

ET620 - Máquinas Elétricas

Henrique Koji Miyamoto

Sumário

1	Introdução	2
1.1	Tipos de máquinas elétricas	2
2	Máquinas CC	2
2.1	Visão geral	2
2.1.1	Construção	2
2.1.2	Comutação	3
2.1.3	Enrolamentos de armadura	3
2.1.4	Tensão de armadura	4
2.1.5	Torque desenvolvido	4
2.1.6	Curva de magnetização	4
2.1.7	Classificação das máquinas CC	5
2.2	Geradores CC	5
2.2.1	Excitação independente	5
2.2.2	Excitação paralela (shunt)	7
2.2.3	Excitação série	9
2.3	Motores CC	11
2.3.1	Excitação independente e paralela	11
2.3.2	Excitação série	13
2.3.3	Dispositivo de proteção e partida (DPP)	14
2.3.4	Controle de velocidade e frenagem	15
3	Máquinas de indução (assíncronas)	15
3.1	Aspectos construtivos	15
3.2	Campo magnético girante	15
3.3	Tensões induzidas	16
3.4	Máquina de indução polifásica	17
3.5	Três modos de operação	17
3.6	Máquina de indução invertida	18
3.7	Modelo de circuito equivalente	18
3.7.1	Configurações de circuito equivalente	19
3.7.2	Equivalente de Thévenin	20
3.8	Ensaio em vazio, com rotor bloqueado e parâmetros de circuito equivalente	21
3.9	Características de desempenho	22
3.10	Fluxo de potência nos três modos de operação	25
3.11	Controle de velocidade	25
3.12	Métodos para redução de corrente de partida	26
3.13	Motor de indução linear	26
4	Máquinas síncronas	26
4.1	Construção de máquinas síncronas trifásicas	27
4.2	Geradores síncronos	28
4.2.1	Rede interligada	29
4.3	Motores síncronos	30
4.4	Modelo de circuito equivalente	31
4.4.1	Determinação da reatância síncrona X_s	32
4.4.2	Diagrama fasorial (por fase)	32
4.5	Características de potência e torque	33

1 Introdução

Máquinas elétricas são conversores de energia elétrica em mecânica e vice-versa através do processo de *conversão de energia eletromecânica*. Podem atuar como *motores* ou *geradores* dependendo da direção de conversão (Figura 1). As variáveis primárias nestes são tensão e corrente e naqueles, torque e velocidade.

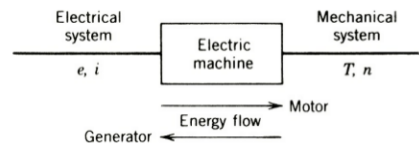


Figura 1: Conversão eletromecânica de energia.

Princípios de funcionamento das máquinas elétricas

1. Quando um condutor está em movimento em um campo magnético, surge tensão induzida sobre ele.

$$e = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l}$$

2. Quando um condutor conduzindo corrente é imerso em um campo magnético, surge uma força sobre ele.

$$\mathbf{F} = i(\mathbf{l} \times \mathbf{B})$$

Os dois efeitos ocorrem tanto em geradores como em motores, mas o primeiro é mais relevante em geradores e o segundo, em motores.

Estrutura básica As máquinas são compostas pelo *estator* (parte fixa, geralmente é a parte externa) e pelo *rotor* (parte móvel, geralmente é a parte interna), separados por *entreferro*. Os dois primeiros são estruturas laminadas (redução de correntes de Foucault) de material ferromagnético (aumenta o campo \mathbf{B}). O entreferro deve ser o menor possível (diminuir relutância do ar).

As máquinas apresentam dois enrolamentos: o *enrolamento de campo* é usado para indução de tensão ou geração de torque. O *enrolamento de campo* é usado para produzir o campo magnético principal da máquina.

1.1 Tipos de máquinas elétricas

Máquina CC O enrolamento de campo fica no estator e o de armadura no rotor. Os dois enrolamentos são alimentados em CC. Na operação como gerador, a tensão induzida na armadura é alternada. Um comutador e um conjunto de escovas são usados para retificar a corrente.

Máquina de indução Os enrolamentos do estator servem como enrolamento de armadura e de campo e são posicionados com defasagem de 120° . Quando ligados a alimentação CA trifásica surge um campo girante, que induz tensão no rotor. Se este estiver curto-circuitado, surgem correntes induzidas, que produzem torque, girando-o. A velocidade do rotor nunca alcançará a velocidade do campo girante (máquina assíncrona). O rotor pode ser bobinado ou gaiola de esquilo.

Máquina síncrona O enrolamento de campo está no rotor e o de armadura, no estator. O enrolamento de campo é excitado em CC e produz fluxo magnético. Quando o rotor gira, tensão variável é induzida no enrolamento de armadura (estator). A variação dessa tensão ocorre na mesma velocidade de rotação do rotor (máquina síncrona).

Apesar de as três máquinas serem diferentes na construção, seu comportamento é regido pelas mesmas leis e descrito por equações semelhantes.

2 Máquinas CC

2.1 Visão geral

2.1.1 Construção

O enrolamento de campo está no estator e o de armadura, no rotor. O estator tem polos salientes, excitados por enrolamentos de campo. Os enrolamentos de campo geram um campo magnético na direção do *eixo dos*

polos ou *eixo direto* ou *eixo d*). O campo magnético gerado pelo enrolamento de armadura está alinhado com o *eixo em quadratura* ou *eixo q* (defasado de 90° do eixo direto).

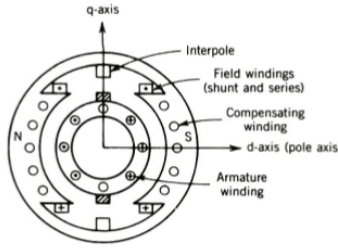


Figura 2: Diagrama da máquina DC com 2 pólos.

2.1.2 Comutação

Considere uma máquina CC de dois pólos, com uma espira de terminais ab que é colocada para girar. A tensão induzida entre seus terminais e_{ab} será alternada. Se forem usados anéis coletores contínuos, a tensão e_{12} também será alternada.

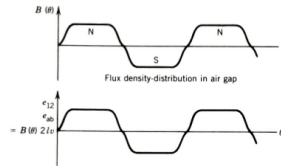


Figura 3: Tensão induzida na espira com anéis contínuos.

Se os anéis contínuos forem substituídos por anéis comutadores, a tensão e_{12} será unidirecional. Para minimizar as ondulações (*ripple*), são usadas várias espiras, de modo que a tensão resultante é praticamente contínua.

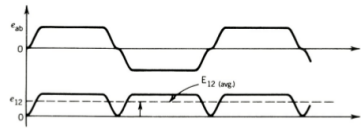


Figura 4: Tensão induzida na espira com anéis comutadores.

O comutador também é fundamental para a operação da máquina CC como motor, pois o torque surge devido à busca de alinhamento entre os campos do rotor e do estator. O comutador varia continuamente a orientação do campo de armadura (invertendo a corrente nos condutores), o que não permite que os campos se alinhem e que o torque se anule.

A comutação deve ocorrer no eixo central (zona neutra), de forma que os campos da armadura e do estator estejam em quadratura, maximizando a produção de torque. Nessa posição, a comutação é suave (sem faíscas e perdas mínimas), pois o campo e a tensão induzida são nulos.

2.1.3 Enrolamentos de armadura

A maioria das máquinas CC tem mais de dois pólos. Vantagem: a maior parte dos condutores está sujeito a campo magnético elevado. Desvantagem: a zona neutra diminui, dificultando comutação suave.

Em uma máquina de quatro pólos, a cada ciclo mecânico (360° mecânicos), um condutor de armadura passará por pólos norte-sul-norte-sul, resultando em dois ciclos elétricos (720° elétricos). Podemos definir θ_m ângulo mecânico (no espaço) e θ_e ângulo elétrico (ciclo de campo magnético). Seja p o número de pólos. Então:

$$\theta_e = \frac{p}{2} \theta_m.$$

Pode-se ligar as espiras de diferentes maneiras.

- No enrolamento imbricado (*lap winding*), o número de caminhos paralelos é igual ao número de pólos e o número de escovas é igual ao número de pólos.

- No enrolamento ondulado (*wave winding*), o número de caminhos paralelos é 2 e independe do número de pólos.

A corrente de armadura é dividida pelos caminhos paralelos. Por isso, o enrolamento imbricado (maior número de caminhos paralelos) é mais adequado para máquinas de alta corrente/baixa tensão e o enrolamento ondulado, para máquinas de baixa corrente/alta tensão.

2.1.4 Tensão de armadura

A tensão em uma espira (formada por dois condutores) de raio r e comprimento l , girando à velocidade $v = \omega r$ em um campo $B = B(\theta)$ é

$$e = 2Blv = 2Bl\omega_m r \Rightarrow \bar{e} = 2\bar{B}l\omega_m r.$$

Seja Φ o fluxo por pólo e a área de cada polos $A = 2\pi r l / p$. Então

$$\bar{B} = \frac{\Phi}{A} = \frac{\Phi p}{2\pi r l} \Rightarrow \bar{e} = \frac{\Phi p}{\pi} \omega_m.$$

Para um enrolamento com a caminhos paralelos e N total de espiras no enrolamento de armadura, a tensão de armadura E_a será:

$$E_a = \frac{N}{a} \bar{B} = \frac{Np}{\pi a} \Phi \omega_m$$

$$\therefore \boxed{E_a = K_a \Phi \omega_m},$$

em que $K_a = \frac{Np}{\pi a} = \frac{Zp}{2\pi a}$ é a *constante de armadura*, determinada pelo projeto do enrolamento.

2.1.5 Torque desenvolvido

A força produzida em um condutor da armadura de comprimento l e raio r , imerso em um campo $B = B(\theta)$ é dada por

$$f = Bli_c = Bl \frac{I_a}{a}.$$

O módulo do torque é dado por $T_c = fr$. Lembrando que $\bar{B} = \frac{\Phi p}{2\pi r l}$, temos:

$$T_c = Bl \frac{I_a}{a} r \Rightarrow \bar{T}_c = \frac{\Phi p}{2\pi} \frac{I_a}{a}.$$

Todos os condutores da armadura produzem torque na mesma direção e contribuem para o torque total:

$$T = 2N\bar{T}_c = \frac{N\Phi p}{\pi a} I_a$$

$$\therefore \boxed{T = K_a \Phi I_a}.$$

Em motores ou geradores ideais, a potência elétrica é completamente convertida em potência mecânica ou vice-versa.

$$P_{elet} = E_a I_a = K_a \Phi \omega_m I_a = T \omega_m = P_{mec}$$

2.1.6 Curva de magnetização

O fluxo por pólo de uma máquina CC depende da excitação do enrolamento de campo (F_p) e da relutância do caminho magnético (\mathcal{R}):

$$\Phi = \frac{F_p}{\mathcal{R}}$$

Em uma máquina de dois polos, o fluxo atravessa: polo, entreferro, dente do rotor, núcleo do rotor, dente do rotor, entreferro e polo oposto. Para baixos valores de Φ , podemos considerar a permeabilidade do material magnético infinita.

$$\Phi = \frac{2F_p}{2\mathcal{R}_g} = \frac{F_p}{\mathcal{R}_g}$$

A relação $\Phi \times F_p$ é proporcional à relação $E_a \times I_f$ para uma velocidade fixa, pois:

$$\Phi = \frac{F_p}{\mathcal{R}_g} \Rightarrow \frac{E_a}{K_a \omega_m} = \frac{N I_f}{\mathcal{R}_g} \Rightarrow E_a = \frac{K_a N}{\mathcal{R}_g} \omega_m I_f$$

Para valores baixos de fluxo, a relação é linear. Para valores mais elevados, a permeabilidade do material magnético diminui, resultando em aumentos não-lineares das relutâncias do material. Existe um ponto em que ocorre saturação, no qual as variações de fluxo são desprezíveis.

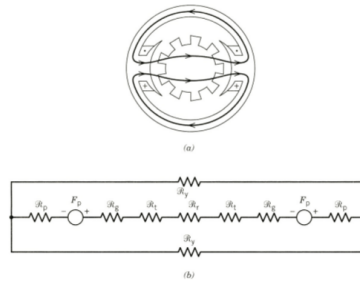


Figura 5: Circuito magnético equivalente da máquina CC.

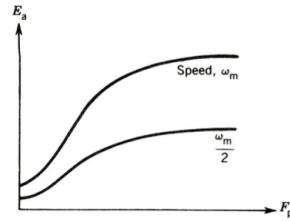


Figura 6: Curva de saturação da máquina CC.

2.1.7 Classificação das máquinas CC

As máquinas CC podem ser classificadas quanto à forma de ligação entre os enrolamentos de campo e de armadura:

- (a) Excitação independente
- (b) Auto-excitada paralela (shunt)
- (c) Auto-excitada série
- (d) Auto-excitada composta

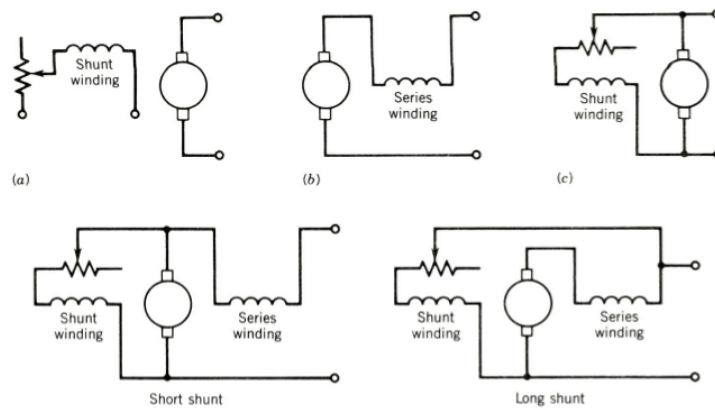


Figura 7: Diferentes formas de ligação das máquinas CC.

2.2 Geradores CC

2.2.1 Excitação independente¹

Modelo de regime permanente¹:

- R_{fw} : resistência do enrolamento de campo
- R_{fc} : resistência do reostato de controle

¹Nesse modelo, as indutâncias dos enrolamentos não são consideradas.

- $R_f = R_{fw} + R_{fc}$: resistência total de campo
- R_a : resistência do circuito de armadura
- R_L : resistência da carga

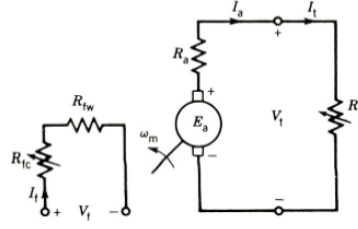


Figura 8: Circuito do gerador CC com excitação independente.

$$V_f = R_f I_f, E_a = V_t + I_a R_a, E_a = K_a \Phi \omega_m, V_t = R_L I_a$$

Considerando que a corrente de carga $I_L = I_a$ não afeta a distribuição de fluxo Φ , $V_t = E_a - R_a I_a$. Como a resistência R_a é pequena, a tensão terminal permanece aproximadamente constante.

Para uma carga R_L , o ponto de operação da máquina é dado pela interseção entre a característica da carga e a curva de regulação da máquina ($V_t \times I_a$).

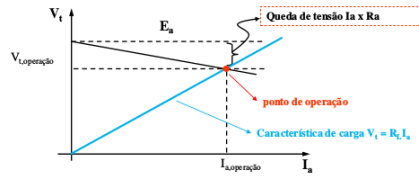


Figura 9: Ponto de operação do gerador CC.

Reação de armadura Corrente fluindo pelo enrolamento de armadura produz uma força magnetomotriz no eixo q e, portanto, um fluxo magnético que se soma ao fluxo do enrolamento de campo. Metade da região polar sofrerá aumento de magnetização e metade sofrerá diminuição de magnetização. Mas como a máquina opera próximo à região de saturação, o efeito resultante é a diminuição do fluxo no polo. Isto é, a *reação de armadura* tem como consequência diminuir o campo efetivo (efeito desmagnetizante), além de deslocar a zona neutra.

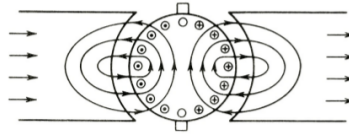


Figura 10: Reação de armadura.

Isso gera uma queda de tensão não-linear na curva de regulação de tensão $V_t \times I_a$, que cresce com o aumento de I_a . O efeito líquido pode ser interpretado como uma diminuição da corrente de campo: $I_{f(efetivo)} = I_{f(real)} - I_{f(RA)}$.

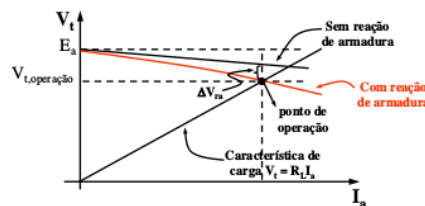


Figura 11: Curva de regulação de tensão considerando reação de armadura.

Uma solução para evitar o efeito da reação de armadura são enrolamentos compensadores adicionais. Eles são inseridos nas sapatas polares e conectados em série com o enrolamento de armadura. Seu objetivo é produzir um fluxo que se oponha àquele criado pelo enrolamento de armadura.

Interpolos A comutação não é linear, devido à indutância do condutor (durante a mudança de polaridade provoca atraso na corrente) e à tensão de reatância (tensão induzida na bobina em comutação devido ao fluxo induzido na região interpolar pelo enrolamento de armadura). Dessa forma, ocorre um atraso na variação da corrente, que faz com que no fim da comutação a corrente “salte” para seu valor máximo, provocando faiscamento.

Para resolver isso, podem ser usados *interpolos*, pequenos polos nos quais a corrente de armadura percorre um sentido tal que produza um fluxo que se opõe ao da armadura. Com isso, o fluxo resultante na região do interpolo é aproximadamente nulo.

2.2.2 Excitação paralela (shunt)

No gerador CC de excitação paralela, os enrolamentos de campo e de armadura estão conectados em paralelo, de forma que a tensão de armadura fornece a corrente de campo (auto-excitação).

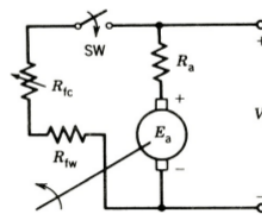


Figura 12: Circuito do gerador CC com excitação paralela (shunt).

Processo de excitação (escorvamento) Deve haver algum magnetismo residual na máquina para ela começar a operar, que causará o surgimento de uma tensão residual E_{ar} quando a máquina estiver girando. Quando a chave SW for fechada, surgirá uma corrente de campo inicial I_{f1} . O enrolamento de campo passará a produzir um fluxo, que aumentará a tensão induzida, que, por sua vez, aumentará a corrente de campo. Esse processo se repete até o ponto de equilíbrio P. O ponto de equilíbrio será na interseção da curva de magnetização com a reta de resistência do circuito de campo, assumindo $R_a \ll R_f \Rightarrow E_a \approx V_t$. O ponto de equilíbrio depende, portanto, da resistência do circuito $R_f = R_{fw} + R_{fc}$.

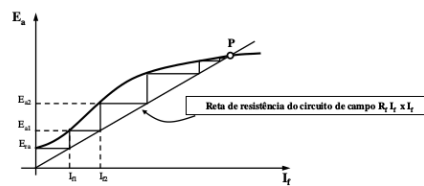


Figura 13: Processo de excitação (escorvamento).

Condições para o processo de excitação:

1. Magnetismo residual no circuito, de forma a ter um valor inicial E_{ar} .
2. Fluxo de campo no mesmo sentido do fluxo residual. Caso contrário, ocorrerá desmagnetização total da armadura, e tensão de armadura e corrente de campo irão para zero.
3. Resistência de campo R_f menor que o valor crítico. A *resistência crítica do circuito de campo* é tal que a reta de resistência de campo coincide com a reta de magnetização, causando instabilidade de tensão. Para valores altos de R_f , a tensão de armadura atingirá muito baixos.

Modelo de regime permanente

$$E_a = V_t + R_a I_a = K_a \Phi \omega_m$$

$$V_t = (R_{fw} + R_{fc}) I_f = R_L I_L$$

$$I_a = I_f + I_L$$

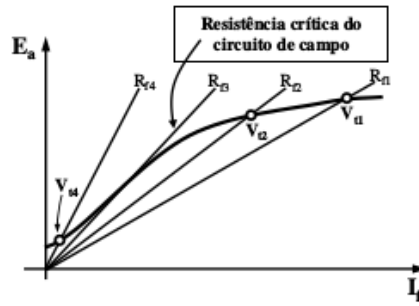


Figura 14: Efeito da resistência de campo.

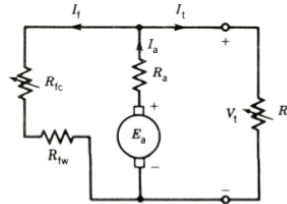


Figura 15: Circuito de regime para gerador CC com excitação paralela com carga.

A tensão terminal V_t diminuirá com o aumento da corrente de carga I_t , por causa de: (i) queda de tensão no enrolamento de armadura $R_a I_a$ e (ii) queda de tensão devido à desmagnetização causada pela reação de armadura ΔV_{RA} .

A curva de regulação de tensão pode ser obtida a partir de uma varredura sobre a reta de resistência junto com a curva de magnetização. Cada ponto está associado a uma tensão terminal e a distância entre as duas curvas dá a queda de tensão na resistência de armadura.

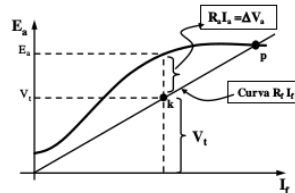


Figura 16: Método para obter curva de regulação de tensão sem reação de armadura.

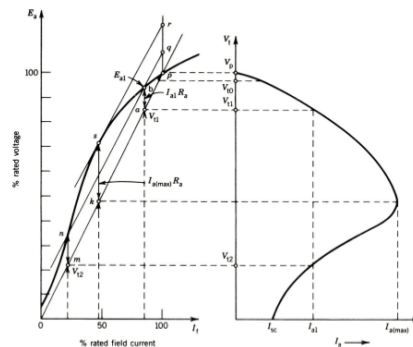


Figura 17: Curva de regulação de tensão do gerador CC com excitação paralela.

Características:

- Mesmo em vazio, há uma queda na tensão de armadura, mas ela é desprezível.
- Condição de carregamento máximo ($R_a I_{amax}$): ocorre no ponto em que a reta paralela à reta de resistência tangencia a curva de magnetização. A corrente associada I_{amax} é máxima corrente de carga que o gerador

pode atender.

- Auto-protegida contra curto-circuito: a corrente de armadura não é elevada para máquina operando em curto-circuito.
- Comparação com excitação independente: a queda de tensão na excitação shunt é mais acentuada, pois ela reduz a corrente de campo.

O efeito desmagnetizante devido a altas correntes de armadura provoca uma queda de tensão adicional nos terminais de um gerador CC shunt (reação de armadura). Esse efeito pode ser traduzido como redução na corrente de campo efetiva: $I_{f(efetivo)} = I_{f(real)} - I_{f(RA)}$.

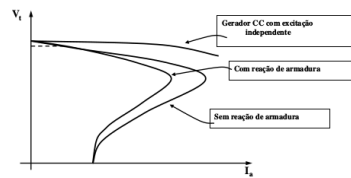


Figura 18: Comparação das curva de regulação de tensão com e sem reação de armadura.

2.2.3 Excitação série

Modelo de regime permanente:

$$E_a = V_t + (R_a + R_{sr})I_a$$

$$I_a = I_t$$

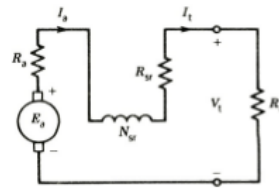


Figura 19: Circuito do gerador CC com excitação série.

Observações:

- R_{sr} deve ser baixa para limitar a queda na tensão terminal (I_a é alta).
- A corrente de campo é a mesma de armadura, portanto é mais alta, o que exige uma bitola maior. Assim, essa máquina tem alto custo e é maior para uma mesma potência.

Para obter a curva de regulação de tensão, utiliza-se a curva de magnetização e a reta $(R_a + R_{sr})I_a$. Para cada valor de corrente I_a , a distância da reta à curva representa o valor da tensão terminal V_t . Uma varredura permite construir a curva desejada.

A inclusão do efeito de reação de armadura provocará uma queda de tensão adicional na tensão terminal. Esse efeito pode ser interpretado como uma redução da corrente de campo efetiva: $I_{f(efetivo)} = I_{f(real)} - I_{f(RA)}$.

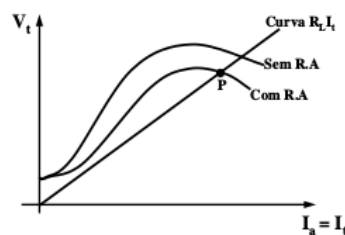


Figura 20: Curva de regulação de tensão para excitação série.

Observações:

1. O ponto de operação é dado pelo cruzamento da curva de regulação de tensão com a reta da carga.
2. Para valores elevados de resistência de carga (reta muito inclinada), o gerador só pode fornecer valores baixos de resistência terminal.

Excitação composta

Esses geradores usam combinações dos enrolamentos série e paralelo, de forma a eliminar a queda de tensão excessiva causada pela resistência de armadura e pela reação de armadura. O enrolamento de shunt é o principal, responsável pela produção da maior parte do fluxo magnético. Ele possui muitas espiras, área de seção transversal pequena e conduz corrente menor que a armadura. O enrolamento série produz fluxo para compensar as quedas de tensão.

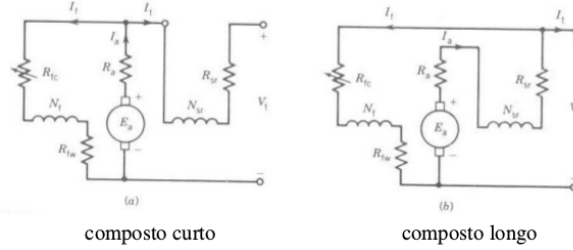


Figura 21: Circuitos do gerador CC com excitação composta.

Modelo de regime permanente:

- Composto curto:

$$V_t = E_a - R_a I_a - R_{sr} I_t$$

$$I_t = I_a - I_f$$

- Composto longo:

$$V_t = E_a - (R_a + R_{sr}) I_a$$

$$I_t = I_a - I_f$$

$$I_f = V_t / (R_{fw} + R_{fc})$$

Sejam Φ_{sh} e Φ_{sr} os fluxos gerados pelos enrolamentos shunt e série, respectivamente. Se esses fluxos se somam, a máquina é denominada *composta aditiva*; se se subtraem, *composta subtrativa*.

$$E_a = K_a (\Phi_{sh} \pm \Phi_{sr}) \omega_m$$

A composição da máquina aditiva pode ser de três tipos:

- Supercomposta: para corrente nominal, a tensão terminal é *maior* que a nominal.
- Plana: para corrente nominal, a tensão terminal é *igual* à nominal.
- Subcomposta: para corrente nominal, a tensão terminal é *menor* que a nominal.

Na máquina subtrativa, tem queda de tensão elevada para pequenas variações de corrente e corrente aproximadamente constante.

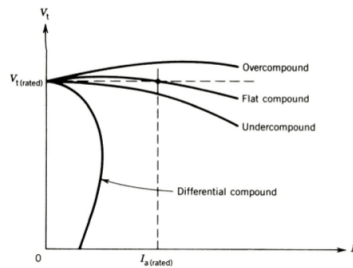


Figura 22: Curvas de regulação de tensão para excitação composta.

A força magnetomotriz resultante por polo é

$$F_{eff} = F_{sh} \pm F_{sr} - F_{RA} \Rightarrow N_f I_{f(eff)} = N_f I_f \pm N_{sr} I_{sr} - N_f I_{f(RA)} \Rightarrow I_{f(eff)} = I_f \pm \frac{N_{sr}}{N_f} I_{sr} - I_{f(RA)}$$

2.3 Motores CC

As máquinas CC são mais usadas como gerador, pois oferecem diferentes características $T \times \omega$ e diversas opções para controle de velocidade. São especialmente adequados para:

- Aplicações que requerem velocidade constante para torque variável.
- Aplicações que requerem controle de velocidade em uma larga faixa de variação.

As equações de tensão de armadura e torque são as mesmas do gerador:

$$E_a = K_a \Phi \omega_m$$

$$T = K_a \Phi I_a$$

Balanco de energia

- A potência elétrica que entra no motor é $P_{entrada} = V_t I_t$
- Parte é perdida no enrolamento série: $P_{P, sr} = R_{sr} I_{sr}^2$ (1% a 2%)
- Parte é perdida no enrolamento shunt: $P_{P, sh} = R_f I_f^2$ (1% a 5%)
- Parte é perdida no enrolamento da armadura: $P_{P, arm} = R_a I_a^2$ (2% a 4%)
- Parte é perdida na porção móvel, por atrito e ventilação: $P_{P, rot}$ (3% a 15%)
- O restante é fornecido na forma de torque mecânico para a carga: P_{saida} (74% a 93%)

O balanço de energia é:

$$P_{entrada} = P_{P, sr} + P_{P, sh} + P_{P, arm} + P_{P, rot} + P_{saida}$$

$$\eta = \frac{P_{saida}}{P_{entrada}}$$

Observações:

- A potência entregue à armadura é $P_a = E_a I_a = P_{rot} + P_{saida}$.
- As perdas rotacionais podem ser estimadas alimentando o motor em vazio: $P_{rot} = E_{a0} I_{a0} = P_{a0}$.

2.3.1 Excitação independente e paralela

Excitação independente Modelo de regime permanente:

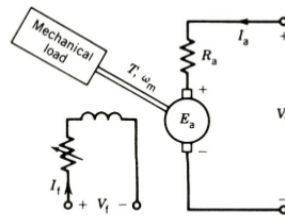


Figura 23: Circuito do motor CC de excitação independente.

$$V_t = E_a + R_a I_a$$

$$E_a = K_a \Phi \omega_m$$

$$T = K_a \Phi I_a$$

$$V_f = R_f I_f$$

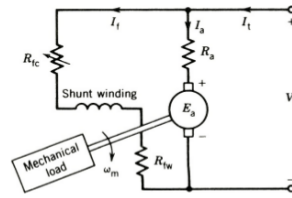


Figura 24: Circuito do motor CC de excitação paralela.

Excitação paralela Modelo de regime permanente:

$$V_t = E_a + R_a I_a$$

$$E_a = K_a \Phi \omega_m$$

$$T = K_a \Phi I_a$$

$$I_t = I_a + I_f$$

Característica torque \times velocidade De $E_a = K_a \Phi \omega_m = V_t - R_a I_a$ e $T = K_a \Phi I_a$, temos:

$$\omega_m = \frac{V_t}{K_a \Phi} - \frac{R_a}{(K_a \Phi)^2} T$$

Se a tensão terminal V_t e o fluxo da máquina Φ forem mantidos constantes, a velocidade do motor CC permanece aproximadamente constante².

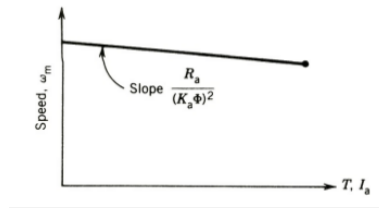


Figura 25: Característica torque-velocidade de um motor paralelo ou independente.

Controle de velocidade A partir da equação anterior, conclui-se que a velocidade desse motor pode ser controlado de três maneiras:

1. Controle via tensão terminal V_t
2. Controle via corrente de campo $I_f \propto \Phi$
3. Controle via resistência de armadura R_a

Controle via tensão terminal V_t :

- Nesse método, R_a e I_f são mantidos constantes. Então

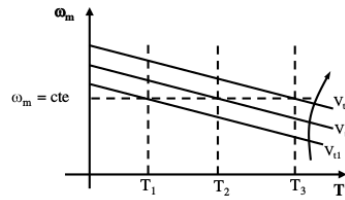
$$\omega_m = k_1 V_t - k_2 T$$

. Para torque constante, a velocidade varia linearmente com V_t . Se a carga é variada, a velocidade pode ser mantida ajustando V_t .

- Com aumento de V_t , ω_m e $E_a = K_a \Phi \omega_m$ aumentam linearmente. $I_a = (V_t - E_a)/R_a$ permanece constante, assim como o torque $T = K_a \Phi I_a$. A potência $P = V_t I_a$ aumenta linearmente.
- Para uma carga fixa pode-se conseguir variação suave de velocidade. Mas esse método é caro, pois exige uma fonte de tensão CC variável para o circuito de armadura.

Controle via corrente de campo I_f :

²Com o aumento de T ou I_a , ocorrerá reação de armadura, que diminuirá o fluxo Φ , melhorando a regulação de velocidade.

Figura 26: Controle via tensão terminal V_t .

- Nesse método, R_a e V_t permanecem constantes. I_f é variada usando um reostato R_{fc} . Supondo linearidade magnética $K_a \Phi = K_f I_f$, temos:

$$\omega_m = \frac{V_t}{K_f I_f} - \frac{R_a}{(K_f I_f)^2} T$$

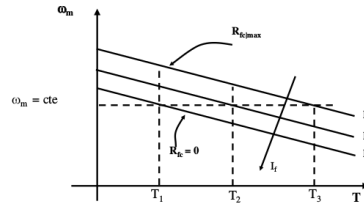
Para o motor operando em vazio, $\omega_m = \frac{V_t}{K_f I_f}$.

- A velocidade varia inversamente com a corrente de campo³. Para um dado valor de I_f ,

$$\omega_m = K_3 - K_4 T.$$

Para um valor de I_f , a velocidade é praticamente constante com o torque. Para um dado torque, a velocidade operação pode ser ajustada através de I_f , variando R_{fc} .

- Controle da velocidade até o valor base (tensão nominal) pode ser obtido variando V_t . Além desse valor, pode-se diminuir I_f . Se a corrente de armadura não exceder o nominal, o controle fica restrito a aplicações que demandam potência constante ($P = V_t I_a = cte. \approx E_a I_a$, mas $T \omega_m = E_a I_a \rightarrow T \approx cte. / \omega_m$).
- Esse tipo de controle é mais barato, mas a resposta é mais lenta devido à indutância do circuito de campo.

Figura 27: Controle via corrente de campo I_f .

Controle via resistência de armadura R_a :

- Nesse método, V_t e I_f permanecem constantes. A velocidade é controlada variando a resistência de armadura com um reostato R_{ae} . Então

$$\omega_m = \frac{V_t}{K_a \Phi} - \frac{R_a + R_{ae}}{(K_a \Phi)^2} T = K_5 - K_6 T$$

A velocidade diminui linearmente com o aumento do torque.

- Para torque fixo, R_{ae} pode ser ajustado para definir uma velocidade. Para torque variável, R_{ae} pode ser ajustado para manter a velocidade constante. Pode-se variar a velocidade de zero até o valor base variando R_{ae} .
- Método simples, porém controle discreto, baixa precisão e perdas adicionais em R_{ae} . Como R_{ae} é percorrida pela corrente de armadura, seu custo é maior que R_{fc} anterior.

2.3.2 Excitação série

Uma resistência R_{ae} permite controlar a velocidade no motor CC série. Assumindo linearidade magnética $K_a \Phi = K_{sr} I_a$, temos

$$T = K_a \Phi I_a = K_{sr} I_a^2$$

³Para correntes baixas, a velocidade pode se tornar perigosamente alta.

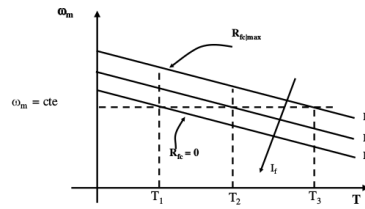
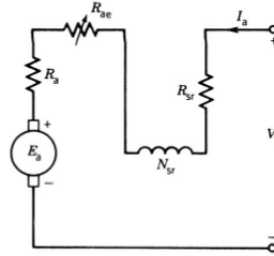
Figura 28: Controle via resistência de armadura R_a .

Figura 29: Circuito do motor CC com excitação série.

. Do circuito equivalente, $E_a = V_t - I_a(R_a + R_{ae} + R_{sr})$. Além disso, $\omega_m = E_a / K_{sr} I_a$. Logo:

$$\omega_m = \frac{V_t}{K_{sr} T} - \frac{R_a + R_{sr} + R_{ae}}{K_{sr}}$$

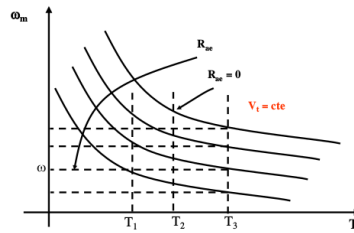


Figura 30: Característica torque-velocidade de um motor série.

O aumento de R_{ae} desloca a curva para baixo. Assim, uma carga com torque fixo pode operar a diferentes velocidades, ou uma carga variável pode operar a velocidade constante ajustando R_{ae} .

Vantagens: permite uma larga faixa de variação de velocidade de zero até o valor nominal e tem alto torque de partida (aplicações: trens, motor de partida de automóveis, guindastes etc.).

Seria possível controlar a velocidade alterando V_t , mas é mais caro. Perde-se a possibilidade de controlar através da corrente de campo.

O motor CC série é considerado *motor universal*, pois também pode operar em CA. Isso é possível, pois os enrolamentos de campo e armadura são percorridos pela mesma corrente. Assim, a orientação do campo se inverte ao mesmo tempo, garantindo torque unidirecional. Aplicações: eletrodomésticos.

Excitação composta

É possível obter características torque-velocidade diferentes combinando enrolamentos série e shunt.

$$\omega_m = \frac{V_t}{K_a(\Phi_{sh} \pm \Phi_{sr})} - \frac{R_a}{K_a^2 \Phi_{sh} \pm \Phi_{sr}} T$$

Em comparação com excitação shunt/independente, o composto subtrativo provoca aumento de velocidade e o composto aditivo, queda adicional de velocidade.

2.3.3 Dispositivo de proteção e partida (DPP)

No momento de partida, a corrente de armadura é demasiadamente alta, podendo chegar a 10 vezes o valor nominal.

$$I_a = \frac{V_t - E_a}{R_a} = \frac{V_t}{R_a}$$

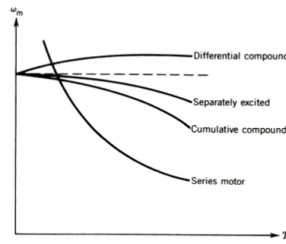


Figura 31: Característica torque-velocidade de motores compostos.

Para resolver isso, pode-se inserir uma resistência em série com a de armadura (reostato de partida) ou usar uma fonte CC variável (mais caro). Usando uma resistência externa:

$$I_a = \frac{V_t - E_a}{R_a + R_{ae}}.$$

Após a partida, à medida que a velocidade aumenta, a tensão de armadura E_a cresce, levando a uma diminuição da corrente de armadura. Portanto, a resistência R_{ae} pode ser gradualmente reduzida até zero. Para cada valor de resistência, a velocidade aumentará até obter uma velocidade de regime.

Se o campo for muito baixo, a máquina pode atingir velocidades muito altas. Para evitar isso, usa-se um dispositivo de proteção formado por um eletroímã energizado pela corrente de campo. Se a corrente de campo diminuir muito, a mola puxará a parte móvel, desligando o circuito de armadura e parando o motor.

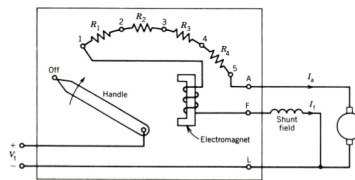


Figura 32: Dispositivo de proteção e partida (DPP).

2.3.4 Controle de velocidade e frenagem

Ver seção 4.5 de [1].

3 Máquinas de indução (assíncronas)

A máquina de indução é uma das mais usadas na indústria. Diferentemente da máquina CC, tanto no enrolamento de campo como no de armadura, a corrente que circula é alternada. A corrente é fornecida diretamente ao estator e induzida no rotor. Apesar de poder ser usada como motor ou gerador, o primeiro uso é o mais comum. Motores de indução de diversos tamanhos são usados em uma gama de aplicações desde eletrodomésticos até fábricas têxteis, além de sistemas de transporte (motor linear).

3.1 Aspectos construtivos

Máquinas de indução têm entreferro uniforme. O estator é composto por folhas de aço laminadas, em três enrolamentos afastados de 120° , que podem estar conectados em delta (Δ) ou estrela (Y). O rotor também é formado de material ferromagnético laminado e pode ser de dois tipos: *gaiola de esquilo* ou *bobinado*. O primeiro é mais simples e consiste de barras de cobre ou alumínio curto-circuitadas nas duas pontas. O segundo tem enrolamento semelhante ao do estator e os terminais estão disponíveis para acesso.

O campo girante produzido no estator induz tensão no rotor (daí *máquina de indução*). Se o enrolamento deste estiver curto-circuitado, surgirão correntes induzidas, que produzirão um campo magnético oposto, resultando em torque e giro do motor. Para que isso aconteça, a velocidade do eixo deve ser menor que a velocidade do campo girante (daí *máquina assíncrona*).

3.2 Campo magnético girante

O estator da máquina de indução é formado por três bobinas fixas afastadas de 120° geométricos. Quando elas são alimentadas por correntes alternadas senoidais, de mesma amplitude e defasadas de 120° elétricos,

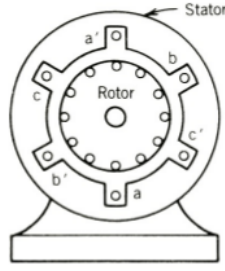


Figura 33: Diagrama de motor de indução com rotor gaiola de esquilo.

cada uma produz campo magnético pulsante e senoidal, defasados de 120° . A resultante desses campos é um campo magnético girante de intensidade constante no estator.

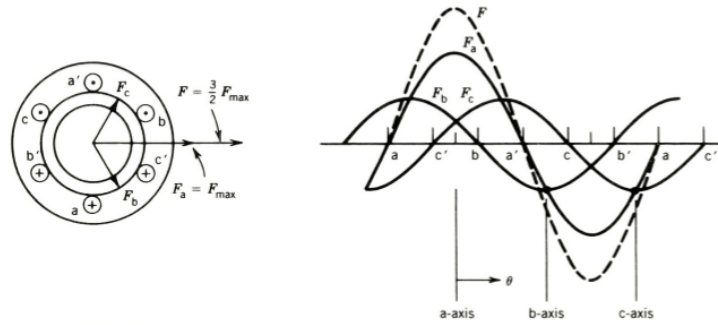


Figura 34: Campo girante na máquina de indução.

$$i_a = I_m \cos(\omega t), \quad i_b = I_m \cos(\omega t - 120^\circ), \quad i_c = I_m \cos(\omega t + 120^\circ)$$

$$F(\theta) = F_a(\theta) + F_b(\theta) + F_c(\theta) = N i_a \cos \theta + N i_b \cos(\theta - 120^\circ) + N i_c \cos(\theta + 120^\circ)$$

$$F(\theta, t) = \frac{3}{2} I_m \cos(\omega t - \theta)$$

A frequência de rotação n do campo (em RPM) em uma máquina de p polos para uma corrente de frequência f (em Hz) é

$$n = \frac{120f}{p}$$

3.3 Tensões induzidas

A densidade de fluxo no entreferro é dada por

$$B(\theta) = B_{max} \cos \theta$$

O fluxo no entreferro por polo, considerando estator cilíndrico (raio r e comprimento l) é

$$\Phi_p = \int B dA = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} B(\theta) l r d\theta = 2 B_{max} l r$$

O fluxo concatenado com a bobina de estator de fase a é

$$\lambda_a(\omega t) = N \Phi_p \cos \omega t$$

E a tensão induzida para N espiras é

$$e_a = -\frac{d\lambda_a}{dt} = \omega N \Phi_p \sin \omega t = E_{max} \sin \omega t$$

Analogamente, $e_b = E_{max} \sin(\omega t - 120^\circ)$ e $e_c = E_{max} \sin(\omega t + 120^\circ)$.

O valor RMS da tensão induzida é

$$E_{rms} = \frac{\omega N \Phi_p}{\sqrt{2}} = 4,44 f N \Phi_p$$

Em uma máquina real, o enrolamento é distribuído, de forma que as tensões induzidas em cada espira não estão em fase. Assim, deve ser incluído um fator de redução K_w no cálculo das tensões induzidas. Tipicamente, esse fator está entre 0,85 e 0,95. N_{ph} é o número de espiras em série por fase.

3.4 Máquina de indução polifásica

Operação estacionária (rotor em aberto) Não há corrente induzida e o rotor permanece parado. As tensões induzidas no estator (1) e no rotor (2) são tais que

$$E_1 = 4,44 f_1 N_1 \Phi_p K_{w1}$$

$$E_2 = 4,44 f_1 N_2 \Phi_p K_{w2}$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1 K_{w1}}{N_2 K_{w2}} \approx \frac{N_1}{N_2}$$

Nesse estado, a máquina de indução funciona como um transformador.

Defasador O rotor pode ser mantido em uma posição tal que os eixos dos enrolamentos de uma fase no estator e no rotor sejam defasados de β . Uma máquina parada (rotor em aberto) pode ser usada como um defasador da tensão induzida com um ângulo $0^\circ \leq \beta < 360^\circ$.

Regulador de indução Uma máquina de indução polifásica estacionária pode ser usada como fonte de tensão polifásica variável se conectada a um regulador de indução. Vantagens em relação ao autotransformador: variação contínua da tensão, conexões elétricas deslizantes não são necessárias. Desvantagens: maiores indutâncias de dispersão, corrente de magnetização e custo elevado.

Operação em movimento (rotor em curto) Ao conectar os enrolamentos do estator a uma fonte trifásica, com o rotor curto-circuitado, surgirão tensões e correntes induzidas no rotor, que, ao interagir com o campo do entreferro, produzirão torque. De acordo com a lei de Lenz, a rotação será na direção do campo girante, de modo a diminuir a velocidade relativa entre o campo girante e o rotor. Eventualmente, o rotor atingirá uma velocidade estacionária n , menor do que a velocidade síncrona n_s do campo girante.

A diferença entre a velocidade do rotor n e a velocidade síncrona do campo girante n_s é medida através do *escorregamento* s :

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

A frequência f_2 da tensão e corrente induzida no rotor é chamada *frequência de escorregamento*

$$f_2 = \frac{p}{120} (n_s - n) = \frac{p}{120} s n_s = s f_1$$

As correntes induzidas no rotor geram um campo girante com velocidade do *escorregamento de RPM*:

$$n_2 = \frac{120 f_2}{p} = \frac{120 s f_1}{p} = s n_s$$

O campo girante produzido pelo rotor gira no entreferro na mesma velocidade que o campo girante produzido pelo estator, pois $n + n_2 = (1 - s)n_s + s n_s = n_s$.

3.5 Três modos de operação

Motor Os terminais do estator são ligados a uma fonte trifásica. O rotor gira na direção do campo girante do estator. A velocidade de regime é menor que a velocidade síncrona ($n < n_s$) e o escorregamento é $0 \leq s \leq 1$.

Gerador Um torque externo aciona o eixo, de modo que a velocidade do rotor é maior que a velocidade síncrona ($n > n_s$) e este gira na mesma direção do campo girante. Nesse caso, $s < 0$. Aplicação: frenagem regenerativa.

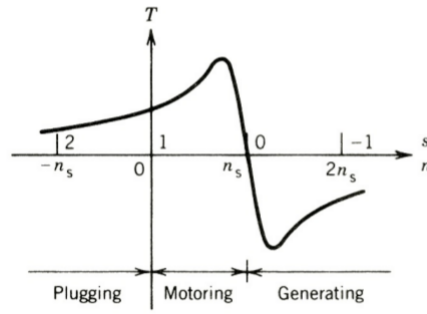


Figura 35: Modos de operação da máquina de indução.

Modo frenante O rotor gira na direção oposta ao campo girante do estator ($n < 0$). O torque será na direção do campo girante, mas oposto ao movimento do rotor. Nesse caso, $s > 1$.

3.6 Máquina de indução invertida

Consiste em ligar, em uma máquina de rotor bobinado, a fonte trifásica aos enrolamentos do rotor e curto-circuitar os enrolamentos do estator. O funcionamento da máquina é análogo ao caso discutido anteriormente.

3.7 Modelo de circuito equivalente

Circuito do estator O circuito equivalente do estator é análogo ao do primário de um transformador.

- V_1 : tensão terminal por fase
- R_1 : resistência do enrolamento do estator por fase
- L_1 : indutância de dispersão do estator por fase
- E_1 : tensão induzida no enrolamento do estator por fase
- L_m : indutância de magnetização do estator por fase
- R_c : resistência de perda ôhmica no estator por fase

Diferenças: a corrente de excitação I_ϕ e a reatância de dispersão X_1 são maiores devido ao entreferro. Além disso, a reatância de dispersão é maior, pois os enrolamentos estão distribuídos na periferia do entreferro em vez de concentrados em um núcleo (transformador).

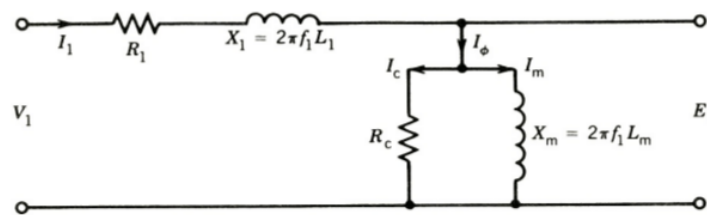


Figura 36: Circuito equivalente do estator.

Circuito do rotor O circuito equivalente do rotor tem os seguintes parâmetros:

- E_2 : tensão induzida por fase no rotor parado
- R_2 : resistência do circuito do rotor por fase
- L_2 : indutância de dispersão do rotor por fase

A corrente corrente no rotor pode ser escrita como

$$I_2 = \frac{sE_2}{R_2 + jsX_2} = \frac{E_2}{(R_2/s) + jX_2}$$

Essa igualdade permite usar o circuito equivalente (c) da Figura 37⁴. A diferença é que o circuito (b) está

⁴ R_2/s depende da carga mecânica: n diminui $\rightarrow s$ aumenta $\rightarrow R_2/s$ diminui $\rightarrow I_2$ aumenta $\rightarrow T$ aumenta.

na frequência de escorregamento f_2 , enquanto o circuito (c) está na frequência de linha f_1 .

A equação

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + \frac{R_2}{s}(1 - s)$$

motiva o circuito equivalente (d) na Figura 37.

Os cálculos de potência ficam:

$$P_{Cu} = I_2^2 R_2 = s P_{gap}$$

$$P_{mec} = I_2^2 \frac{R_2}{s} (1 - s) = (1 - s) P_{gap}$$

$$P_{rotor} = P_{gap} = I_2^2 \frac{R_2}{s} = \frac{P_2}{s} = P_{Cu} + P_{mec}$$

P_{gap} indica a potência transferida do rotor para o estator pelo entreferro, que inclui as perdas no cobre P_{Cu} e a potência mecânica desenvolvida P_{mec} ⁵.

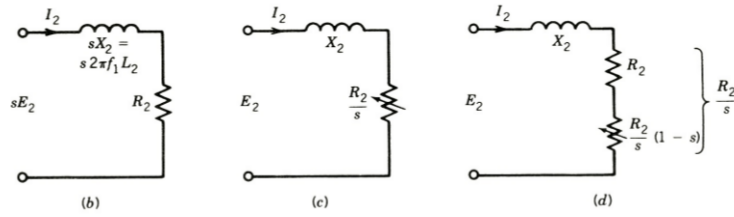


Figura 37: Circuitos equivalentes para o rotor.

Circuito equivalente completo Os circuitos do estator e do rotor nas versões (c) ou (d) estão na mesma frequência f_1 , portanto podem ser juntados. As tensões E_1 e E_2 podem ser diferentes devido ao número de enrolamentos. Definimos portanto a razão de enrolamento $a = N_1/N_2$. Como esperado, o circuito é igual ao de um transformador.

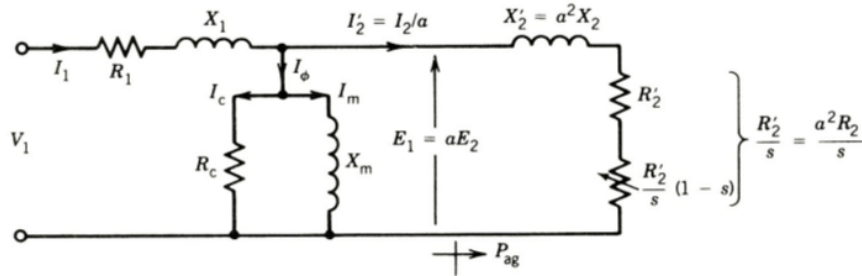


Figura 38: Circuitos equivalente completo para máquina de indução.

3.7.1 Configurações de circuito equivalente

Circuito equivalente aproximado Se a queda de tensão sobre $Z_1 = R_1 + jX_1$ é pequena e $V_1 \approx E_1$, podemos mover o ramo de magnetização, resultando na aproximação 1 (Figura 39).

Se a máquina de indução é conectada a uma fonte de tensão e frequência constantes, a perda no cobre do estator é fixa. De fato, a soma das perdas no cobre e perdas friccionais é aproximadamente constante para qualquer velocidade. Dessa forma, essas perdas podem ser agrupadas no termo de perdas rotacionais e R_c pode ser removido do circuito, resultando na aproximação 2 (Figura 40).

Circuito equivalente recomendado pelo IEEE Nesse modelo, a reatância de magnetização X_m permanece em seu lugar, a resistência de perdas R_c é omitida e as perdas no cobre são agrupadas com perdas rotacionais. Esse circuito é preferível quando as tensões V_1 e E_1 têm diferença apreciável, i.e., a queda de tensão em $Z_1 = R_1 + jX_1$ é considerável.

⁵Potência mecânica = perdas rotacionais + carga.

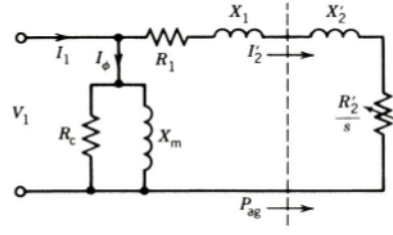


Figura 39: Aproximação do circuito equivalente 1.

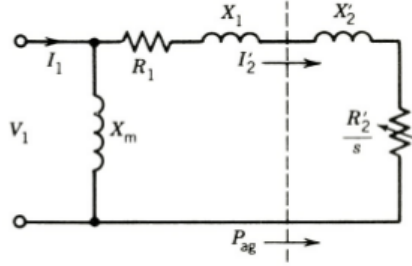


Figura 40: Aproximação do circuito equivalente 2.

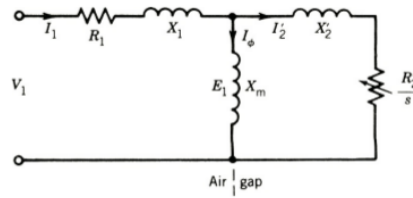


Figura 41: Aproximação recomendada pelo IEEE.

3.7.2 Equivalente de Thévenin

Para simplificar os cálculos, pode ser utilizado o equivalente de Thévenin.

Tensão de Thévenin:

$$V_{th} = V_1 \frac{X_m}{[R_1^2 + (X_1 + X_m)^2]^{1/2}}$$

Se $R_1^2 \ll (X_1 + X_m)^2$, então $V_{th} \approx \frac{X_m}{X_1 + X_m} V_1$.

Impedância de Thévenin:

$$Z_{th} = jX_m \parallel (R_1 + jX_1) = \frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)} = R_{th} + jX_{th}$$

Se $R_1^2 \ll (X_1 + X_m)^2$, $R_{th} \approx \left(\frac{X_m}{X_1 + X_m}\right)^2 R_1$. Como $X_1 \ll X_m$, $X_{th} \approx X_1$.

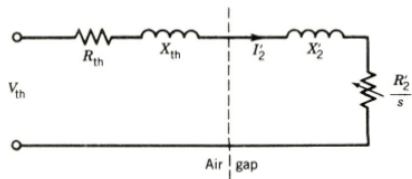


Figura 42: Circuito equivalente de Thévenin.

3.8 Ensaio em vazio, com rotor bloqueado e parâmetros de circuito equivalente

É possível obter os parâmetros R_c , X_m , R_1 , X_1 , X_2 , R_2 de uma máquina de indução, medindo a resistência CC do rotor (R_1) e realizando ensaios em vazio e com rotor bloqueado.

Ao medir a resistência CC entre dois terminais, é preciso calcular R_1 dependendo da ligação trifásica (delta ou estrela).

$$R_{1Y} = \frac{R_{med}}{2} \text{ ou } R_{1\Delta} = \frac{3R_{med}}{2}$$

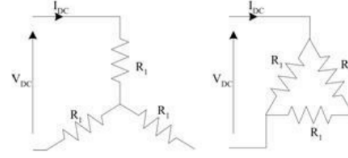


Figura 43: Resistência CC para ligação delta e estrela.

O *ensaio em vazio* dá informações sobre a corrente de excitação e perdas rotacionais. Nesse teste, tensões trifásicas são aplicadas no estator à frequência nominal. O rotor é mantido desacoplado de qualquer carga. A velocidade é próxima da síncrona (baixo escorregamento). Medem-se tensão de linha, corrente de fase e potência trifásica (ligação estrela).

$$\begin{aligned} |V_{fNL}| &= \frac{|V_{lNL}|}{\sqrt{3}} \\ Z_{NL} &= \frac{|V_{fNL}|}{|I_{fNL}|} \\ R_{NL} &= \frac{P_{NL}}{3|I_{NL}|^2} \\ X_{NL} &= \sqrt{Z_{NL}^2 - R_{NL}^2} = X_1 + X_m \\ P_{rot} &= P_{NL} - 3I_{fNL}^2 R_{NL} \end{aligned}$$

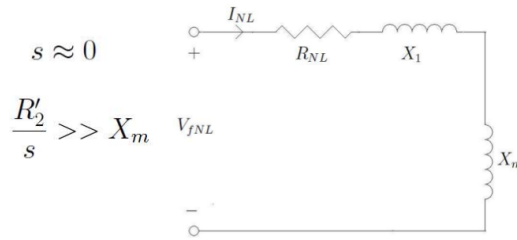


Figura 44: Circuito equivalente do ensaio em vazio.

O *ensaio com rotor bloqueado* dá informação sobre impedâncias de dispersão. O rotor é bloqueado e tensões trifásicas são aplicadas no estator, de forma a obter corrente nominal. Deve ser realizado com frequência igual à que será utilizadas na operação normal⁶. A velocidade é nula (escorregamento unitário). Medem-se tensão de linha, corrente de fase e potência trifásica (ligação estrela).

$$\begin{aligned} |V_{fBL}| &= \frac{|V_{lBL}|}{\sqrt{3}} \\ Z_{BL} &= \frac{|V_{fBL}|}{|I_{fBL}|} \\ R_{BL} &= \frac{P_{BL}}{3|I_{BL}|^2} \\ X_{BL} &= \sqrt{Z_{BL}^2 - R_{BL}^2} = X_1 + X'_2 \\ X_{BL} \frac{f_{nom}}{f_{BL}} &\approx X_1 + X'_2 \end{aligned}$$

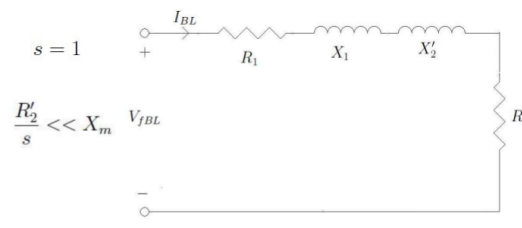


Figura 45: Circuito equivalente do ensaio com rotor bloqueado.

Após determinar X_1 e X'_2 :

$$X_m = X_{NL} - X_1$$

$$R'_2 = R_{BL} - R_1$$

Em resumo:

Parâmetro	Obtenção
R_1	Medição com ohmímetro
X_1	Ensaio de rotor bloqueado
X'_2	Ensaio de rotor bloqueado
X_m	Ensaio em vazio (com dados de X_1)
R'_2	Resistência do ensaio de rotor bloqueado e parâmetros acima

Obs.: Para obter R'_2 de modo mais preciso, pode-se utilizar

$$R'_2 \approx \left(\frac{X'_2 + X_m}{X_m} \right)^2 (R_{BL} - R_1)$$

3.9 Características de desempenho

Torque O torque mecânico desenvolvido é

$$T_{mec} = \frac{P_{mec}}{\omega_{mec}} = \frac{R_2 I_2^2 (1-s)}{s \omega_{mec}} = \frac{R'_2 I_2'^2 (1-s)}{s \omega_{mec}}$$

Mas $\omega_{mec} = (1-s)\omega_{sin}$

Do circuito com equivalente de Thévenin:

$$I_2' = \frac{V_{th}}{\sqrt{(R_{th} + R'_2/s)^2 + (X_{th} + X'_2)^2}}$$

Portanto⁷:

$$T_{mec} = \frac{1}{\omega_s} \frac{V_{th}^2}{(R_{th} + R'_2/s)^2 + (X_{th} + X'_2)^2} \frac{R'_2}{s}$$

- Para baixos valores de s ($\omega_m \approx \omega_s$), o torque varia linearmente com o escorregamento.

$$T_{mec} \approx \frac{V_{th}^2}{\omega_{sin} R'_2} s$$

- Para altos valores de s (ω_m pequeno), o torque varia inversamente com o escorregamento.

$$T_{mec} \approx \frac{V_{th}^2 R'_2}{\omega_s (X_{th} + X'_2)^2 s}$$

- A máquina tem torque nulo na velocidade síncrona.

⁶O IEEE recomenda frequência de 25% do valor nominal.

⁷No caso de máquinas trifásicas, o valor deve ser multiplicado por três para obter o torque total desenvolvido.

- O torque máximo ocorre para $\frac{\partial T_{mec}}{\partial s} = 0$, que representa casamento de impedância entre carga e fonte.

$$s_{max} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X'_2)^2}}, \quad T_{max} = \frac{V_{th}^2}{2\omega_s [R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X'_2)^2}]}$$

- O torque máximo não depende da resistência do rotor R_2 , mas a velocidade de torque máximo depende. Em uma máquina de rotor bobinado, uma resistência variável externa pode ser ligada ao rotor para controlar a velocidade em que ocorre torque máximo.

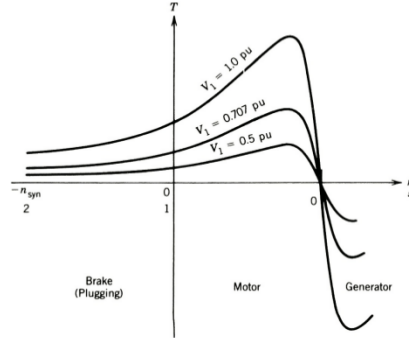


Figura 46: Característica torque-velocidade para máquina de indução.

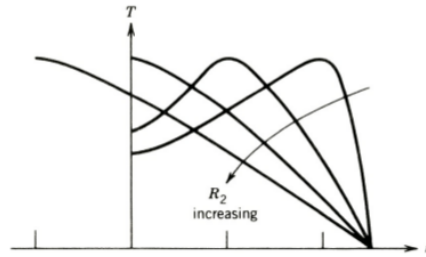


Figura 47: Característica torque-velocidade para diferentes valores de R_2 .

Corrente do estator Do modelo equivalente IEEE, temos que

$$Z_1 = R_1 + jX_1 + X_m \parallel (R'_2/s + jX'_2) = |Z_1| \angle \theta_1$$

A corrente no estator é

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_1} = I_\phi + I'_2$$

- Em velocidade síncrona, $s = 0$, $R'_2/s \rightarrow \infty$ e $I'_2 = 0$.
- Para escorregamento alto, $Z'_2 = R'_2/s + jX'_2$ é baixo, logo I'_2 e I_1 são altos (corrente de partida de 5 a 8 vezes valor nominal).

Fator de potência O fator de potência é dado pelo cosseno do ângulo

$$f_p = \cos \theta_1$$

em que θ_1 é o ângulo fasorial entre I_1 e V_1 , que é o mesmo ângulo da impedância equivalente vista da fonte do circuito do IEEE ($Z_1 = |Z_1| \angle \theta_1$).

$$\cos \theta_1 = \frac{R_{th} + R'_2/s}{\sqrt{(R_{th} + R'_2/s)^2 + (X_{th} + X'_2)^2}}$$

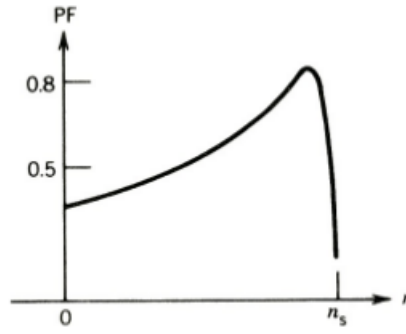


Figura 48: Variação do fator de potência com a velocidade n .

Rendimento Para calcular o rendimento da máquina de indução, devem ser consideradas as diversas fontes de perdas.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

- Para uma máquina trifásica, a potência de entrada é

$$P_{in} = 3V_1 I_1 \cos \theta_1$$

- A perda no enrolamento do estator é

$$P_1 = 3I_1^2 R_1$$

- Existem perdas no núcleo do estator por histerese e correntes parasitas (R_c).
- A potência restante P_{gap} atravessa o entreferro. Parte dela é perdida na resistência do rotor⁸:

$$P_2 = 3I_2^2 R_2$$

- Potência é dissipada no núcleo do rotor, em função da frequência f_2 . Essas perdas são normalmente desconsideradas.
- A potência restante é a potência mecânica, que será convertida em perdas rotacionais e a potência de saída de fato para o eixo P_{out} .

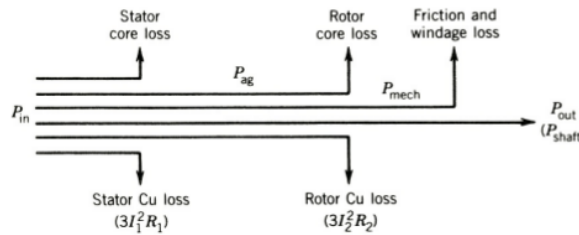


Figura 49: Fluxo de potência no motor de indução.

O rendimento depende do escorregamento. Se considerarmos apenas as perdas na resistência do rotor, temos:

$$P_{gap} = P_{in}, \quad P_2 = sP_{gap}, \quad P_{out} = P_{mec} = P_{gap}(1 - s)$$

$$\therefore \eta_{ideal} = 1 - s$$

O rendimento η_{ideal} é chamado eficiência ideal ou eficiência interna, pois representa a razão entre potência de saída e potência no entreferro.

Em regime, a máquina de indução deve operar com baixo escorregamento para obter rendimento e fator de potência elevados. Ela opera sempre à direita do valor de máximo, por motivos de estabilidade.

⁸No caso de rotor bobinado, R_2 inclui resistências externas.

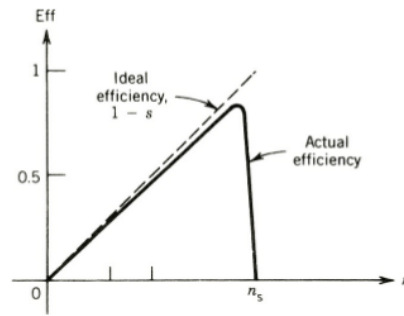


Figura 50: Eficiência como função da velocidade n .

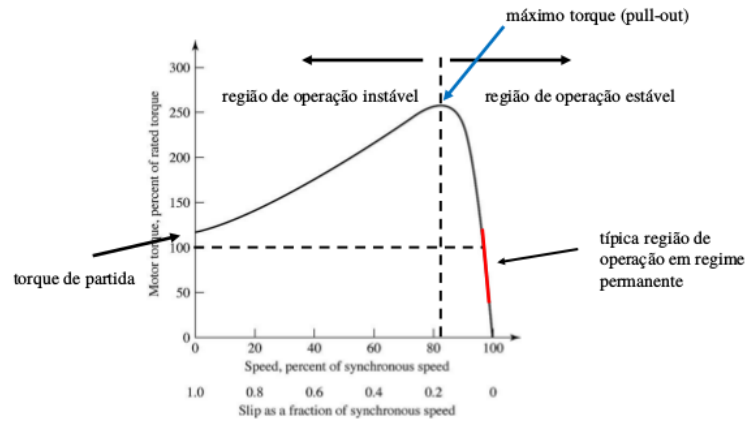


Figura 51: Região de operação da máquina de indução.

3.10 Fluxo de potência nos três modos de operação

Operação como motor A energia é retirada da rede, atravessa o entreferro no sentido do estator para o rotor e é transmitida para a carga mecânica. Escorregamento positivo e menor que 1.

$$P_{gap} > 0, \quad P_{mec} > 0, \quad P_{Cu} > 0, \quad 0 \leq s < 1$$

Operação como gerador A energia é retirada do rotor, atravessa o entreferro do rotor para o estator e é transmitida para a carga elétrica. Escorregamento negativo.

$$P_{gap} < 0, \quad P_{mec} < 0, \quad P_{Cu} > 0, \quad s < 0$$

Modo frenante O rotor gira com sentido oposto ao campo girante. A máquina retira energia da rede e da carga mecânica (energia cinética) ao mesmo tempo. Escorregamento maior que 1. A energia é dissipada em R_1 , R_2 e perdas rotacionais.

$$P_{gap} > 0, \quad P_{mec} < 0, \quad P_{Cu} > 0, \quad s > 1$$

3.11 Controle de velocidade

Técnicas para controlar a velocidade do motor de indução:

- Mudança no número de polos
- Controle da resistência do rotor (resistência externa)
- Motor de indução duplamente alimentado
- Controle da tensão de alimentação
- Controle pela variação de frequência

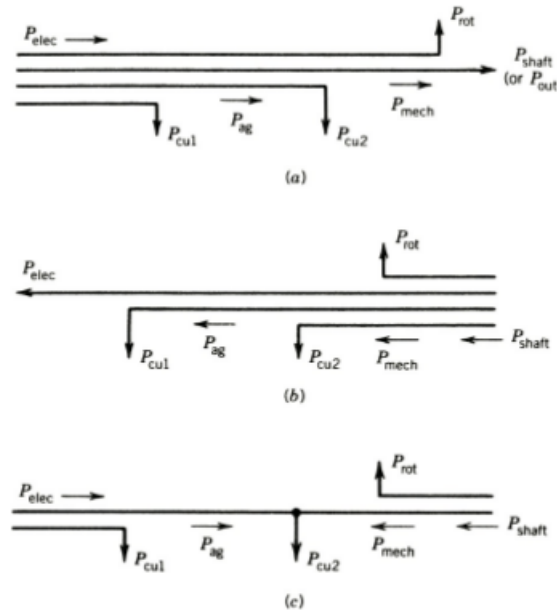


Figura 52: Fluxo de potência nos três modos: (a) motor, (b) gerador, (c) frenante.

3.12 Métodos para redução de corrente de partida

Partida com tensão reduzida (motores com rotor gaiola de esquilo):

- Autotransformador de partida
- Chave estrela-triângulo
- Chave de partida eletrônica (soft-starter)
- Conversor eletrônico com tensão e frequência variável

Partida com resistor de limitação de corrente:

- Resistor em série com o estator (rotor em gaiola de esquilo)
- Resistor em série com o rotor (rotor bobinado)

3.13 Motor de indução linear

O motor de indução pode ser modificado para realizar um movimento translacional.

Velocidade de campo deslizante:

$$V_t = 2T_p f (m/s)$$

em que T_s é o tamanho do passo polar (distância entre dois pólos da onda deslizante).

O escorregamento é dado por

$$s = \frac{v_s - v}{v_s}$$

A força de propulsão é dada por

$$F = \frac{P}{v} = \frac{2R'_2 |I'_2|^2}{sv_s} (N)$$

Aplicação típica: transportes (trens).

4 Máquinas síncronas

Máquinas síncronas são caracterizadas por terem o campo girante do entreferro e o rotor girando à mesma velocidade, chamada velocidade síncrona.

- Uso como gerador: é o principal uso (*geradores síncronos* ou *alternadores*). Amplamente usadas como geradores de energia elétrica em usinas hidrelétricas, nucleares ou termoeletricas.

- Uso como motor: aplicações que demandam velocidade constante com carga variável. Máquinas síncronas são duplamente excitadas: os polos do rotor são excitados em CC e os enrolamentos do estator são conectados a fonte CA. Esse controle independente permite que ele opere com fator de potência atrasado ou adiantado, consumindo ou gerando potência reativa⁹. Uma máquina síncrona operando em vazio é chamada *condensador síncrono* e pode ser usado em sistemas de transmissão para controlar a tensão. Na indústria, motores síncronos operam sobre-excitados, com fator de potências capacitivo para compensar o fator de potência total.

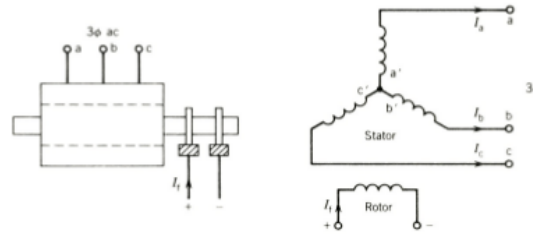


Figura 53: Estrutura básica de uma máquina síncrona.

4.1 Construção de máquinas síncronas trifásicas

Enrolamentos no estator e rotor:

- O *estator* contém o enrolamento de *armadura*. É conectado a uma fonte CA e possui enrolamentos trifásicos distribuídos de modo semelhante à máquina de indução: enrolamentos separados de 120° geométricos, percorridos por tensão defasada de 120° elétricos.
- O *rotor* contém o enrolamento de *campo* e é conectado a uma fonte CC através de escovas deslizantes sobre anéis coletores. A corrente que circula no rotor produz um campo magnético unidirecional no entreferro.

Princípio básico de funcionamento:

- Motor: quando o estator é energizado com tensões trifásicas, criando um campo girante, e o rotor é energizado por fonte CC, os dois campos tendem a se alinhar, fazendo o rotor girar.
- Gerador: quando o rotor gira, acionado por uma turbina, o enrolamento de armadura é concatenado por um campo girante, que induz tensão variável trifásica em seus terminais.

Máquinas síncronas podem ser divididas em dois grupos:

1. Máquinas de alta velocidade com pólos lisos (rotor cilíndrico): têm poucos pólos, diâmetro pequeno, comprimento grande, eixo horizontal. O campo senoidal é criado devido pela distribuição das bobinas no rotor. Usadas em termelétricas (baixa inércia).
2. Máquinas de baixa velocidade com pólos salientes - têm muitos pólos, diâmetro grande, comprimento pequeno, eixo vertical. O campo senoidal é criado devido ao entreferro variável. Usadas em hidrelétricas (alta inércia).

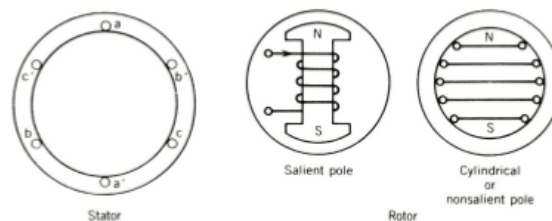


Figura 54: Tipos de pólos (saliente e cilíndrico) em máquinas síncronas.

⁹O fator de potência de máquinas síncronas pode ser controlado alterando a corrente de campo.

4.2 Geradores síncronos

Quando a corrente I_f passa pelo enrolamento do rotor, gera uma distribuição de fluxo senoidal no entreferro. Se o rotor é posto em rotação por um torque externo, um campo girante surge no entreferro, chamado *campo de excitação*. O fluxo girante será concatenado nos enrolamentos de armadura e produzirá tensões induzidas (*tensões de excitação*) no enrolamento do estator, de mesma amplitude e defasadas de 120° .

A velocidade do rotor n (rpm) e a frequência da tensão induzida f (Hz) estão relacionadas pelo número de polos p da máquina:

$$f = \frac{120n}{p}$$

A tensão de excitação (RMS) E_f é dada por

$$E_f = 4,44f\Phi_f N K_w$$

em que Φ_f é o fluxo por polo devido a I_f , N é o número de espiras por fase e K_w é o fator de enrolamento.

Portanto, $E_f \propto n\Phi_f$, i.e., a tensão de excitação é proporcional à velocidade da máquina e ao fluxo de excitação (que depende da corrente de excitação). A variação de E_f com I_f é mostrada na *característica de circuito aberto*¹⁰ ou *característica de magnetização* da máquina. A região linear da curva é chamada *linha de entreferro*. A tensão induzida em $I_f = 0$ se deve a magnetismo residual.

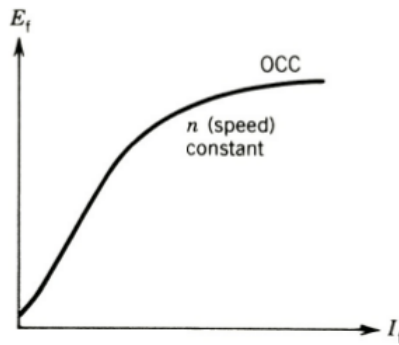


Figura 55: Característica de circuito aberto ou característica de magnetização da máquina síncrona.

Se os terminais do estator forem conectados a uma carga trifásica, circulará uma corrente I_a , que tem a mesma frequência que E_f . Essa corrente também estabelecerá um campo girante no entreferro (reação de armadura). Assim, o fluxo resultante Φ_r é a soma do fluxo Φ_f , devido a I_f com Φ_a , devido a I_a ¹¹.

$$\Phi_r = \Phi_f + \Phi_a$$

Os fluxos componentes e resultante giram à mesma velocidade e o diagrama fasorial é mostrado a seguir. O fluxo Φ_f está adiantado em relação a E_f de 90° . E o fluxo Φ_a está atrasado de θ .

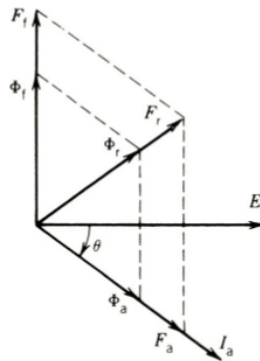


Figura 56: Diagrama fasorial.

¹⁰OCC - open-circuit characteristic.

¹¹Assumindo que não ocorra saturação.

4.2.1 Rede interligada

Geradores síncronos normalmente são usados para alimentar uma rede interligada. Devido ao grande número de geradores conectados, tensão e frequência da rede permanecem aproximadamente constantes. Vantagens: vários geradores podem atender a uma grande carga, aumento da confiabilidade, um ou mais geradores podem ser desligados para manutenção sem causar a interrupção total da demanda da carga, maior eficiência etc. A transmissão de energia normalmente é feita em alta tensão.

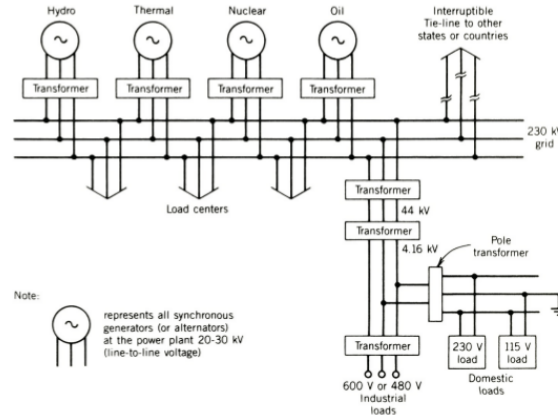


Figura 57: Rede interligada.

Em uma usina, geradores são conectados e desconectados de acordo com a demanda da rede. A operação de conexão de geradores à rede é chamada *sincronização*. Para que isso ocorra, ambos devem ter mesma tensão, frequência, sequência de fase e fase. Essas condições podem ser verificadas com um *sincroscópio*. A posição do indicador mostra a diferença de fase entre tensões da máquina e da rede.

Também pode ser usado uma montagem experimental com *lâmpadas de sincronismo*. A máquina primária pode ser um motor CC ou de indução e ajustar a velocidade de rotação de forma que a frequência obtida seja igual à da rede. A corrente de campo da máquina síncrona é ajustada para que as tensões V_1 e V_2 sejam iguais. Se a sequência de fase estiver correta, todas as lâmpadas apresentarão mesmo brilho. Vamos examinar o que ocorre se as condições não são satisfeitas.

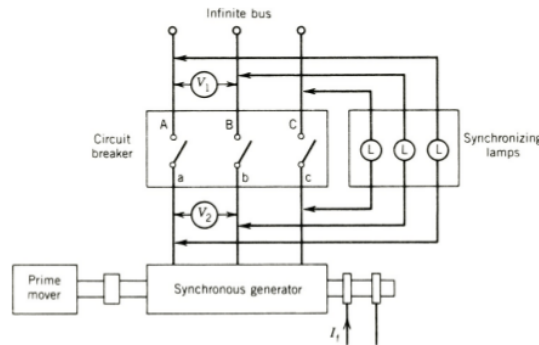
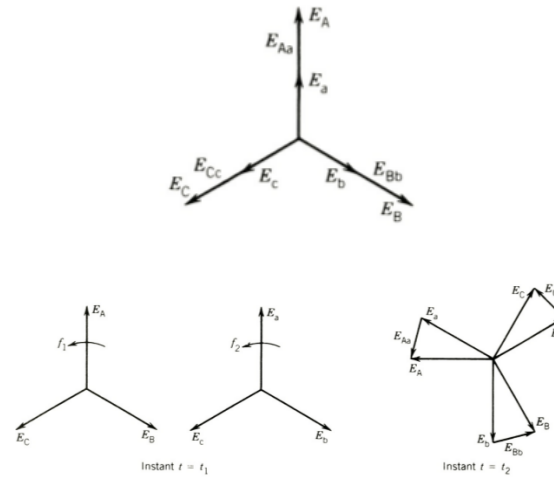


Figura 58: Lâmpadas de sincronização.

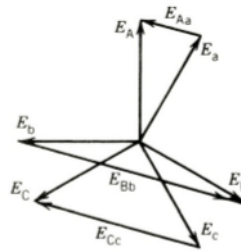
Notação:

- E_A, E_B, E_C representam tensões fasoriais da rede
- E_a, E_b, E_c representam tensões fasoriais do gerador síncrono
- E_{Aa}, E_{Bb}, E_{Cc} representam tensões fasoriais das lâmpadas, proporcionais a seu brilho

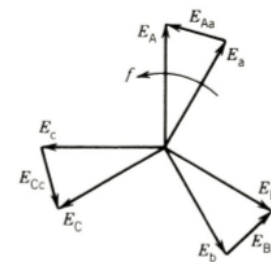
1. *Tensões diferentes, frequência e sequência de fase iguais* - os dois conjuntos de fasores giram à mesma velocidade. As tensões das lâmpadas têm mesma magnitude. Basta ajustar a corrente I_f para fazer as tensões iguais.
2. *Frequências diferentes, tensões e sequência de fase iguais* - os dois conjuntos de fasores giram a diferentes velocidades. Em $t = t_1$, a tensão nas lâmpadas é zero. Em $t = t_2$, as lâmpadas têm mesma intensidade. As lâmpadas vão acender e apagar alternadamente. Deve-se ajustar a velocidade da máquina e I_f para manter as tensões iguais.



3. *Sequência de fase diferente, tensões e frequência iguais* - as tensões nas lâmpadas serão diferentes e elas terão brilhos diferentes. Para ajustar a sequência de fase, troca-se a conexão de dois terminais.



4. *Fase diferente, tensões, frequência e sequência de fase iguais* - as lâmpadas brilharão com mesma intensidade. Para anular a diferença de fase, a frequência da máquina síncrona é levemente alterada. Quando as fases forem iguais, as lâmpadas se apagarão e a máquina é conectada à rede. Uma vez que isso ocorre, sua velocidade não pode mais ser alterada. Mas a potência real transferida da máquina para a rede pode ser controlada ajustando a potência da máquina primária. O fator de potência pode ser alterado controlando a corrente de campo.



4.3 Motores síncronos

Motores síncronos não têm torque de partida. Se os enrolamentos de campo e armadura forem corretamente alimentados, em vez de girar, a máquina apenas vibra. Por exemplo, se em $t = 0$ os polos do rotor estão como indicado, o rotor vai sofrer um torque no sentido horário. Em $t = t_1$, os polos do estator giraram meia volta e o rotor ainda não vai ter se deslocado muito, devido à sua inércia. Nesse instante, ele sofrerá torque anti-horário. Assim, em uma revolução do estator, o torque médio sobre o rotor é nulo. O campo do estator gira a uma velocidade tão alta que o rotor não consegue acompanhar. Dois métodos de partida são descritos a seguir.

Partida com fonte de frequência variável Usando um conversor de frequência, a frequência da fonte pode ser aumentada gradualmente, de forma que o rotor consiga acompanhar a velocidade de rotação do campo do estator. Conversores de frequência são caros. Se a máquina tiver que operar em diferentes velocidades, esse método pode ser usado.

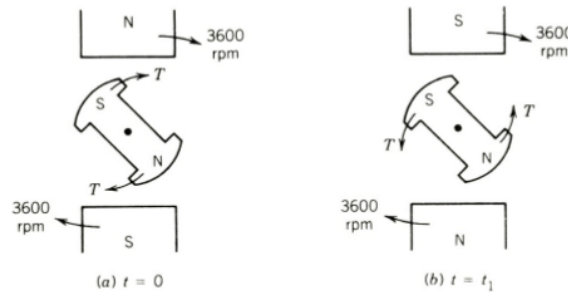


Figura 59: Torque no rotor da motor síncrono.

Partida como motor de indução O motor pode ser partido como motor de indução. Para isso, um enrolamento adicional - semelhante a uma gaiola da máquina de indução - é montado no rotor (*damper* ou *enrolamento amortecedor*).

1. No início, o enrolamento de campo do motor não é excitado. Os terminais do motor são conectados a uma fonte CA e a máquina parte como um motor de indução (correntes são induzidas no enrolamento amortecedor).
2. Quando o rotor está próximo da velocidade síncrona, seus terminais são alimentados por fonte CC e ele passará a girar junto com o campo do estator, em velocidade síncrona.
3. Na velocidade síncrona, se ocorre perturbação na velocidade do rotor, correntes são induzidas no enrolamento amortecedor, que produz um torque restaurador, recuperando a velocidade síncrona.

4.4 Modelo de circuito equivalente

Apresentamos um modelo de circuito equivalente por fase para regime estacionário.

- *Reatância síncrona*: $X_s = X_{ar} + X_{al}$
- *Impedância síncrona*: $Z_s = R_a + jX_s$

A corrente de campo I_f produz um fluxo Φ_f no estator, em quadratura com o eixo direto. A corrente de armadura I_a produz um fluxo Φ_a , que se divide em: fluxo concatenado Φ_{al} (concatena somente com estator e não com o enrolamento de campo - menor parte) e fluxo de reação de armadura Φ_{ar} (estabelecido no entreferro, concatena com o enrolamento de campo - maior parte). O fluxo resultante no entreferro é $\Phi_r = \Phi_f + \Phi_{ar}$. Cada componente induz uma tensão no enrolamento do estator, logo:

$$E_f = -E_{ar} + E_r = I_a jX_{ar} + E_r$$

- A *resistência efetiva* modela os efeitos da temperatura de operação e do efeito pelicular causado pela corrente alternada¹².
- A *reatância síncrona* X_s leva em conta a *reatância de reação de armadura* ou *reatância de magnetização* X_{ar} e a *reatância concatenada* X_{al} .

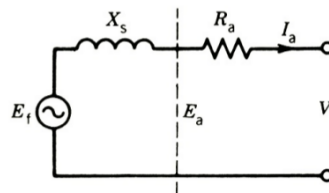


Figura 60: Circuito equivalente da máquina síncrona.

Obs.: Através do equivalente de Norton, é possível usar uma forma alternativa, com uma fonte de corrente $I'_f = \frac{E_f}{X_s}$.

¹²Em geral, essa resistência é 1,6 vezes a resistência CC.

4.4.1 Determinação da reatância síncrona X_s

Para determinar a reatância síncrona X_s , são realizados dois testes.

- No *teste com circuito aberto*, a máquina é operada em velocidade síncrona e a tensão de circuito aberto $V_t = E_f$ é medida ao variar a corrente de campo I_f . A curva $E_f \times I_f$ é chamada característica de circuito aberto (OCC) e tem o formato da curva de magnetização. A reta que passa pela região linear é chamada linha de entreferro.
- No *teste de curto-circuito*, os terminais são curto-circuitados e mede-se a variação da corrente I_a com I_f , obtendo a característica de curto-circuito (SCC), que é uma reta.

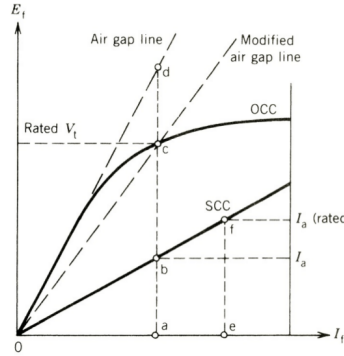


Figura 61: Características de circuito aberto (OCC) e de curto-circuito (SCC).

Na condição de curto-circuito, como $R_a \ll X_s$, a corrente I_a está atrasada em relação a E_f de quase 90° . A FMM da reação de armadura F_a se opõe à FMM do campo F_f e a resultante F_r é pequena, de modo que não ocorre saturação.

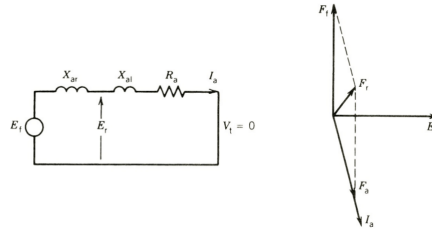


Figura 62: Operação em curto-circuito.

Reatância não-saturada Para um valor de I_f , mede-se o valor na linha de entreferro e a corrente na característica SCC.

$$Z_{s(unsat)} = \frac{E_{da}}{I_{ba}} = R_a + jX_{s(unsat)}$$

Reatância saturada Para levar em conta o efeito da saturação, usa-se uma linha de entreferro modificada, que passa pelo ponto de operação.

$$Z_{s(sat)} = \frac{E_{ca}}{I_{ba}} = R_a + jX_{s(sat)}$$

4.4.2 Diagrama fasorial (por fase)

Operação como gerador ($\delta > 0, P > 0$):

$$E_f = V_t + I_a R_a + I_a j X_s = |E_f| \angle \delta$$

Operação como motor ($\delta < 0, P < 0$):

$$E_f = V_t + I_a R_a + I_a j X_s = |E_f| \angle -\delta$$

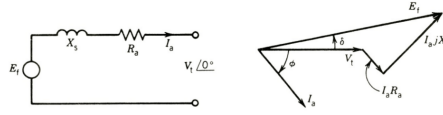


Figura 63: Diagrama fasorial como gerador.

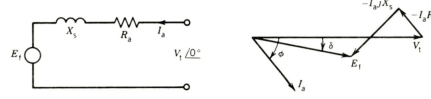


Figura 64: Diagrama fasorial como motor.

4.5 Características de potência e torque

Uma máquina síncrona normalmente está ligada a uma rede de tensão constante e opera com velocidade constante. Há um limite para a potência que um gerador síncrono pode fornecer à rede e para o torque que pode ser aplicado a um motor síncrono sem que este perca o sincronismo. Considere o circuito monofásico equivalente da Figura 60, onde

$$\begin{aligned} E_f &= |E_f| \angle \delta \\ V_t &= |V_t| \angle 0 \\ Z_s &= R_a + jX_s = |Z_s| \angle \theta_s \end{aligned}$$

A potência monofásica é $S = V_t I_a^*$. Podemos deduzir as seguintes relações por fase:

$$\begin{aligned} I_a^* &= \frac{|E_s|}{|Z_s|} \angle (\theta_s - \delta) - \frac{|V_t|}{|Z_s|} \angle \theta_s \\ S &= \frac{|V_t| |E_f|}{|Z_s|} \angle (\theta_s - \delta) - \frac{|V_t|^2}{|Z_s|} \angle \theta_s \end{aligned}$$

lembrando que $P = \Re\{S\}$ e $Q = \Im\{S\}$. Considerando $R_a \ll X_s$, temos $Z_s = X_s \angle 90^\circ$, donde

$$\begin{aligned} P_{3\phi_{\max}} &= \frac{3|V_t| |E_f|}{|X_s|} \\ P_{3\phi} &= \frac{3|V_t| |E_f|}{|X_s|} \sin \delta \\ Q_{3\phi} &= \frac{3|V_t| |E_f|}{|X_s|} \cos \delta - \frac{3|V_t|^2}{|X_s|}. \end{aligned}$$

Como as perdas no estator são desprezadas nessa análise, a potência nos terminais é igual à potência no entreferro. O torque desenvolvido pela máquina é então

$$T = \frac{P_{3\phi}}{\omega_{\text{syn}}} = \frac{3}{\omega_{\text{syn}}} \frac{|V_t| |E_f|}{X_s} \sin \delta = T_{\max} \sin \delta,$$

onde $\omega_{\text{syn}} = n_{\text{syn}}(2\pi/60)$.

A potência e o torque têm variação senoidal com δ , chamado *ângulo de potência* ou *ângulo de torque*. A máquina pode ser gradualmente carregada até o limite P_{\max} ou T_{\max} , conhecidos como *limites de estabilidade estática*. Após esse ponto ($\delta = 90^\circ$), a máquina perde sincronismo.

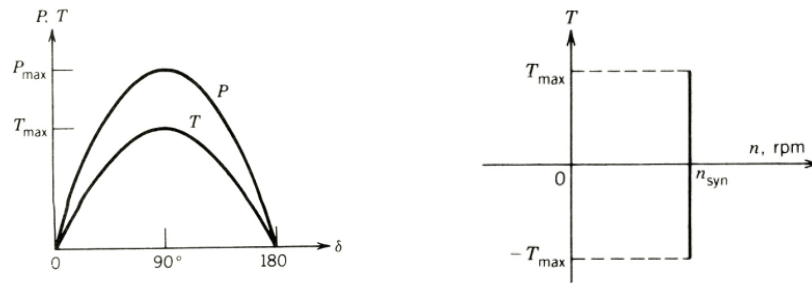


Figura 65: Potência e torque em função do ângulo δ e característica torque-velocidade.

Referências

- [1] SEN, P. C. *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. 3. ed. rev. New York, NY: John Wiley & Sons, 2013.