

15

MÁQUINAS ASSÍNCRONAS TEORIA

15.1 Aspectos construtivos

A Fig. 15.1 mostra a secção transversal da parte útil de uma máquina assíncrona enquanto que a Fig. 15.2 apresenta uma vista geral da máquina. Suas partes constitutivas são as seguintes:

Estator Constituído de chapas de ferro-silício laminado, com ranhuras uniformemente espaçadas onde estão alojados os condutores de um enrolamento polifásico (em geral trifásico), semelhante ao de uma máquina síncrona. Em máquinas normais, esta parte é fixa, podendo ser livre para girar em algumas máquinas especiais.

Rotor Constituído também de chapas de ferro-silício laminado, com ranhuras uniformemente distribuídas, onde estão alojados os condutores do enrolamento do rotor (também denominado de enrolamento rotórico). São dois os tipos de enrolamentos rotóricos.

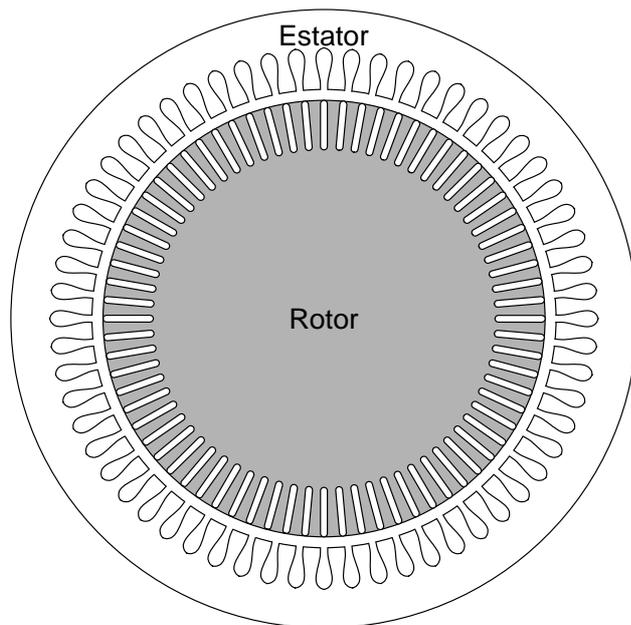


Fig. 15.1 Secção transversal de uma máquina assíncrona.

- O primeiro deles, presente em aproximadamente 95% das máquinas assíncronas, é construído com barras de material condutor, em geral alumínio, que preenchem as ranhuras do rotor em toda a sua extensão. As extremidades destas barras são curto-circuitadas por um anel condutor, perfazendo-se o que é convencionalmente denominado de **gaiola de esquilo**.

- A segunda forma construtiva do enrolamento rotórico de uma máquina assíncrona consiste em alojar-se nas ranhuras rotóricas um enrolamento polifásico (em geral trifásico) semelhante ao do estator e com o mesmo número de polos deste. Por esta razão, na extremidade do seu eixo são colocados anéis deslizantes, conectados aos terminais do enrolamento rotórico, para que através de escovas os mesmos possam ser acessados externamente.

Quando a máquina assíncrona opera como motor (sua forma mais comum de trabalho), o motor de gaiola de esquilo é denominado de **motor de indução de gaiola**, ao passo que na segunda forma construtiva o motor é denominado de **motor de indução de anéis**.

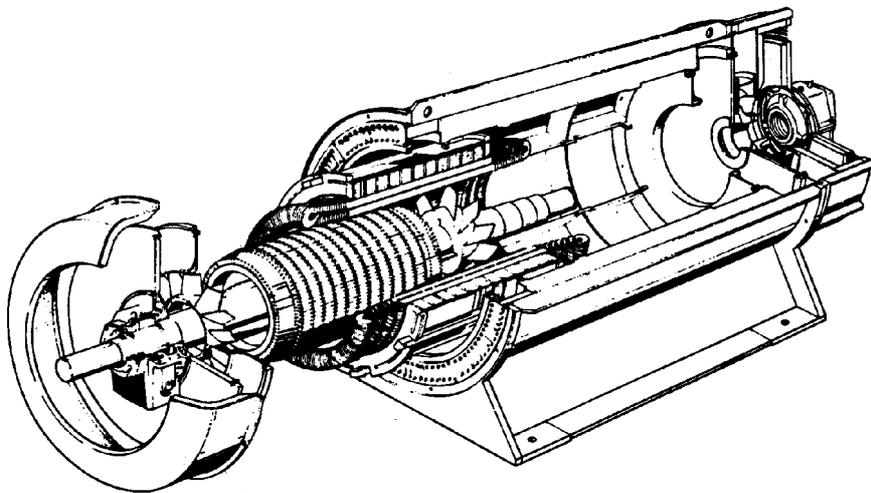


Fig. 15.2 Vista explodida de máquina assíncrona de gaiola de esquilo.

15.2 Princípio de funcionamento

A Fig. 15.3 mostra um estator elementar de uma máquina assíncrona, com seis ranhuras uniformemente espaçadas, onde estão alojadas 3 bobinas com o mesmo número de espiras, conectadas em ligação estrela (poderia ser em ligação triângulo). O rotor, nesta etapa do estudo, pode ser suposto como sendo um cilindro ferromagnético laminado desprovido de qualquer enrolamento.

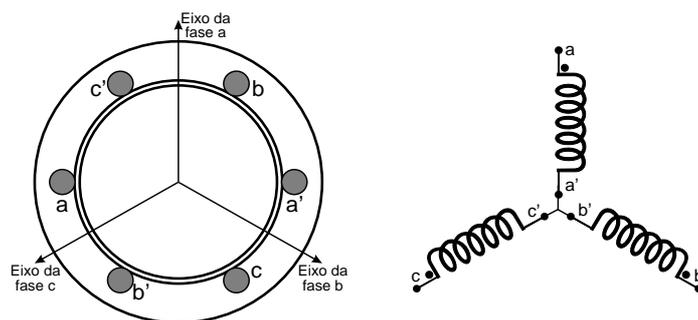


Fig. 15.3 Secção transversal de uma máquina assíncrona.

Suponhamos agora que as bobinas deste enrolamento sejam percorridas por correntes trifásicas equilibradas, isto é, correntes que tenham a mesma amplitude porém defasadas de 120° uma da outra. Temos portanto:

$$\begin{aligned} i_a(t) &= I_m \cos(\omega t) \\ i_b(t) &= I_m \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ i_c(t) &= I_m \cos(\omega t - 4\pi/3) \end{aligned} \tag{15.1}$$

Como já foi discutido em experiência anterior, este enrolamento, quando percorrido por estas correntes, produz uma distribuição de campo magnético (aproximadamente) senoidal no entreferro. Esta distribuição de campo gira ao redor do estator com uma rotação denominada de rotação síncrona, dada por:

$$n_s \left[\frac{\text{rotações}}{s} \right] = \frac{f_1 [\text{Hz}]}{p [\text{pares de polos}]} \tag{15.2}$$

onde f_1 é a frequência de alimentação
 p é o número de pares de polos do enrolamento.

A distribuição de campo magnético, no instante (t=0) em que a corrente pela fase A é máxima está mostrada na Fig. 15.4. Note que nos instantes seguintes esta mesma distribuição de campo se repete em posições diferentes do estator.

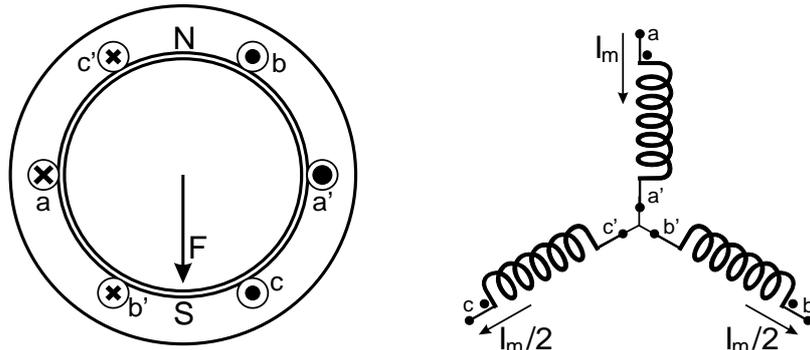


Fig. 15.4 Distribuição de campo magnético.

Suponhamos agora que um enrolamento trifásico, semelhante ao do estator, seja alojado nas ranhuras da superfície do rotor, como mostra a Fig. 15.5.

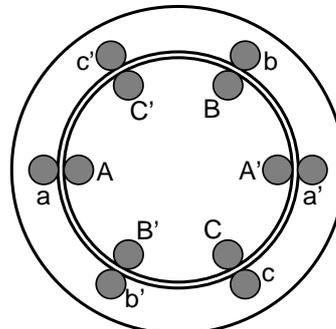


Fig. 15.5 Corte do motor mostrando de modo esquemáticos os enrolamentos do estator e rotor.

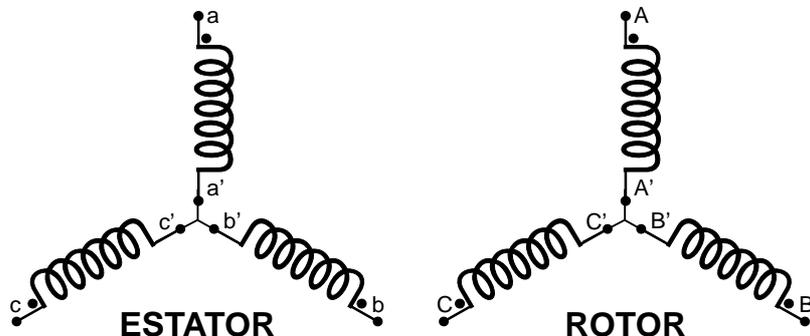


Fig. 15.6 Enrolamentos do estator e rotor.

Suponhamos que os terminais do rotor estejam em aberto e que o rotor esteja parado. Alimentando-se o enrolamento do estator com correntes trifásicas, o campo magnético produzido pelo estator será “visto” pelos condutores do rotor como um campo magnético rotativo girando a uma velocidade igual à rotação síncrona. Por esta razão, um condutor do rotor observa um máximo da onda de campo magnético passando por ele em uma frequência idêntica à do estator, provocando o aparecimento de uma tensão induzida na mesma frequência do estator. Note que este tipo de operação se assemelha muito a um transformador operando em vazio.

Suponhamos agora que os terminais do rotor sejam colocados em curto-circuito. Neste instante, correntes induzidas trifásicas aparecem no rotor. Face as diferenças construtivas existentes entre os dois enrolamentos (materiais, número de espiras, etc), as correntes do rotor estarão defasadas (no tempo, e por conseguinte, também no espaço - de um ângulo α) das correntes do estator, como é indicado na Fig. 15.7. Esta figura mostra a distribuição de correntes no estator e no rotor de uma máquina assíncrona com o rotor em curto-circuito. Nesta condição, a máquina assíncrona pode ser analisada como constituída de duas bobinas (rotativas) cujos eixos magnéticos estão desalinhados de um ângulo α .

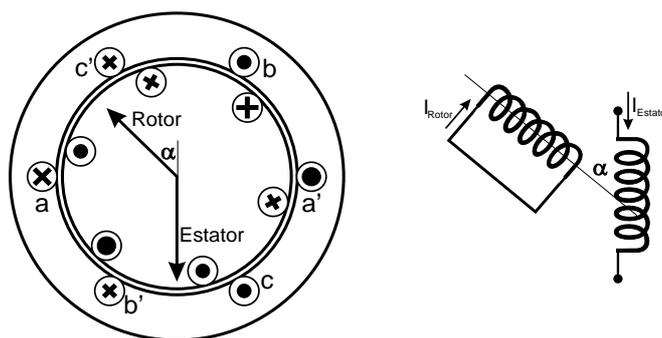


Fig. 15.7 Esquerda: distribuição de correntes no estator e rotor (correntes induzidas)..
 Direita: representação na forma de bobinas equivalentes deslocadas de ângulo α .

Pelo princípio do conjugado de mútua indutância, é desenvolvido um conjugado entre essas bobinas no sentido do alinhamento entre elas, de modo que o rotor começa a girar no sentido do campo girante. Desta forma, a máquina assíncrona se comporta como motor com conjugado de partida diferente de zero. Este conjugado de partida atua no sentido de levar o rotor a girar no mesmo sentido do campo girante estabelecido pelo estator.

15.3 Escorregamento

Saindo do repouso, o rotor atingirá uma rotação n [rpm].

Define-se nesta etapa uma grandeza denominada de escorregamento, que mede a velocidade relativa entre o campo girante e o rotor, como uma fração da rotação síncrona:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (15.3)$$

Esta grandeza é de fundamental importância na operação da máquina assíncrona e está diretamente associada à frequência das tensões induzidas no rotor. Como exemplo, suponhamos a máquina assíncrona de dois polos em análise, alimentada por correntes de frequência 60 Hz. Quando o rotor está parado, um condutor do rotor “enxerga” o máximo da onda de campo magnético passando por ele com uma frequência idêntica à das correntes do estator, ou seja, 60 vezes por segundo. Deste modo, a frequência da f.e.m. induzida no rotor é idêntica à frequência das correntes do estator, isto é, $f_2 = f_1$.

Suponhamos agora que o rotor está girando a uma rotação de 20 rotações por segundo (rps), no mesmo sentido do campo girante, correspondente a um escorregamento de $s = 2/3$. Neste caso, um condutor do rotor “enxerga” o máximo da onda de campo passando por ele 40 vezes por segundo, resultando no rotor uma f.e.m. induzida de frequência 40 Hz, ou seja, $2/3$ da frequência das correntes do estator. Assim sendo, para um escorregamento genérico, a frequência da f.e.m. rotórica f_2 é dada por:

$$f_2 = s f_1 \quad (15.4)$$

15.4 F.E.M induzidas

As f.e.m. induzidas no estator e rotor (à semelhança do transformador) são dadas por:

$$\text{Estator: } E_1 = 4.44 f_1 N_1 \Phi_M k_{e1} \quad (15.5)$$

$$\text{Rotor: } E_2 = 4.44 f_2 N_2 \Phi_M k_{e2} \quad (15.6)$$

onde Φ_M é o fluxo mútuo e (k_{e1}, k_{e2}) são os fatores que dependem dos enrolamentos do estator e rotor.

Na medida em que o rotor está em movimento, a f.e.m. induzida no rotor **difere** da tensão induzida quando o mesmo está parado, devido à mudança da frequência rotórica. Assim sendo, supondo o rotor em movimento (caracterizado por um dado escorregamento s) e lembrando que $f_2 = s f_1$, podemos escrever:

$$E_2 = 4.44 s f_1 N_2 \Phi_M k_{e2} = s (4.44 f_1 N_2 \Phi_M k_{e2}) = s E_2' \quad (15.7)$$

na qual $E_2' = 4.44 f_1 N_2 \Phi_M k_{e2}$ é a tensão induzida no enrolamento rotórico quando o rotor está travado.

Note que quando o rotor está parado ($n=0$), temos $s=1$, implicando f.e.m. induzida máxima no rotor. À medida que a rotação aumenta, o escorregamento diminui, com uma conseqüente redução da f.e.m. induzida no rotor (E_2). Esta redução na f.e.m. induzida no rotor ocasiona uma correspondente redução nas correntes induzidas no enrolamento rotórico.

No limite, quando a rotação se aproxima da rotação síncrona ($n \rightarrow n_s$), a f.e.m. induzida e a corrente do enrolamento rotórico tendem a zero, implicando produção de conjugado nulo. Como sempre existem atritos mecânicos em qualquer sistema, o motor de indução nunca opera precisamente na rotação síncrona.

15.5 Fluxo de potência no motor de indução

O motor elétrico de indução é um conversor eletromecânico de energia que converte parte da energia recebida da rede elétrica em energia mecânica disponível em seu eixo.

A diferença entre a energia mecânica disponível no eixo e a energia fornecida pela rede elétrica são as perdas oriundas da conversão de energia. Tais perdas podem ser classificadas em três tipos:

- a) Perdas Joule (rI^2), devidas à circulação de correntes nos enrolamentos do estator e do rotor.
- b) Perdas no material ferromagnético, que são as perdas por histerese e Foucault nas chapas laminadas do estator e do rotor, semelhante ao fenômeno presente nos transformadores.
- c) Perdas mecânicas, que estão associadas ao atrito existente nos rolamentos e com o ar, além da parcela de conjugado necessária para a ventilação do próprio motor.

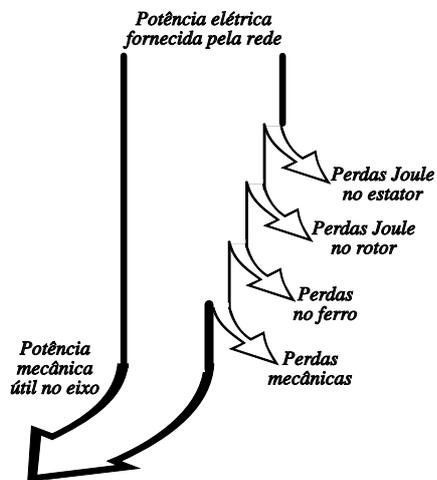


Fig. 15.8 Fluxo de potência em máquina assíncrona.

O rendimento do motor de indução é dado pela relação:

$$\text{Rendimento} = \frac{P_{\text{Mecânica}}}{P_{\text{Elétrica}}} \tag{15.8}$$

Máquinas de indução pequenas (da ordem de dezenas de HP) apresentam rendimentos na faixa de 70 a 85%, nas condições nominais de operação. Máquinas de maior potência podem atingir rendimentos consideráveis (até 95%), evidenciando a importância dos motores de indução nos acionamentos elétricos industriais. Tais qualidades são acompanhadas de uma robustez mecânica considerável e de um custo relativamente baixo.

15.6 A característica conjugado × rotação

A característica mais importante de um motor, independentemente de seu tipo, é a característica conjugado × rotação. Com esta característica, torna-se possível projetar com precisão sistemas de acionamento de cargas utilizando-se destes motores.

Para o motor de indução esta curva característica tem o aspecto da Fig. 15.9:

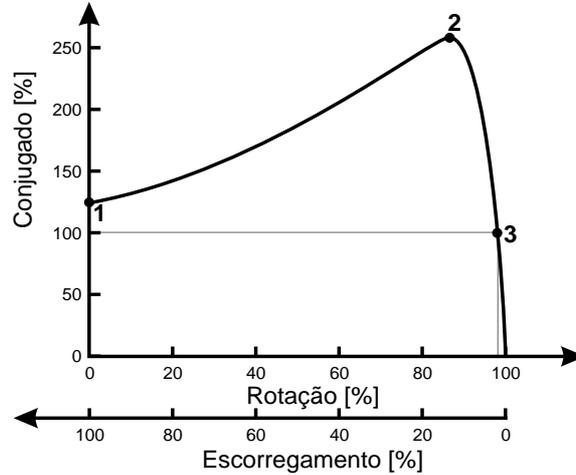


Fig. 15.9 Curva característica conjugado \times rotação para operação como motor.

Existem 3 pontos notáveis nesta curva:

- Ponto 1 = Conjugado de partida = conjugado desenvolvido pelo motor com rotação nula;
- Ponto 2 = Conjugado máximo = conjugado máximo que o motor consegue desenvolver;
- Ponto 3 = Conjugado nominal = máximo conjugado que o motor pode desenvolver em regime contínuo.

Quando um motor elétrico é utilizado para o acionamento de uma carga, é fundamental comparar as curvas características conjugado \times rotação do motor com a da carga mecânica a ser acionada. A Fig. 15.10 mostra as duas curvas características sobrepostas no caso típico do acionamento de um ventilador.

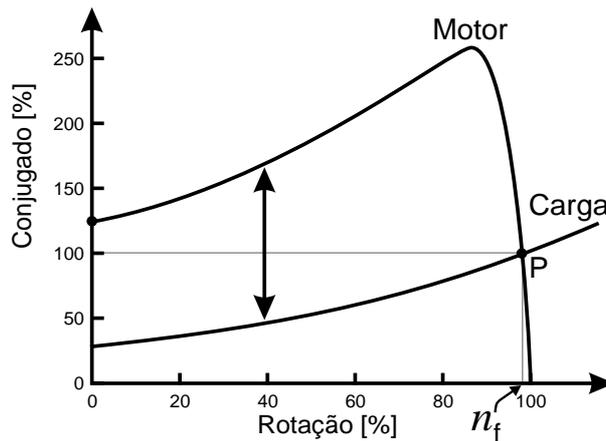


Fig. 15.10 Sobreposição das curvas características conjugado \times rotação do motor e da carga.

Verifica-se que desde a partida ($n = 0$) até a rotação final ($n = n_f$) o conjugado desenvolvido pelo motor é superior ao exigido pela carga, implicando em uma aceleração do conjunto. No ponto P indicado, no qual ($n = n_f$), o conjugado desenvolvido pelo motor é igual ao exigido pela carga. Neste ponto o conjugado acelerante (diferença entre o conjugado motor e o conjugado resistente oferecido pela carga) é nulo, implicando velocidade constante para o conjunto. O ponto P é denominado de ponto de trabalho do acionamento. Um acionamento bem dimensionado apresenta um ponto de trabalho coincidente com as condições nominais do motor.

15.7 Influência da tensão de alimentação

Uma das características relevantes a ser mencionada é que a tensão de alimentação afeta de maneira quadrática a característica conjugado \times rotação do motor de indução. Ou seja:

$$\text{Conjugado} \propto V^2 \quad (15.9)$$

Esta característica pode ser deduzida fisicamente a partir da Fig. 15.11 ao lado. Se a tensão de alimentação do estator for reduzida, as correntes no estator diminuirão proporcionalmente, assim como o fluxo visto pelo rotor. Por conseguinte, as tensões e correntes induzidas no rotor também serão reduzidas na mesma proporção. O conjugado depende do produto das forças magnetomotrizes do estator e rotor. Assim, conclui-se que a dependência do conjugado em relação à tensão é quadrática, na forma indicada pela Eq. 15.9.

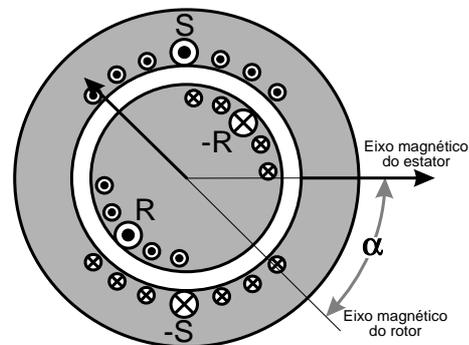


Fig. 15.11 Diagrama auxiliar do motor de indução para mostrar a influência da tensão sobre o conjugado.

15.8 Questões propostas

- Como inverter o sentido de rotação do campo girante?
- Porque não é possível o rotor do motor de indução girar na rotação síncrona?
- Qual o significado físico do escorregamento?
- Qual a f.e.m. induzida no rotor se ele girasse na mesma rotação do campo girante? Porque?
- Qual a frequência da f.e.m. induzida no rotor quando o mesmo está:
 - bloqueado
 - girando na rotação nominal
- f) Explique o que é conjugado nominal, conjugado de partida e conjugado máximo.
- g) Relacione as várias perdas existentes em um motor de indução.
- h) Qual o significado físico da potência fornecida ao motor quando ele opera em vazio?