PEA-2488 Eletrônica de Potência II

Wilson Komatsu
2° sem/2008

Exercícios sobre acionamento com recuperação de energia de escorregamento

O controle de velocidade de motores de indução com rotor bobinado pode ser feito através da variação da resistência rotórica, através de reostato trifásico ligado ao enrolamento do rotor. O inconveniente desta solução são as perdas ohmicas que diminuem a eficiência do sistema, sendo que como tais motores têm potências relativamente altas (dezenas de kW a unidades de MW) a energia dissipada é elevada. Uma maneira de se contornar isso é recuperando a energia do rotor de volta para a rede CA. Isso é realizado conforme a figura 1: a tensão trifásica do rotor, com freqüência igual a $\mathbf{f_{rede}(1\text{-}s)}$ (onde $\mathbf{f_{rede}}$ é a freqüência da rede, 60Hz ou 50Hz, e **s** é o escorregamento do rotor) é retificada e a seguir invertida. Esta etapa de retificação/inversão é necessária, pois as freqüências do rotor e do estator não são iguais. O transformador compatibiliza a tensão de saída do inversor com a da rede CA.

Este tipo de acionamento também é chamado de Kramer estático.

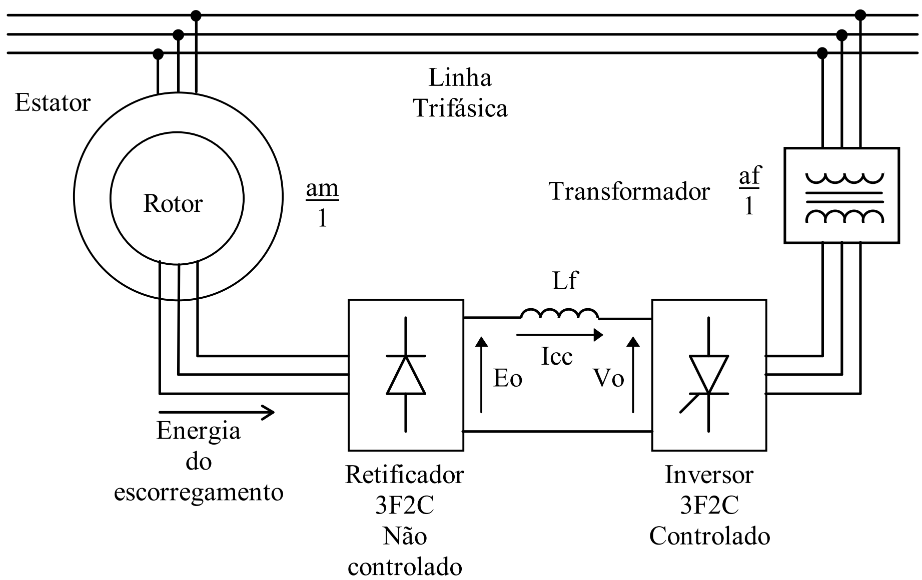

Fig. 1: Acionamento com recuperação de energia de escorregamento (Kramer estático).

A figura 2 mostra o circuito equivalente por fase do acionamento, com detalhe dos parâmetros do motor de indução.

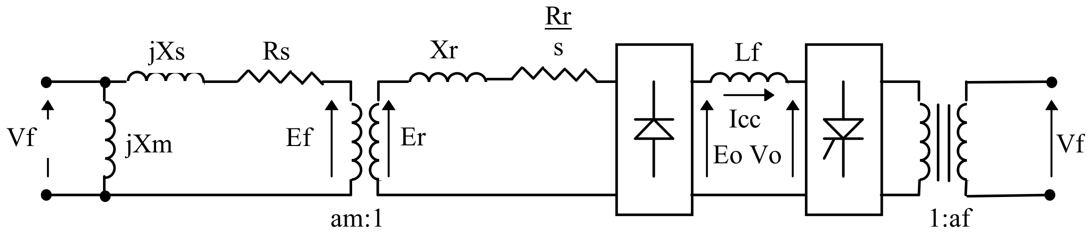

Fig. 2: Circuito equivalente por fase do acionamento tipo Kramer estático.

Segue-se um exemplo (retirado de: Rashid, M.H. **Power Electronics: Circuits, Devices and Applications**. Prentice Hall, 1993, 2a edição).

Exemplo: Um motor de indução trifásico de 460V, 60Hz, seis pólos, com rotor bobinado em estrela, é controlado com recuperação de energia de escorregamento. Os parâmetros do motor são: Rs=0,041Ω, R'r=0,044Ω, Xs=0,29Ω, X'r=0,44Ω, Xm=6,1Ω (todos os parâmetros referidos ao estator). A relação de espiras do rotor ao estator é 1:am=0,9. A indutância de filtro do retificador/inversor Lf é suposta muito grande de modo que a corrente contínua Icc tem ondulação desprezível. A relação de espiras do transformador de saída é 1:af=0,4. Os valores de Rs, R'r, Xs, X'r podem ser desprezados em comparação à impedância de Lf. As perdas em vazio do motor são desprezíveis, bem como as perdas do retificador e do inversor. O conjugado resistente desenvolvido pela carga é de 750N.m a 1175 rpm, e varia com o quadrado da velocidade (carga tipo ventilador). Se o motor deve operar a 1050 rpm, calcular:

a) a corrente contínua Icc;
b) a tensão retificada Eo;
c) o ângulo de atraso α do inversor;
d) a eficiência do conjunto;
e) o fator de potência na entrada do acionamento.

Solução:

A tensão do motor fornecida é de linha (**sempre é**, a menos que expressamente indicado). Logo, a tensão de fase é:

$$\mathrm{Vf} = \frac{460}{\sqrt{3}} = 265{,}58[\mathrm{V}]$$

Ainda, as velocidades (síncrona e mecânica) podem ser calculadas:

$$\mathrm{p} = 6\,\text{pólos},\ \omega_{rede} = 2\pi \times 60 = 377[\mathrm{rad/s}],\ \omega_s = \frac{2\times\omega}{\mathrm{p}} = \frac{2\times 377}{6}\ (1) \Rightarrow \omega_s = 125{,}66[\mathrm{rad/s}]$$

$$\omega_m = \frac{n_{motor}\times\pi}{30}\ (2) \Rightarrow \omega_m = \frac{1050\times\pi}{30} = 109{,}96[\mathrm{rad/s}]$$

O escorregamento **s** é:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s}\ (3) \Rightarrow s = \frac{125{,}66 - 109{,}96}{125{,}66} = 0{,}125$$

O conjugado, que varia quadraticamente com a velocidade, na velocidade pedida é:

$$C_{carga} = C_{anterior} \times \left(\frac{n_{carga}}{n_{anterior}}\right)^2\ (4) \Rightarrow C_{carga} = 750 \times \left(\frac{1050}{1175}\right)^2 = 598{,}91[\mathrm{N.m}]$$

a) Sendo Pr a potência por fase recuperada do escorregamento, e desprezando-se em primeira análise a resistência do enrolamento do rotor Rr, a potência por fase passando do estator para o rotor pelo entreferro Pg é:

$$\mathrm{Pg} = \frac{\mathrm{Pr}}{s}\quad (5)$$

E a potência no eixo (Pd) é a potência no entreferro (3xPg) menos a potência total recuperada no rotor (3xPr), menos as perdas em vazio (Pvazio), estas últimas supostas desprezíveis.

$$Pd = 3 \times (Pg - Pr) = 3 \times I'r^2 \times \frac{R'r}{s} - 3 \times I'r \times R'r = 3 \times Pg \times (1 - s) \quad (6)$$

$$Pd = 3 \times \left(\frac{Pr}{s} - Pr \right) = \frac{3 \times Pr \times (1 - s)}{s} \quad (7)$$

Como a potência de escorregamento total é recuperada pelo retificador:

$$3 \times Pr = Eo \times Icc \quad e \quad Pd = C_{carga} \times \omega_m \qquad (8)$$

$$Pd = \frac{(1 - s) \times Eo \times Icc}{s} = C_{carga} \times \omega_m = C_{carga} \times \omega_s \times (1 - s) \quad (9)$$

Isolando-se a corrente contínua Icc, e usando-se a fórmula de Eo (equação 12):

$$Icc = \frac{C_{carga} \times \omega_s}{1{,}35 \times \sqrt{3} \times Vf \times \frac{1}{am}} \ (10) \Rightarrow Icc = \frac{598{,}91 \times 125{,}66}{1{,}35 \times \sqrt{3} \times 265{,}58 \times 0{,}9} = 134{,}65[A]$$

Esta equação mostra que a corrente contínua do retificador é independente da velocidade! Obviamente ela tem relação com o conjugado desenvolvido.

b) Desprezando-se Rs, R'r, Xs, X'r, em face à impedância de Lf, a tensão de fase de entrada do retificador Er é a tensão gerada por fase no rotor, com o escorregamento nominal:

$$Er = s \times Vf \times \frac{1}{am} \ (11) \Rightarrow Er = 0{,}125 \times 265{,}58 \times 0{,}9 = 29{,}878[V]$$

Desprezando-se a reatância de comutação do retificador 3F2C não controlado, a tensão média em sua saída (Eo) fica:

$$Eo = 1{,}35 \times \sqrt{3} \times Er = 1{,}35 \times \sqrt{3} \times s \times Vf \times \frac{1}{am} \ (12) \Rightarrow Eo = 1{,}35 \times \sqrt{3} \times 29{,}878 = 69{,}86[V]$$

c) a tensão CA de fase na saída do inversor 3F2C é a tensão CA de fase da linha trifásica do sistema CA principal (figura 1), multiplicado pela relação de transformação **1:af** do transformador de saída:

$$Einv = \frac{1}{af} \times Vf \ (14) \Rightarrow Einv = 0{,}4 \times 265{,}58 = 106{,}23[V]$$

Novamente desprezando-se a reatância de comutação (desta vez a do inversor 3F2C), tem-se:

$$Vo = -1{,}35 \times \sqrt{3} \times Einv \times \cos\alpha = -1{,}35 \times \sqrt{3} \times \frac{1}{af} \times Vf \times \cos\alpha \quad (14)$$

Deve-se notar que o sinal negativo é para situar corretamente o ângulo de disparo α entre 90° e 180° (região de inversão, com cosα negativo). Sabendo-se que a tensão de saída CC do retificador Eo é igual à de entrada CC do inversor Vo (pois ambos compartilham o mesmo barramento CC, conforme a figura 2), obtém-se a equação 15.

Como Eo=Vo em regime permanente (a tensão média em Lf é nula em regime):

$$1{,}35 \times \sqrt{3} \times s \times Vf \times \frac{1}{am} = -1{,}35 \times \sqrt{3} \times \frac{1}{af} \times Vf \times \cos\alpha \qquad (15)$$

De onde resulta:

$$s = -\frac{am}{af} \times \cos\alpha \qquad (16)$$

O que mostra que a velocidade é independente do conjugado! Colocando em termos de velocidade do motor pode-se obter o ângulo α:

$$\omega_m = \omega_s \times (1 - s) = \omega_s \times (1 + \frac{am}{af} \times \cos\alpha) \quad (17)$$

$$\Rightarrow 109{,}96 = 125{,}66 \times (1 - 0{,}125) = 125{,}66 \times (1 + \frac{0{,}4}{0{,}9} \times \cos\alpha) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \cos\alpha = -0{,}2811 \Rightarrow \alpha = 106{,}33^{\circ}$$

Note-se que o ângulo de disparo α está corretamente na região de inversão, entre 90° e 180°. Como α está parte inferior desta região (mais próximo de 90° que de 180°), isto indica que o fator de potência do inversor 3F2C, visto pela rede CA, encontra-se com um valor bem baixo. Para se aumentar o fator de potência do inversor, aproximando o ângulo α de 180°, deve-se aumentar a relação de transformação **af:1**, de acordo com a equação (16). Repare que o fator de potência calculado no item e é total do sistema.

d) A potência ativa devolvida à rede CA é a potência CC do retificador, pois tanto no retificador como no inversor não há perdas:

$$Pret = Pinv = Pescorr = Eo \times Icc \ (18) \Rightarrow Pret = Pinv = Pescorr = 69{,}86 \times 134{,}65 = 9407[W]$$

A potência mecânica na carga é dada pela equação (8):

$$Pd = C_{carga} \times \omega_m = 598{,}91 \times 109{,}96 = 65.856[W]$$

Desprezando-se a reatância de comutação do retificador 3F2C, a corrente eficaz de fase do rotor, refletida ao estator é:

$$I'r = \sqrt{\frac{2}{3}} \times Icc \times \frac{1}{am} \ (19) \Rightarrow I'r = \sqrt{\frac{2}{3}} \times 134{,}65 \times 0{,}9 = 98{,}95[A]$$

E as perdas ohmicas nas resistências do rotor e do estator podem ser determinadas:

$$Protor = 3 \times R'r \times I'r^2 \ (20) \Rightarrow Protor = 3 \times 0{,}044 \times 98{,}95^2 = 1292[W]$$

$$Pestator = 3 \times Rs \times I'r^2 \ (21) \Rightarrow Pestator = 3 \times 0{,}041 \times 98{,}95^2 = 1204[W]$$

A potência total absorvida pelo motor é a potência na carga Pd mais as perdas ohmicas:

$$Pabs = Pd + Protor + Pestator \ (22) \Rightarrow Pabs = 65.856 + 1292 + 1204 = 68.352[W]$$

Com isso a eficiência do conjunto pode ser calculada:

$$\eta = \frac{Pd}{Pabs} \ (23) \Rightarrow \eta = \frac{65.856}{68.352} = 0{,}963 = 96{,}3\%$$

e) Fazendo-se uma aproximação pela fundamental da corrente de fase do rotor refletida ao estator, tem-se:

$$I'r_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \times Icc \times \frac{1}{am} \ (24) \Rightarrow I'r_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \times 134{,}65 \times 0{,}9 = 94{,}49[A]$$

Esta componente fundamental de corrente $I'r_1$ obviamente está em fase com a tensão de fase. A outra componente no estator do motor corresponde à corrente magnetizante Im, conforme a equação (25):

$$Im = \frac{Vf}{Xm} \ (25) \Rightarrow Im = \frac{265{,}58}{6{,}1} = 43{,}54[A]$$

Esta corrente, indutiva, está atrasada 90° em relação à tensão de fase.

A corrente total no estator é dada pela equação (26):

$$Is_1 = \sqrt{(I'r_1)^2 + (Im)^2} \angle [-\tan^{-1}(\frac{Im}{I'r_1})] \ (26) \quad \Rightarrow$$

$$Is_1 = \sqrt{94{,}49^2 + 43{,}54^2} \angle (-\tan^{-1}\frac{43{,}54}{94{,}49}) = 104{,}04\angle -24{,}74^{o}[A]$$

Veja que se pode fazer a soma vetorial (fasorial), pois se trata da fundamental da corrente do rotor, sem as harmônicas, somada à corrente magnetizante, esta também desprezando harmônicas.

Deve-se ainda levar em conta a corrente CA devolvida à rede pelo inversor. Esta corrente tem sua fundamental atrasada de α em relação à tensão de fase. Usando-se a equação (19) com a relação de transformação **1:af** ao invés de **1:am**, tem-se:

$$Iinv = \sqrt{\frac{2}{3}} \times Icc \times \frac{1}{af} \angle -\alpha \ (27) \quad \Rightarrow Iinv = \sqrt{\frac{2}{3}} \times 134{,}65 \times 0{,}4 = 43{,}98\angle -106{,}33^{o}[A]$$

A corrente total do acionamento é a soma das duas correntes:

$$Itotal = Is_1 + Iinv \ (28) \Rightarrow Itotal = 104{,}04\angle -24{,}74^{o} + 43{,}98\angle -106{,}33^{o} = 118{,}73\angle -46{,}23[A]$$

O fator de potência (indutivo), desprezando-se as harmônicas, é dado por:

$$F.P. = \cos(-46{,}23^{o}) = 0{,}69$$

Veja que este fator de potência pode ser melhorado se for alterada a relação de transformação do transformador de saída (diminuindo a relação **1:af**), conforme se nota pela equações (16) e (27). Por exemplo, se **1:af** = 0,9, resultam α=97° e F.P.=0,5 e quando **1:af**=0,2, α=124° e F.P.=0,8.

Exercício proposto: Repetir o problema com as seguintes modificações:

- Rs=0,11Ω; R'r=0,09Ω; Xs=0,4Ω; X'r=0,6Ω;Xm=11,6Ω
- Conjugado de 455N.m a 1175rpm (conjugado proporcional ao quadrado da velocidade)
- Nova velocidade de operação n_{motor}=950rpm.
- 1:af=0,9 e 1:af=0,5 (relação de transformação do transformador de saída)