

## Aula Nro: 13

### 13.1) Efeito da corrente de campo no motor síncrono mantendo a potência elétrica constante

O que ocorre com o fator de potência do motor síncrono ao aumentar a corrente de campo, mantendo a potência da carga constante?

Para analisar esta situação, como o motor síncrono está ligado à rede elétrica, a tensão terminal é constante. Além disso, como a carga no eixo é constante a potência de entrada é constante,  $P_e = P_1 = \text{constante}$ . Inicialmente o fator de potência do motor é indutivo como mostra a figura 13.1

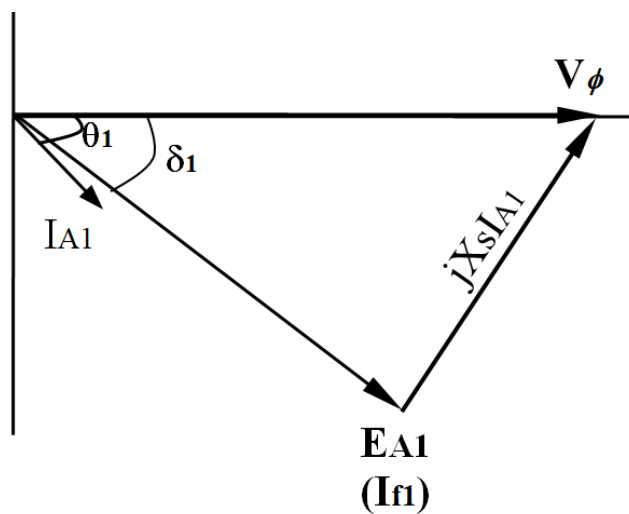


Fig 13.1: Diagrama fasorial do motor síncrono com fator de potência indutivo.

Desprezando as perdas por efeito Joule do estator, a potência elétrica é igual a potência convertida ou eletromecânica e pode ser expressa em duas formas:

$$P = 3V_\phi I_A \cos(\theta) \quad (13.1)$$

$$P = 3 E_A V_\phi \sin(\delta) / X_s \quad (13.2)$$

Como  $P$  e  $V_\phi$  são constantes, a partir de 13.1 e 13.2 pode-se obter, respectivamente:

$$I_A \cos(\theta) = P / (3V_\phi) = K_1 \text{ (constante)} \quad (13.3)$$

$$E_A \sin(\delta) = P X_s / (3V_\phi) = K_2 \text{ (constante)} \quad (13.4)$$

$K_1$  e  $K_2$  são proporcionais à potência elétrica  $P$  e formam dois lugares geométricos, ou seja, regiões nas quais limitam a variação de  $I_A$  e de  $E_A$ , respectivamente.

Além disso, como a potência reativa é dado por:

$$Q = 3V_\phi I_A \sin(\theta) \quad (13.5)$$

Como  $P$  e  $V_\phi$  são constantes, a partir de 13.5, tem-se:

$$I_A \sin(\theta) = Q / (3 V_\phi)$$

Dessa maneira a projeção de  $I_A$  no eixo vertical é proporcional a potência reativa. Os lugares geométricos formados pela variação da corrente de campo mantendo a potência elétrica constante pode ser visto na figura 13.2. Nessa figura também é mostrado a parcela proporcional a potência reativa.

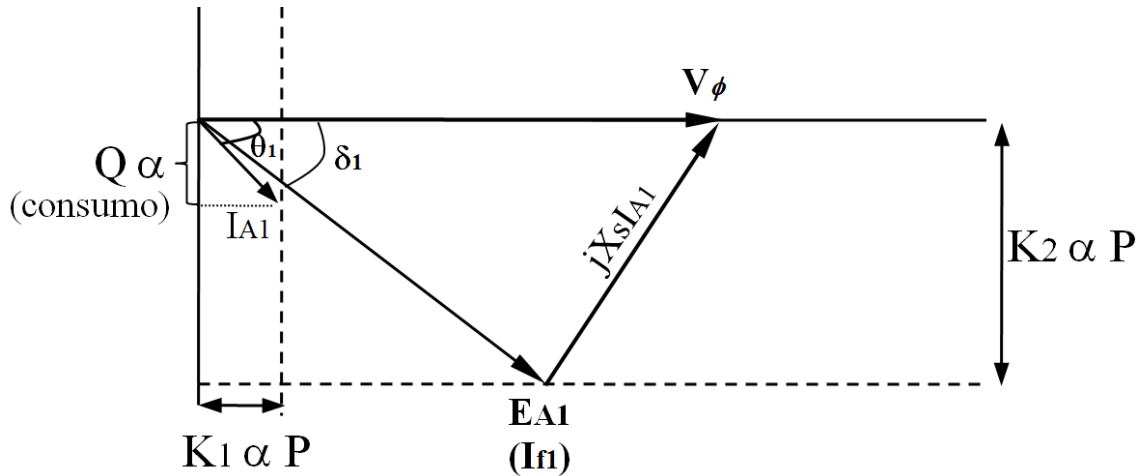


Fig 13.2: Lugares geométricos da corrente de armadura  $I_A$  e tensão gerada  $E_A$  devido a variação de corrente de campo mantendo a potência de entrada constante.

Aumentado a corrente de campo até  $I_{f2} > I_{f1}$  (inicial) fará com que a tensão  $E_A$  aumente, e a corrente de armadura diminua até chegar à situação  $E_{A2}$  que corresponde a fator de potência resistivo (sem consumo de potência reativa), onde a corrente de armadura é mínima e o ângulo de carga é menor comparado com a situação anterior. Isto pode visualizar-se na figura 13.3.

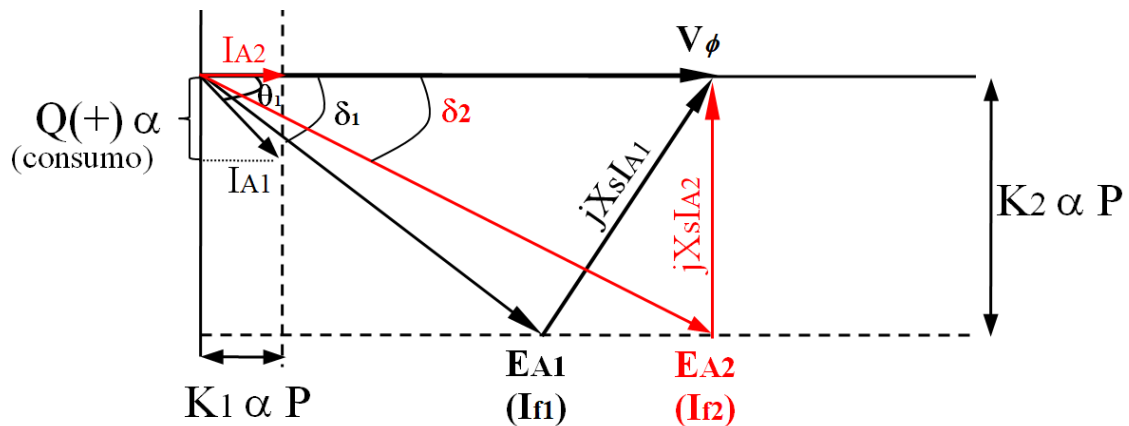


Fig 13.3: Efeito de aumentar a corrente de campo com potência no eixo constante.

Se continuar aumentando a corrente de campo a corrente de armadura até  $I_{f3} > I_{f1} > I_{f1}$  a tensão  $E_A$  aumentará, a corrente de armadura aumentará e o fator de potência se tornará capacitivo (adiantado) consumindo potência reativa negativa. O ângulo de carga continuará diminuindo. Isto pode visualizar-se na figura 13.4.

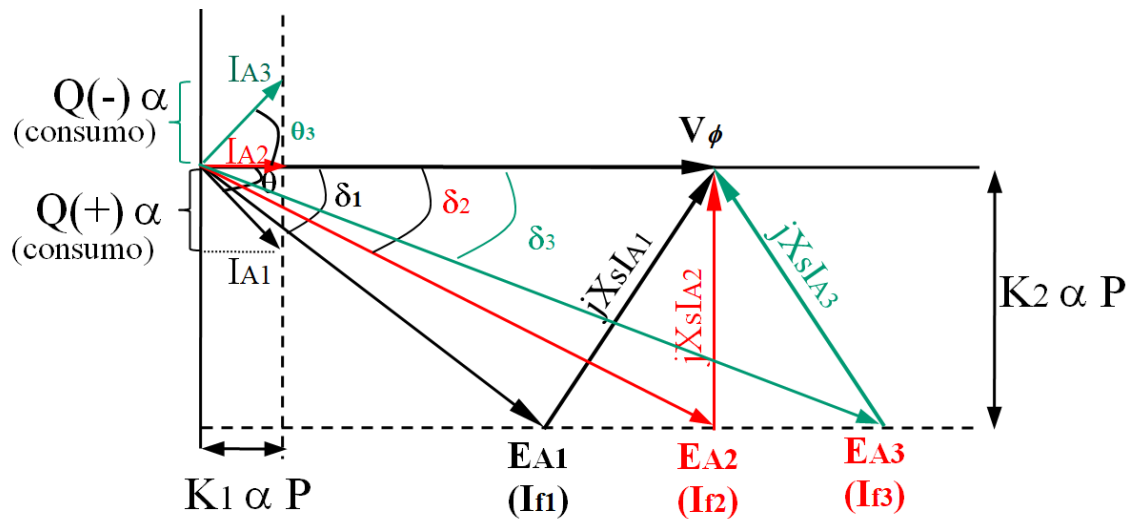


Fig 13.4: Efeito de aumentar a corrente de campo com potência no eixo constante.

Através da figura 13.5 é observado que quando  $E_A \cos(\delta) < V_\phi$ , a máquina opera em fator de potência indutivo ou atrasado. Quando  $E_A \cos(\delta) = V_\phi$ , a máquina opera em fator de potência resistivo ou unitário e quando  $E_A \cos(\delta) > V_\phi$ , a máquina opera em fator de potência capacitivo ou adiantado.

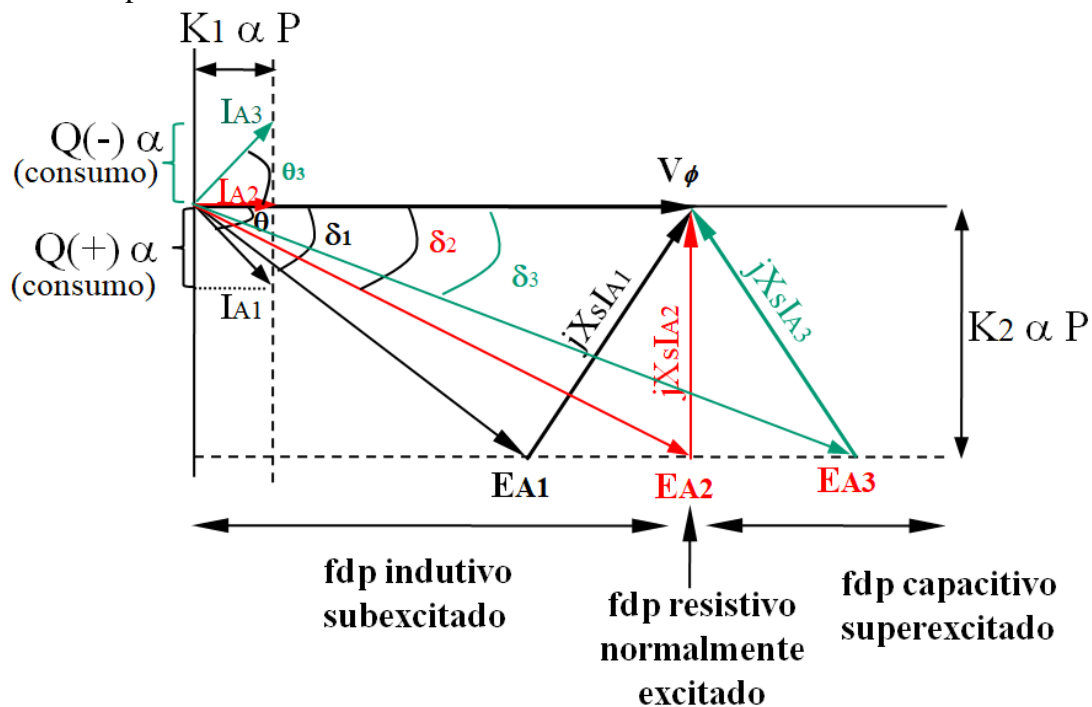


Fig 13.5: Efeito de aumentar a corrente de campo com potência no eixo constante no fator de potência do motor síncrono.

Assim, pode concluir-se que mudando a corrente de campo sem alterar a potência no eixo, pode controlar-se o fator de potência. Este comportamento pode ser também visualizado na curva V do motor síncrono que plota a corrente de armadura em função da corrente de campo, como pode visualizar-se na figura 13.6.

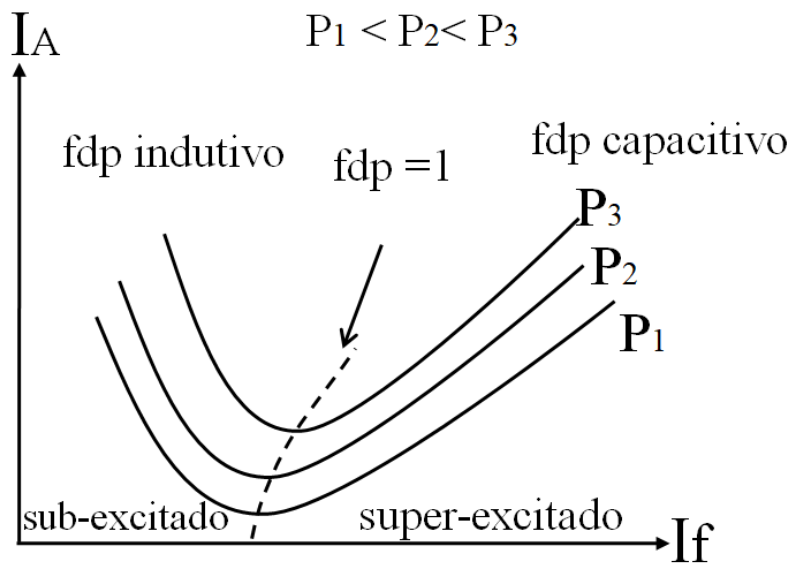
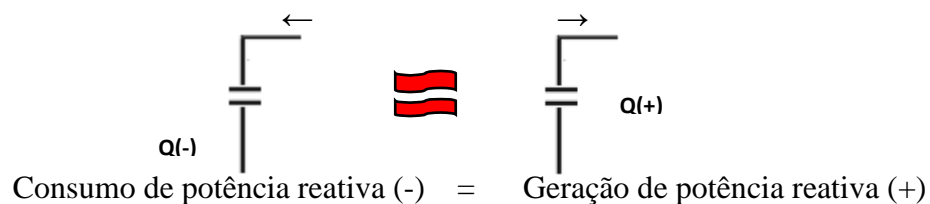


Fig 13.6: Curva V do motor síncrono devido a variação da corrente de campo para diferentes potências constantes.

Quando o motor síncrono não tem carga no eixo,  $P_{3\phi} \approx 0$ , o motor consome potencia reativa capacitiva pura “Capacitor ou Condensador Síncrono”. Equivale a um gerador síncrono de potencia reativa indutiva.



Aplicação do Motor Síncrono: Compensação reativa e deve trabalhar super-excitado. Da mesma forma como analisado o gerador síncrono, no caso do motor, também trabalhar na região de superexcitado é bom para maior margem de potência (estabilidade estática) devido a que  $E_A$  será maior.

**Exemplo1: Efeito de aumentar a corrente de campo no motor síncrono mantendo a corrente de campo constante.**

O motor síncrono de 208V, 45HP, fdp 0,8 adiantado, ligado em delta ( $\Delta$ ) possui uma reatância síncrona de  $2,5\Omega$  e resistência de armadura desprezível. As perdas por atrito e ventilação são 1,5kW, perdas no núcleo 1kW. A 60hz está alimentando uma carga de 15HP com um fator de potência inicial de 0,85 atrasado. A corrente de campo  $I_F$  nessas condições é 4,0A.

- a) Desenhe o diagrama fasorial inicial e mostre  $E_A$  e  $I_A$
- b) Se o fluxo do motor for incrementado em 25% desenhe o diagrama fasorial do motor nesta nova situação. Quais são agora os valores de  $E_A$  e  $I_A$  e o fdp do motor?

Solução:

$$P_{\text{saída}} = 15\text{Hp} = 15 \times 745\text{W} = 11900[\text{W}];$$

a) A potência de entrada é:

$$P_{\text{entrada}} = P_{\text{saída}} + P_{p_{A\&V}} + P_{p_{H\&F}} = 13690[\text{W}]$$

$$I_A = P_{\text{entrada}} / (3V_{\phi} \cos(\theta));$$

$$I_A = 25,8[\text{A}]$$

Da condição do problema. Como o  $\cos(\theta) = 0,85$  atrasado e dado a tensão de fase como referência, tem-se:

$$I_A = 25,8 \angle -31,8^\circ$$

A tensão interna gerada por fase é:

$$\mathbf{E}_A = \mathbf{V}_{\phi} - jX_S \mathbf{I}_A$$

$$= 208 \angle 0^\circ \text{ V} - (j2,5 \Omega)(25,8 \angle -31,8^\circ \text{ A})$$

$$= 208 \angle 0^\circ \text{ V} - 64,5 \angle 58,2^\circ \text{ V}$$

$$= 182 \angle -17,5^\circ \text{ V}$$

b) Se o fluxo for incrementado em 25%,  $E_A = k\phi\omega$  também aumentará em 25%.

$$E_{A2} = 1,25 E_{A1} = 1,25(182 \text{ V}) = 227,5 \text{ V}$$

Entretanto, o novo  $E_A$  deve estar no seu lugar geométrico devido a que a potência se manteve constante. Portanto deve-se manter a relação.

$$E_{A1} \sin \delta_1 = E_{A2} \sin \delta_2$$

$$\delta_2 = \arcsen\left(\frac{E_{A1}}{E_{A2}} \sin \delta_1\right)$$

$$= \arcsen\left[\frac{182 \text{ V}}{227,5 \text{ V}} \sin(-17,5^\circ)\right] = -13,9^\circ$$

Assim, a corrente de armadura pode ser encontrada da equação do circuito de armadura:

$$\mathbf{I}_{A2} = \frac{\mathbf{V}_{\phi} - \mathbf{E}_{A2}}{jX_S}$$

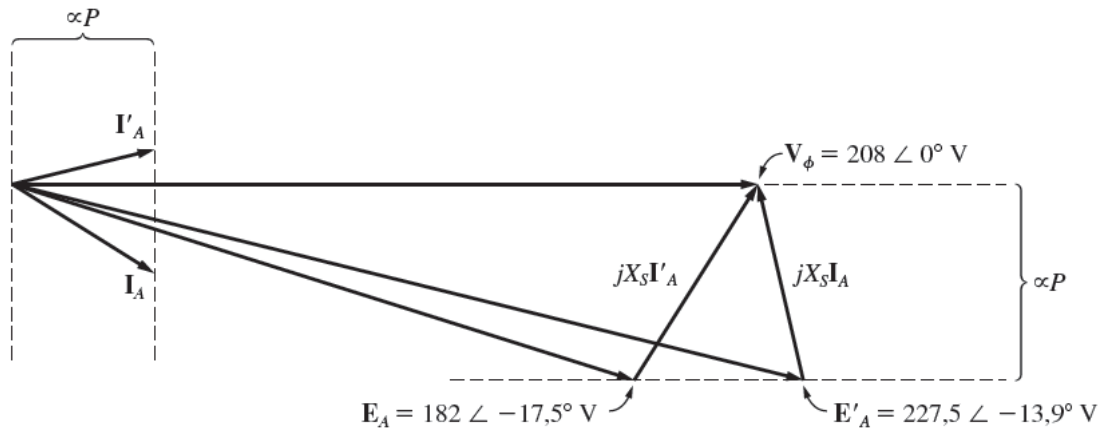
$$\mathbf{I}_A = \frac{208 \angle 0^\circ \text{ V} - 227,5 \angle -13,9^\circ \text{ V}}{j2,5 \Omega}$$

$$= \frac{56,2 \angle 103,2^\circ \text{ V}}{j2,5 \Omega} = 22,5 \angle 13,2^\circ \text{ A}$$

Finalmente, o fator de potência do motor é:

$$\cos(13,2^\circ) = 0,974 \quad \text{adiantado}$$

c) O diagrama fasorial antes e depois do aumento do fluxo é visto na figura a seguir:



### 13.2) Partida do motor síncrono

Problema: O motor síncrono não tem torque de partida, portanto se aplicar-nos correntes trifásicas com frequências elevadas (60Hz) o campo girante vai tão rápido (vai depender do número de pólos) que o circuito de campo não consegue acompanhar no início. Para resolver esse problema se tem as seguintes alternativas:

Métodos:

- a) **Partida reduzindo a velocidade de campo girante do estator usando um conversor de frequência.**

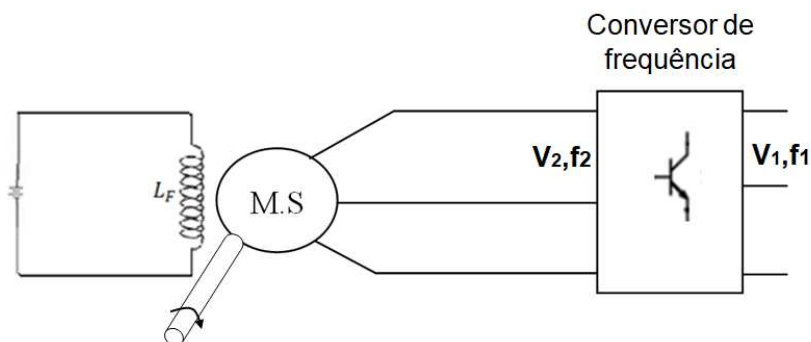


Figura 13.7: Partida do motor síncrono usando um motor conversor de frequência

Pode-se usar um conversor de frequência para diminuir a frequência do campo magnético do estator a fim que o circuito de campo do rotor consiga acompanhá-lo. Posteriormente pode-se aumentar a frequência do estator até atingir o valor nominal. **Cabe destacar que as mesmas considerações de especificações feitas em geradores síncronos são aplicadas**

**para o motor síncrono.** Por exemplo, ao diminuir a frequência do estator ( $f_2$ ), deve-se manter a relação  $V_2/f_2 = V_1/f_1 = \text{cte}$  para frequências inferiores à frequência nominal a fim de não saturar o núcleo do estator e ter corrente de campo acima do valor nominal que pode aquecer o circuito de campo e perder vida útil.

Os conversores de frequências permitem também fazer controle de velocidade do motor síncrono para velocidade abaixo e acima da velocidade síncrona. **No caso de velocidade acima da velocidade síncrona** (acima da frequência nominal), não é possível manter a relação  $V/f = \text{cte}$  porque a tensão terminal será superior ao seu valor nominal e pode perder isolamento. Neste caso deve-se manter a tensão constante e continuar aumentando a frequência. Os conversores de frequência já consideram todas estas restrições em  $V$  e  $f$  do motor síncrono.

**b) Usando um motor primo (máquina prima):**

Observação: A velocidade do motor primo e do motor síncrono deverá girar no mesmo sentido.

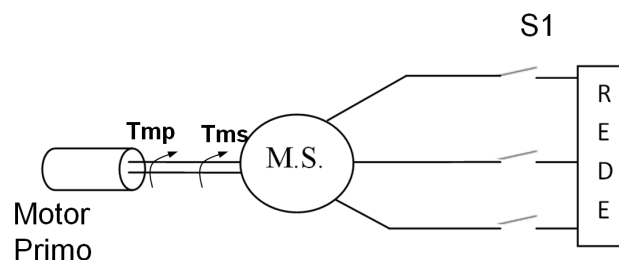


Figura 13.8: Partida do motor síncrono usando um motor cc no laboratório de máquinas de USP.

Procedimento:

b.1 ) Com o motor desligado, determinar o sentido de rotação da Motor Síncrono (MS). Para isto abra o circuito de campo do motor síncrono e alimente sua armadura com tensão variável “S1” fechada).

b.2) Ligar apenas o motor primo (“S1” aberta) e fazer com que o sentido de rotação do motor primo seja na mesma direção do motor primo. Após isso, aumentar a velocidade do motor primo até que atinja uma velocidade um pouco inferior a velocidade síncrona.

b.3) Alimente corrente de campo no motor síncrono e fechar a chave “S1”.

b.4) Desligar o motor primo

Máquina auxiliar (maquina motriz)

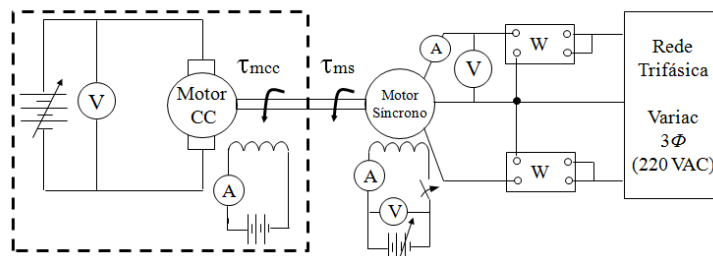


Figura 13.9: Partida do motor síncrono usando um motor cc no laboratório de máquinas de USP.

**c) Usando o enrolamento amortecedor (barras curtocircuitadas nos pólos do rotor) que as máquinas síncronas tem.**

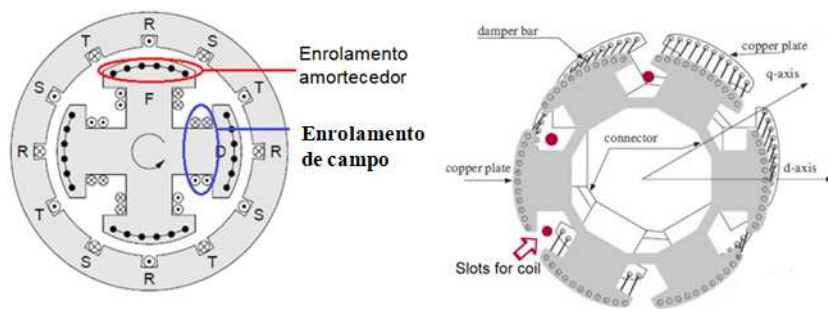


Figura 13.10: Enrolamento compensador apenas nas sapatas polares

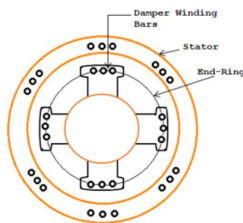


Figura 13.11: Enrolamento compensador nas sapatas polares, com anel curto-circuitado (gaiola).

Outra aplicação do enrolamento amortecedor das máquinas síncronas é amortecer as oscilações durante um transitório na rede. Isso também coopera para manter o sincronismo com a rede (estabilidade).

c.1) Partida com uma máquina auxiliar.

- 1 – Abrir o circuito de campo do motor síncrono.
- 2 – Curto-circuitar o circuito de campo (por segurança e para ter um torque adicional para ajudar na sincronização).
- 3 – Alimentar com tensões trifásicas. Verificar que a velocidade é próxima da velocidade síncrono (aprox 80%)
- 4 – Tirar o curto-circuito e alimentar o circuito de campo

### **13.3 Especificações nominais do Motor Síncrono.**

O motor síncrono pode operar como gerador sem nenhum problema. Portanto as mesmas restrições na  $S$ ,  $V$ ,  $f$ ,  $f_{dp}$  devem ser feitas para o gerador síncrono em relação às especificações nominais devem ser consideradas para o motor síncrono