

Máquina de Indução - Lista Comentada

1) Os motores trifásicos a indução, geralmente, operam em rotações próximas do sincronismo, ou seja, com baixos valores de escorregamento. Considere o caso de alimentação em 60 [Hz], com torque de 100 [N.m] desenvolvido a 864 [rpm]: **a)** quantos pólos tem o motor? **b)** qual deveria ser a frequência da tensão de alimentação do motor para que o mesmo valor de torque fosse obtido a 750 [rpm]?

(Respostas: 8 polos; 52,4Hz. Com frequência de alimentação 60 [Hz], as rotações síncronas mais próximas de 864 [rpm] são 720 [rpm]; 900 [rpm] ; 1200 [rpm] que correspondem, respectivamente, a motores com 10; 8; 6 polos. Os escorregamentos seriam (- 11,1%); 4%; 28%. Como os motores a indução operam com escorregamentos positivos e geralmente menores que 8%, a resposta é 8 polos. No trecho linear da curva de torque ($s < 0,08$), para se manter o valor de torque é necessário que se mantenha a velocidade relativa entre os condutores alojados no rotor e o campo girante produzido pelo enrolamento do estator. No caso, a velocidade relativa de 36 [rpm] implica rotação síncrona 786 [rpm] que, por sua vez, define a frequência de alimentação 52,4 [Hz] para um enrolamento com 8 polos).

2) Apresente um outro método para controle da velocidade dos motores a indução e compare com o da questão anterior (controle da frequência de alimentação) nos aspectos de rendimento e facilidade de implementação.

(Resposta: controle da velocidade pela amplitude da tensão aplicada ou controle pela impedância do rotor. Estes dois métodos “enfraquecem” o motor, a velocidade será reduzida por perda de energia. O torque varia com o quadrado da tensão aplicada, reduzindo-se a tensão de alimentação o rotor deverá escorregar mais para que a tensão nele induzida seja compensada e se produza o mesmo torque. Aumentar a impedância do rotor produz efeito semelhante: o rotor perde velocidade para que a tensão nele induzida aumente, na tentativa de se preservarem o valor da corrente induzida e do torque. Aumentando o escorregamento, necessariamente, o rendimento diminui devido ao aumento das perdas joule no rotor. Outra desvantagem destes métodos, além da perda de rendimento, é que não podem ser utilizados para elevar a velocidade pois o limitante superior de velocidade é a frequência da tensão de alimentação, ou seja, a rotação síncrona. As suas aplicações mais frequentes são na partida dos motores, para se manter a corrente de partida em níveis mais baixos: com a chave estrela-triângulo se aplica tensão reduzida na partida dos motores e com reostatos de partida se inserem impedâncias no circuito do rotor, que serão removidas, ou curto-circuitadas, após a partida).

3) Os motores monofásicos a indução necessitam de um dispositivo ou circuito auxiliar de partida, enquanto os trifásicos partem naturalmente. Analise esta diferença de comportamento e apresente um método de partida.

(Resposta: os enrolamentos monofásicos não produzem campo girante, mas sim campo de indução pulsante. Portanto, não há torque de partida. A amplitude máxima de indução magnética ocorre sempre na mesma posição. Um campo pulsante é composto por dois campos de mesma amplitude (que vale metade da original), girando em sentidos opostos. Assim, o motor monofásico tem capacidade de manter a rotação em qualquer sentido, mas não consegue partir, pois os dois campos opostos atraem o rotor com a mesma intensidade. Um enrolamento auxiliar, alojado no estator em posição deslocada $\pi/2$ [rd] do

enrolamento principal e alimentado com corrente defasada (no tempo) de aproximadamente $\pi/2$ [rd] da corrente principal, formará juntamente com o enrolamento principal um motor bifásico, produzindo campo girante. Com isso, o motor parte. A defasagem de corrente é geralmente obtida por meio de um capacitor ligado em série com o enrolamento auxiliar. Após a partida, o enrolamento auxiliar é desligado, automaticamente, retomando-se a condição de motor monofásico.

4) Os motores a indução são também denominados motores assíncronos. Justifique esta denominação.

(Resposta: a indução de tensão no rotor ocorre porque há variação do fluxo magnético concatenado com suas bobinas, ou porque os seus condutores têm velocidade não nula em relação ao campo magnético girante produzido pelo estator. É necessário que o rotor escorregue em relação ao campo girante. A situação de escorregamento nulo corresponde à rotação síncrona, ou seja, se o rotor sincronizar com a frequência da rede a indução desaparece – de uma forma mais geral, quando a rotação $f \rightarrow pn$, a tensão induzida $E_2 \rightarrow 0$. Somente o modo assíncrono de operação é possível, daí a denominação motores assíncronos).

5) Comente a frase: “nos motores de corrente contínua a velocidade é controlada pelo módulo da tensão aplicada, nos de corrente alternada é pela frequência da tensão”. Justifique os seus argumentos.

(Resposta: a frequência da tensão de alimentação define a rotação síncrona $f = pn_s$, que é a rotação do campo girante de induções produzido nas bobinas dos estatores dos motores de corrente alternada. Os motores a indução trabalham próximos desta rotação, com escorregamentos menores que 8%. Os motores síncronos representam um complemento desta operação na medida em que operam somente na rotação síncrona, pois nas bobinas de seus rotores não há corrente induzida, mas sim corrente impressa fornecida por uma fonte de corrente contínua, no caso denominada corrente de excitação. Assim, a dinâmica dos motores de corrente alternada tem como principal característica $f \rightarrow pn$ (motores a indução) e $f = pn_s$ (motores síncronos). O controle da frequência de alimentação “f” é a maneira mais direta e eficaz de se controlar a velocidade dos motores de corrente alternada, no caso dos motores síncronos é a única forma de controle possível.

Os motores de corrente contínua, embora sejam alimentados por uma fonte CC, têm em suas bobinas rotóricas correntes alternadas. A comutação da corrente, ou a sua transformação $CA \rightarrow CC$ é obtida por um comutador mecânico ou por um sistema de chaveamento (caso dos chamados “brushless DC motors”). O processo de comutação é feito em malha fechada, ou seja, comandado pela própria velocidade do eixo do motor. Assim, o sincronismo entre a variação temporal da corrente de armadura e a velocidade do rotor é garantido “naturalmente” e se mantém em qualquer velocidade. Não há frequência a ser considerada na estratégia de controle. A dinâmica do motor é comandada, então, pela tendência da tensão $E_a = K \Phi \Omega$ induzida no rotor, devida ao seu movimento, se igualar com a tensão aplicada $E_a \rightarrow V_a$. É o equilíbrio entre tensão aplicada e força contra-eletromotriz induzida. A relação entre a velocidade do rotor Ω e a tensão aplicada é direta: $V_a = E_a + rI$. Um motor ideal operando em vazio, ou seja, motor sem carga mecânica e sem atrito, atinge o limite superior de velocidade. O motor a indução atingiria a rotação síncrona que é seu limite e o motor de corrente contínua a rotação limite $\Omega = V_a / k\Phi$. A velocidade limite implica torque nulo, pois a corrente no rotor se anularia nos dois tipos de motores. Torque nulo é exatamente a carga mecânica nula. Fora desta condição limite, o motor deve perder velocidade para desenvolver torque e atingir um ponto de operação, no qual se equilibrem o torque resistente (carga mecânica mais atrito) e o torque motor desenvolvido. Na medida em que o torque é aliviado, o motor tende à velocidade limite. O

controle da velocidade de operação é feito, então, sobre a rotação limite, que representa sempre a tendência de equilíbrio dos motores. Nos motores de corrente alternada se controla a frequência ($f=pn_s$), nos motores de corrente contínua se controla a tensão ($\Omega=V_{\text{alimentação}}/k\Phi$).

6) Considere um motor síncrono trifásico de 8 [kVA], 6 polos, ligação Y, alimentado em 60 [Hz] com 220 [V]. O circuito magnético pode ser considerado linear, tal que a corrente de excitação de 1.5 [A] resulta em tensão induzida de 220 [V]. Mostre que o fator de potência destes motores pode ser ajustado pela corrente de excitação, calculando os valores de excitação correspondentes a fatores de potência 100 %; 80 % capacitivo e 90 % indutivo. Nos três casos, mantenha o torque constante em 40 [N.m]. Considere a reatância síncrona como 5 [Ω].

(Respostas: fator de potência 100%, corrente de excitação 1,69 [A], corresponde à excitação normal; fator de potência 90% indutivo, corrente de excitação 1,37 [A], corresponde à faixa de sub-excitação; fator de potência 80% capacitivo, corrente de excitação 2,22 [A], corresponde à faixa de super-excitação).

7) O mesmo motor da questão anterior poderia ser utilizado como máquina assíncrona se o enrolamento do rotor fosse fechado em curto-circuito, ao invés de nele se injetar corrente contínua de excitação. Em que rotação seria acionada a carga se frequência das correntes induzidas no rotor fosse 3 [Hz]? Como é possível manter o sincronismo entre os campos girantes do estator e do rotor se a rotação do motor é variável?

(Respostas: 1140 [rpm]; o sincronismo é garantido pela frequência da corrente induzida no rotor.

A frequência da corrente induzida no rotor é $f_2 = s \cdot f$. Com $f=60$ [Hz], frequência de alimentação, temos $s=0,05$. A rotação do motor em função da rotação síncrona é dada por $n = (1-s) \cdot n_s$. Como $n_s = 1200$ [rpm], resulta $n = 1140$ [rpm].

O campo produzido pelas bobinas do estator gira com n_s [rps], quando essas bobinas são percorridas por correntes de frequência f [Hz]. No rotor, correntes induzidas na frequência $f_2 = s \cdot f$ [Hz] produzirão campo girante com $n_2 = s \cdot n_s$ [rps]. Entretanto, estas mesmas bobinas estão alojadas no rotor que gira com $n = (1-s) \cdot n_s$ [rps]. A velocidade resultante do campo girante produzido pelas bobinas do rotor é, portanto, a soma das duas rotações $n = (1-s) \cdot n_s$ e $n_2 = s \cdot n_s$. O resultado é a própria rotação síncrona, demonstrando o sincronismo entre os campos girantes do estator e do rotor.

A condição geral de sincronismo pode ser escrita como: $p \cdot n + f_2 = f$, sendo "p" o número de pares de pólos do motor e "n" a rotação de seu eixo. Nos motores a indução a frequência f_2 das correntes do rotor é induzida pela rotação n , variável. Então, a "leitura" da equação do sincronismo para os motores a indução é: $f_2 = f - p \cdot n$, ou seja, somente fora do sincronismo existe f_2 e $f_2 \neq 0$. Nos motores síncronos, a corrente no rotor é contínua, fornecida por uma fonte de excitação; neste caso $f_2 = 0$ e a "leitura" da equação do sincronismo é $n = \frac{f}{p} = n_s$, ou seja, o rotor só poderá girar na rotação síncrona).

Nos dois casos, motores síncronos e motores a indução, verifica-se que os campos girantes do estator e do rotor, que esses dois vetores, têm velocidade relativa nula, ou seja, estão sincronizados em suas rotações, condição necessária para a existência de torque.)

8) Um motor a indução trifásico, 380 (V), 100 (HP), ligação Y, é alimentado em 60 (Hz). Girando a 1100 (rpm) aciona uma carga mecânica com torque 600 (N.m)

a) qual o número de pólos do motor e a frequência das correntes induzidas em seu rotor?

(Resposta: 6 polos; 5 [Hz])

b) Em quais rotações o motor produzirá torques de 300 (N.m) e 900 (N.m)?

(Respostas: 1150 [rpm]; 1050 [rpm])

c) Deseja-se controlar a velocidade de acionamento da carga. Sabe-se que o torque máximo do motor ocorre a 1000 (rpm) e vale 1200 (N.m). O torque de partida vale 400 (N.m) e a resistência rotórica 1 [Ohm] por fase. Como se poderia obter 600 (N.m) a 900 (rpm)? Como se poderia deslocar o torque máximo para a condição de partida?

(Respostas: alimentação com frequência 50 [Hz]; ligar em série com cada fase do rotor uma resistência de partida de 5 [Ohm]. O torque máximo ocorre aproximadamente na velocidade em que a parte indutiva da impedância rotórica iguala a parte resistiva, ou seja $\varphi_2 = \frac{\pi}{4}$ [rd]. A parte indutiva da impedância rotórica depende proporcionalmente da frequência da tensão induzida, que, por sua vez, é proporcional ao escorregamento. Então, torque máximo a 1000 [rpm] implica $f_2 = \frac{200}{1200} \cdot 60$ [Hz]. Nesta rotação, $X_2 = R_2 = 1$ [Ohm]. Na partida, com o rotor parado, teremos $f_2 = \frac{1200}{1200} f = 60$ [Hz], então impondo $R_2 = 6$ [Ohm] teremos o torque máximo com rotação nula.

Nesta solução, admitiu-se que o torque varia linearmente com o escorregamento até o ponto de torque máximo. Verifique se seria possível também deslocar o torque máximo para a partida controlando a frequência da alimentação. Inserindo resistência no rotor também se conseguiria produzir 600 [N.m] a 900 [rpm]?).

- d) Mostre que mesmo girando a 900 (rpm) a condição de sincronismo entre os campos girantes do estator e do rotor é garantida pela indução. O que ocorreria se injetássemos corrente contínua no rotor?

(Resposta: $n_2 = \frac{1200 - 900}{1200} \cdot \frac{60}{3} = 5$ [rps] é a rotação do campo girante do

rotor em relação às bobinas que o produziram. Estas bobinas giram com 900 [rpm]. Então, em relação às bobinas do estator, o campo do rotor gira com $900 + 5 \times 60 = 1200$ [rpm] que é a rotação síncrona.

Se nas bobinas do rotor circular corrente contínua, o motor passaria a operar como motor síncrono, na rotação 1200 [rpm].

9) Resolva os seguintes exercícios de A.G. Falcone:

Exemplo 6.2, pág. 347/ Exemplo 6.3, pág. 351/ Exemplo 6.4, pág. 353/

Exercício 3, pág. 375/ Exercício 6, pág. 376

Exemplo 7.3, pág. 405/ Exemplo 7.6, pág. 419/

Exercícios pág. 450-451: 7 a 11 e 15 a 16