_d| = 0,137 \text{ ppu}$$

$$E = [0,816 - (1 - 0,65) \cdot 0,137] |25,1^\circ$$

$$E = 0,768 \cdot |25,1^\circ \text{ pu}$$

Conclusão: A tensão terminal quando em carga é maior que a tensão a vazio.

5.7 Torque desenvolvido por fase em uma máquina síncrona de pólos lisos.

Seja uma M. S. operando como motor. A potência solicitada ao barramento pela armadura e por fase é:

$$P_f = V_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi_c \quad 7.1$$

Por outro lado, a potência desenvolvida pela armadura do motor síncrono por fase será expressa pelos produtos de sua f.c.e.m. gerada por fase, corrente de armadura por fase e pelo cosseno do ângulo entre tensão e corrente.

$$P_f = |E_{cf}| \cdot |I_f| \cdot \cos \varphi \quad 7.2$$

Sabe-se que a potência e torque se relacionam por:

$$T_{df} = (60/2\pi n_z) \cdot P_{df} \quad 7.3$$

Substituindo-se 7.2 em 7.3, obtém-se:

$$T_{df} = (60/2\pi n_z) \cdot |E_{cf}| \cdot |I_f| \cdot \cos \varphi \quad 7.4$$

$$\text{Em uma M.S } n_z = n_1 = (120/p_1) \cdot f_1 \quad 7.5$$

7.5 em 7.4

$$\begin{aligned} T_{df} &= 60 / (2\pi \cdot 120 / p_1 \cdot f_1) \cdot |E_{cf}| \cdot |I_f| \cdot \cos \varphi \\ T_{df} &= p_1 / (4\pi \cdot f_1) \cdot |E_{cf}| \cdot |I_f| \cdot \cos \varphi \end{aligned} \quad 7.6$$

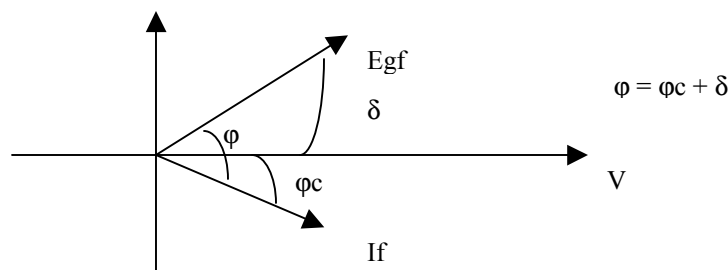
A equação expressa o torque desenvolvido por fase em um motor síncrono. Se a máquina estiver operando como gerador a equação 7.6 continua válida e, é chamada de torque elétrico.

$$T_{ef} = (p_1 / 4\pi \cdot f_1) \cdot |E_{gf}| \cdot |I_f| \cdot \cos \varphi \quad 7.7$$

Da equação 7.2 pode-se colocar φ em função de φ_c e δ .
 φ_c – ângulo entre tensão terminal e corrente

- ângulo de potência

Para a M.S. operando como gerador com fp indutivo, será:

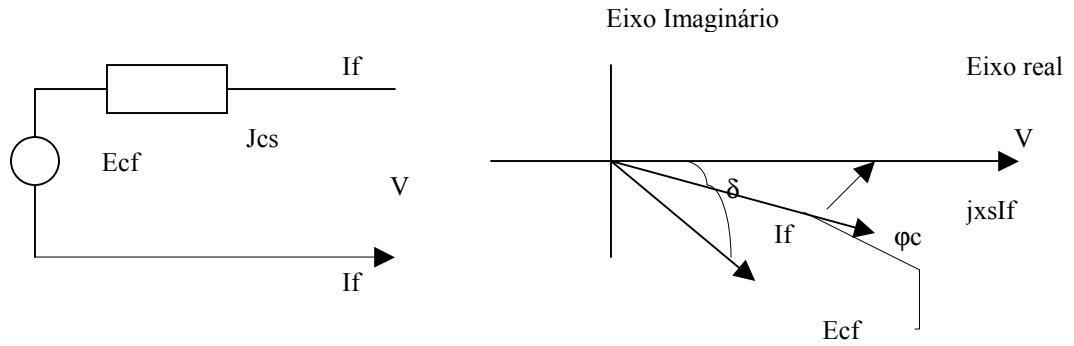


Substituindo-se $\varphi = \varphi_c + \delta$ em 7.2 e considerando-se que a M.S. opera como gerador, obtém-se:

$$\begin{aligned} P_{ef} &= |E_{gf}| \cdot |I_f| \cdot \cos(\varphi_c + \delta) \\ P_{ef} &= |E_{gf}| \cdot |I_f| \cdot \cos\varphi_c \cdot \cos\delta - |E_{gf}| \cdot |I_f| \cdot \sin\varphi_c \cdot \sin\delta \\ P_{ef} &= |E_{gf}| \cdot |I_f| \cdot [\cos\varphi_c \cdot \cos\delta - \sin\varphi_c \cdot \sin\delta] \end{aligned} \quad 7.8$$

Para a M.S. operando como motor e fp indutivo.

Do circuito equivalente e supondo $R_a = 0$, tira-se:



$$I_f = (V - E_{cf}) / jx_s \quad 7.9$$

$$V - E_{cf} = v - E_{cf} \cdot \cos\varphi + jE_{cf} \cdot \sin\varphi \quad 7.10$$

7.10 em 7.9 obtém-se:

$$I_f = |I_f| \cdot \cos\varphi / jx_s + j |E_{cf}| \cdot \sin\varphi / jx_s \quad 7.11$$

A corrente pode ser obtida fasorialmente por:

$$I_f = |I_f| \cdot \cos\varphi_c - j|I_f| \cdot \sin\varphi_c \quad 7.12$$

De maneira semelhante E_{cf} será:

$$E_{cf} = |E_{cf}| \cdot \cos\delta - j|E_{cf}| \cdot \sin\delta \quad 7.13$$

Sabe-se que do circuito equivalente tira-se:

$$E_{cf} = V - jI_f x_s \quad 7.14$$

Trabalhando-se com a questão 7.2 e lembrando-se que φ para as condições impostas vale $\varphi = \varphi_c - \delta$, obtém-se:

$$\begin{aligned} P_{df} &= E_{cf} \cdot I_f \cdot \cos(\varphi_c - \delta) \\ P_{df} &= E_{cf} \cdot I_f \cdot \cos\varphi_c \cdot \cos\delta + E_{cf} \cdot I_f \cdot \sin\varphi_c \cdot \sin\delta \\ P_{df} &= E_{cf} \cdot \cos\delta \cdot I_f \cdot \cos\varphi_c + E_{cf} \cdot \sin\delta \cdot I_f \cdot \sin\varphi_c \end{aligned} \quad 7.16$$

Comparando-se os termos reais e imaginários das equações 7.11 e 7.12, resulta:

$$P_{df} = |E_{cf}| |I_f| \cdot \sin\delta \cdot \cos\delta / x_s + |E_{cf}| \cdot \sin\delta \cdot (V - |E_{cf}| \cdot \cos\delta) / x_s$$

$$P_{df} = V \cdot |E_{cf}| \cdot \sin \delta / x_s$$

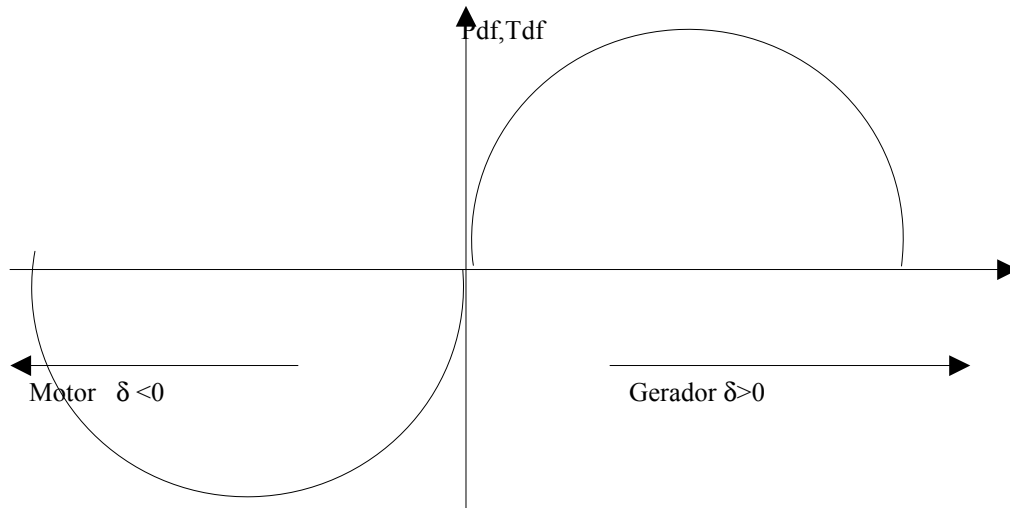
7.17

Consequentemente o torque sera:

$$T_{df} = (60/2\pi \cdot n_z) \cdot V \cdot |E_{cf}| \cdot \sin \delta / x_s$$

7.18

O gráfico que expressa a potência e torque desenvolvido em uma M.S. em função do ângulo de potência pode ser visto na fig.10.



5.8 Potência desenvolvida por fase em uma máquina síncrona de pólos salientes ($R_a=0$).

A potência de saída de um alternador de pólos salientes é dada pela componente de 1 pode ser também substituída pelas correspondentes componentes de I_d e I_q em fase com V . Assim:

$$P_{ef} = V \cdot |I_f| \cdot \cos \varphi_c = V \cdot (I_q \cdot \cos \varphi + I_d \cdot \sin \delta) \quad 8.1$$

Do diagrama da figura. 9, pode-se mostrar que:

$$I_f = |I_f| \cdot \cos \varphi - j |I_f| \cdot \sin \varphi_c$$

$$I_d \cdot x_d = E - V \cos \delta - R_a \cdot I_q \quad 8.2$$

e,

$$I_q \cdot x_q = V \sin \delta + I_d \cdot R_a \quad 8.3$$

Resolvendo-se as equações 8.2 e 8.3 com o propósito de se obter I_d e I_q , vem:

$$I_d = \frac{E x_q - V (x_q \cos \delta + R_a \sin \delta)}{z^2} \quad 8.4$$

e,

$$I_q = \frac{E R_a + V (x_d \sin \delta + R_a \sin \delta)}{z^2} \quad 8.5$$

Onde:

$$Z^2 = Ra^2 + x_d \cdot x_q$$

Se $Ra = 0$ então:

$$Z^2 = x_d \cdot x_q$$

$$I_d = (E - V \cos \delta) / x_d \quad 8.6$$

$$I_q = (V \sin \delta) / x_q \quad 8.7$$

Substituindo-se 8.6 e 8.7 em 8.1:

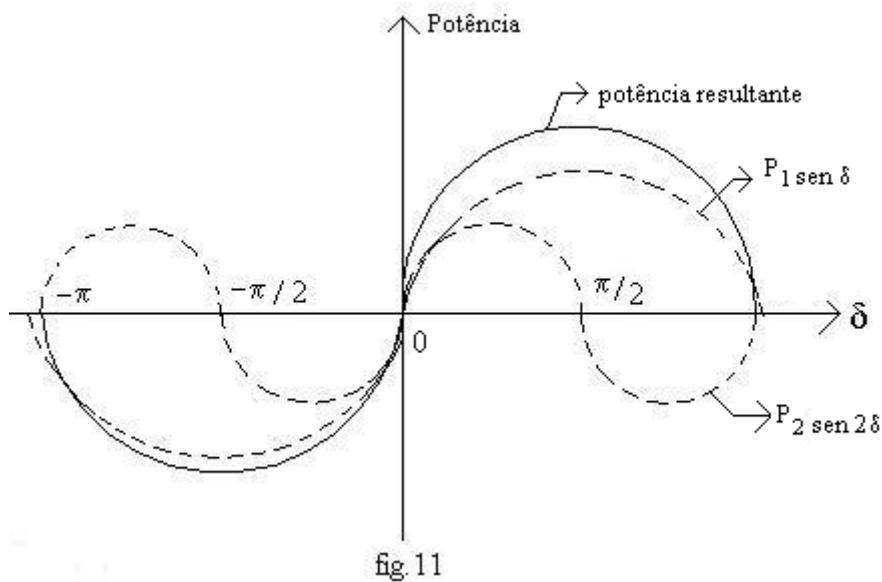
$$P_{ef} = V \left[\frac{E - V \cos \delta \cdot \sin \delta}{x_d} + \frac{V \sin \delta \cdot \cos \delta}{x_q} \right]$$

$$P_{ef} = \frac{V \cdot E}{x_d} \cdot \sin \delta - V^2 \cdot \frac{\cos \delta \cdot \sin \delta}{x_d} + V^2 \cdot \frac{\sin \delta \cdot \cos \delta}{x_q}$$

$$P_{ef} = \frac{V \cdot E \cdot \sin \delta}{x_d} + V^2 \cdot \cos \delta \cdot \sin \delta \left[\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right]$$

$$P_{ef} = \frac{V \cdot E}{x_d} \cdot \sin \delta + \frac{V^2}{2x_d \cdot x_q} \cdot (x_d - x_q) \cdot \sin 2\delta \quad 8.8$$

Comparando o resultado mostrado na equação 8.8 com aquele obtido para a máquina de pólos lisos (equação 7.17), observa-se que para o alternador de pólos salientes a existência de $x_d \neq x_q$ resulta em um termo de frequência dupla (2δ). Se $x_d = x_q$ a equação 8.8 dá o mesmo resultado da equação 7.17 para a máquina de pólos lisos. A fig. 11 mostra a característica de potência para uma máquina de pólos salientes.



$$P_1 = \frac{EV}{Xd}$$

$$P_2 = V^2 \frac{(Xd - Xq)}{2XdXq}$$

Na fig. 11 os coeficientes P_1 e P_2 , significam as amplitudes dos termos em $\text{sen} \delta$ e $\text{sen} 2\delta$, respectivamente.

Através da derivação da expressão 8.8 e identificando-se o resultado a zero, obtém-se o ponto para a máxima potência (ou valor de δ).

Tal potência máxima $P_{\text{ef,max}}$ será maior que P_1 e, ocorrerá para um ângulo de potência que poderá ser calculado através de:

$$\cos \delta = \frac{-P_1 \pm \sqrt{P_1^2 + 32P_2^2}}{8P_2}$$

A potência representada por $P_2 \text{sen} 2\delta$ é denominada "potência de relutância".

5.9 Potência sincronizante

A operação de uma máquina síncrona no que diz respeito com a taxa de variação de potência com o ângulo δ é um importante efeito desestabilizante para a máquina.

Considere um motor tendo uma potência de saída qualquer. Admitindo-se que devido a um distúrbio, por exemplo, um acréscimo de carga, o ângulo δ é aumentado de $\Delta\delta = d\delta$, então a correspondente variação da potência produzida pela máquina será:

$$\Delta P / \Delta\delta = dP / d\delta \quad 9.1$$

Para atender a carga adicionada, dP deve apresentar um aumento de potência, $d\delta$ é também positivo e então, para que o motor continue a operar $dP/d\delta$ deverá ser positivo.

A potência dP é a potência requerida pela carga adicional através do ângulo de potência δ . Esta potência é chamada "Potência Sincronizante (P_s)". A potência sincronizante dividida pela correspondente variação do ângulo de potência da origem ao denominado "Coeficiente Sincronizante", representado normalmente por P_r . Assim:

$$P_r = dP / d\delta \quad 9.2$$

O coeficiente sincronizante P_r é uma medida de quão forte é o acoplamento eletromagnético entre rotor e estator. Um alto valor de P_r indica que o acoplamento é forte ou rígido. Um acoplamento muito rígido poderia ser interpretado da seguinte forma:

" Se a máquina está operando numa dada situação de regime permanente e uma pequena variação do ângulo é acarretada por um distúrbio transitório qualquer, então a máquina será afastada de sua condição de regime permanente. Como decorrência deste efeito surgirá uma

potência de desequilíbrio dP que tenderá a retornar a máquina ao seu estado inicial. Quanto maior P_r maior terá sido esta potência sincronizante, para um mesmo valor de δ . Se o valor de P_r é elevado então o estado inicial será restaurado mais rapidamente, entretanto, as custas de rápidas e perigosas oscilações mecânicas que poderiam comprometer a estrutura da máquina". Pelo motivo relatado acima e por outras razões associadas com a operação transitória da máquina é usual construir-se as máquinas com um valor de P_r menos rígido que se usava fazer em tempos passados.

Analisando-se as expressões 9.3 e 9.4, verifica-se claramente os fatores que controlam o coeficiente de potência sincronizante.

Reatância da máquina, que quanto maior resultará em um menor P_r .

A f.cem E , que afeta de maneira proporcional. Em outras palavras, uma máquina sobre-excitada está mais rigidamente acoplada que uma sub-excitada.

5.10 Métodos de partida de motores síncronos.

Partida através de um motor auxiliar

Partida através da variação da frequência

Partida assíncrona

5.10.1 Partida através de um motor auxiliar.

O motor síncrono é conectado a um motor auxiliar (MIT), que o levará perto da velocidade síncrona. Neste momento desliga-se o motor auxiliar e liga-se o motor síncrono com campo energizado, estabelecendo assim o sincronismo.

5.10.2 Partida através da variação da frequência.

Neste caso a frequência da tensão aplicada ao motor é variada de zero ao valor nominal e, a velocidade do motor se mantém em sincronismo durante todo o período de partida.

5.10.3 Partida assíncrona

Um motor síncrono que possui uma gaiola de partida em seu rotor, pode ser acionado normalmente como MIT.

Este é o método mais comum empregado para partida de motores síncronos.

O enrolamento de campo é curto circuitado ou conectado a uma resistência da ordem de 10 vezes a resistência própria do enrolamento de campo.

Quando o rotor atingir a velocidade perto da síncrona é aplicado o campo. Neste momento o motor alcança facilmente a velocidade síncrona.

5.11 Colocação de alternadores em paralelo.

5.11.1 Introdução:

O estudo do Paralelismo de Geradores Síncronos e de suma importância para operação de usinas e subestações interligadas de qualquer sistema elétrico.

Vantagens:

A carga total pode ser dividida entre várias máquinas

Economia na construção e transporte

O uso de unidades de reserva é mais cômodo e econômico

Todos os alternadores podem operar a plena carga (condição de maior rendimento). Se a carga for reduzida, pode-se retirar alguma(s) unidade(s)

O sistema trabalha com alta confiabilidade

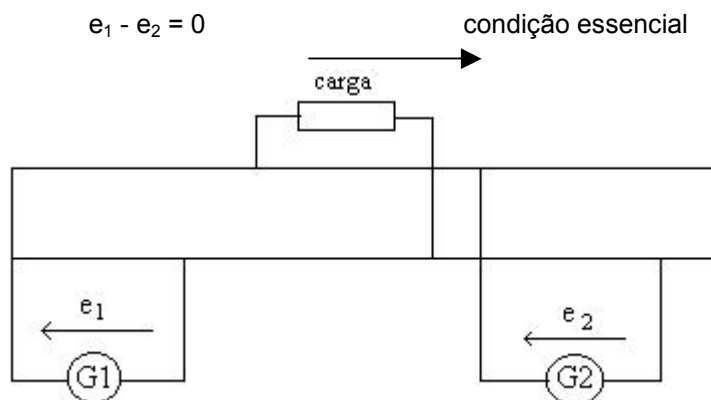
5.11.2 Condição para o estabelecimento do Paralelismo:

Quando um alternador é acoplado a um barramento, isto deverá ser feito sem que haja corrente de circulação entre as máquinas.

Para que esta condição seja atingida, a f.e.m em cada máquina deverá ser sempre igual e oposta.

A fig. 11.1 ilustra este fato.

Fig. 11.1



Sabe-se que as tensões geradas são funções do tempo, então deve-se ter em cada instante:
 $e_1 = e_2$

As condições para que duas tensões tenham seus valores instantâneos sempre iguais são:

- Mesma forma de onda;
- Mesmo valor eficaz;
- Mesma frequência;
- Ondas de tensão defasadas de zero;
- Mesma sequência de fases (para máquinas trifásicas).

5.11.3 Métodos para colocação de Alternadores em Paralelo.

5.11.3.1 Método do sincronoscópio (aparelho):

Este aparelho é análogo a um motor com rotor bobinado, cujo estator é alimentado com a tensão do barramento (frequência nominal) e o rotor com a tensão do alternador. O indicador do instrumento gira com velocidade proporcional à frequência resultante e girará no seguinte sentido: se a frequência do estator (barramento) for maior que a frequência do rotor, então o rotor girará no sentido do campo do estator. Caso contrário o rotor girará em sentido contrário ao campo do estator. Ver figura 11.2. Pode-se saber então a hora exata do fechamento (quando o indicador passa por zero), bem como se o alternador deverá ser acelerado ou retardado. É lógico que para o estabelecimento do paralelismo as tensões deverão apresentar amplitudes iguais.

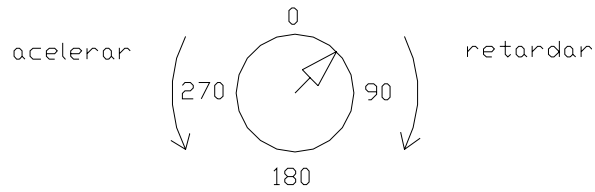
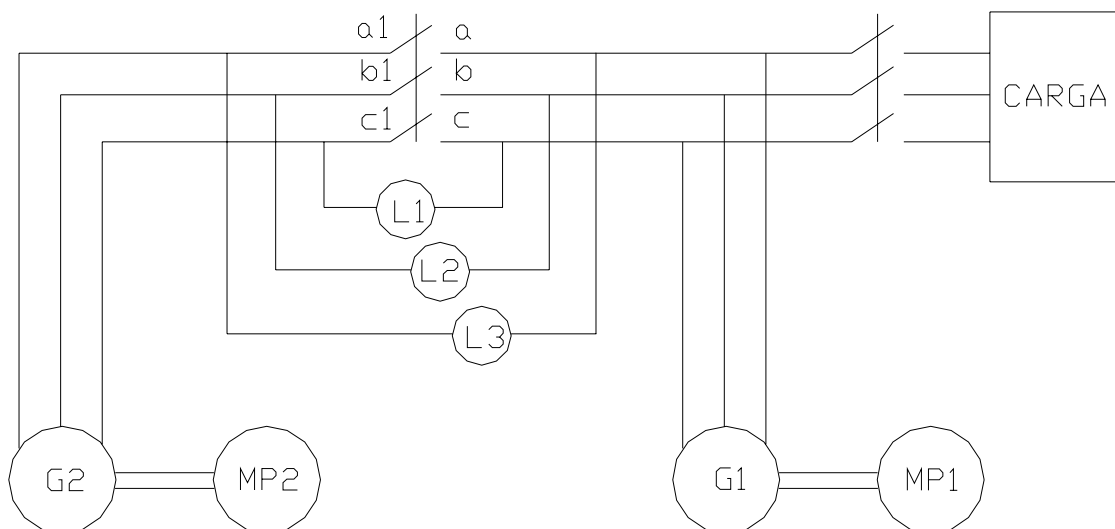


Figura 11.2

5.11.3.2 Método das lâmpadas:

O processo é iniciado ajustando-se a velocidade da máquina primária (Turbina) do Gerador G2 de forma que corresponda exatamente ao do Gerador G1. A corrente de campo de G2 é ajustada para produzir a mesma tensão nominal entre as linhas a1,b1 e c1. Um grupo adequado de lâmpadas é colocado em série com as linhas a1-a, b1-b e c1-c, como indicado na figura 11.3. Estas lâmpadas irão ascender se tanto a tensão como a frequência forem diferentes de uma máquina para outra. Quando as frequências são idênticas e as tensões são diferentes as lâmpadas ficarão acessas firmemente. Um ajuste da corrente de campo da máquina poderá ser efetuado com o intuito de apagar as lâmpadas. Nessa oportunidade a chave de sincronismo poderá ser fechada, estabelecendo assim o paralelismo.



EXERCÍCIOS PROPOSTOS

1. Mostre que para uma máquina síncrona saturada a relação de curto circuito deverá ser multiplicada por I_{f3}/I_{f2} para fornecer a impedância síncrona.
2. Se a M.S. estiver operando como motor, que efeito produzem os ângulos das correntes indutivas e capacitivas na fmm do campo?
3. Mostre o efeito da reação da armadura em máquinas síncronas trifásicas.

Sugestão: Combinar as fmm's das fases separadamente e projetá-las sobre os eixos pq e outro em quadratura.

4. Uma máquina síncrona de pólos lisos apresenta os seguintes dados de ensaio a vazio :

$$\begin{aligned}I_{f1} &= 0,41\text{fN} \\ I_{f2} &= 0,91\text{fN} \\ I_{f3} &= 1\text{fN}\end{aligned}$$

A resistência de armadura $R_a = 0,01$ pu. Traçar o diagrama fasorial para a máquina operando como motor a $f_p = 0,9$ capacitivo (máquina sobre-excitada). Considerar a operação do motor na região saturada.

5. Do fluxo de carga de um sistema de energia elétrica, determinou-se para um dado gerador os seguintes valores:

$$\begin{aligned}V &= 13\,800 \text{ [V]} \\ N &= 70 + j\,30 \text{ [MVA]} \text{ – indutivo}\end{aligned}$$

Os parâmetros da máquina podem ser obtidos pelo ensaio de escorregamento, cujos valores são:

$$\begin{aligned}V_{\max} &= 380 \text{ [V]} & I_{\max} &= 200 \text{ [A]} \\ V_{\min} &= 360 \text{ [V]} & I_{\min} &= 130 \text{ [A]}\end{aligned}$$

6. Um motor síncrono de pólos salientes, alimenta uma carga e absorve da rede 2/3 de sua potência nominal de entrada a $f_p = 0,8$ indutivo (máquina sub-excitada). A resistência de armadura e as reatâncias são:

$$\begin{aligned}R_a &= 0,01 \text{ pu} \\ X_d &= 0,90 \text{ pu} \\ X_q &= 0,50 \text{ pu}\end{aligned}$$

Sabendo-se que a tensão terminal é a nominal, determine o ângulo de potência da máquina, bem como a tensão gerada.

Dos itens 4, 5 e 6, determine a potência e o torque desenvolvidos.

Qual a máxima potência para as máquinas dos itens 4, 5 e 6?

Determine os valores das potências de relutância para os itens 5 e 6.

Determine os coeficientes sincronizantes para os itens 4 e 6.

O motor síncrono de 200HP, $f_p = 1$, trifásico, ligado em Y, 2 300 V, tem reatância de $X_d = 1,95$ Ohms e $X_q = 1,40$ Ohms por fase. Todas as perdas podem ser desprezadas.

Calcular a potência mecânica máxima que este motor pode fornecer, se ele é alimentado por um barramento infinito sob tensão e frequência nominais.