

INFLUÊNCIA DAS INTERRUPTÕES TRANSITÓRIAS SOBRE ACIONAMENTOS COM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Edson da Costa Bortoni

Janio Itiro Akamatsu

Ronaldo Rossi

Durval L. S. Ricciulli

DEE-FEG-UNESP
Av. Ariberto P. Cunha, 333 – 12500-000
Guaratinguetá-SP – BRASIL
e-mail: bortoni@feg.unesp.br

Resumo – Este trabalho procura analisar a importância da qualidade da energia sobre acionamentos com motores de indução, notadamente em relação aos efeitos nocivos das interrupções transitórias.

Palavras-chave – Acionamentos, qualidade da energia, transitórios eletromecânicos.

Abstract – This work analyze the power quality importance over induction motor drives, mainly due to the dangerous effects concerned to the transient loss of voltage.

Keywords – Motor drives, power quality, electromechanical transients.

1. INTRODUÇÃO

As interrupções transitórias são definidas como a perda de potência durante 0,5 ciclos ou mais, podendo ainda serem classificadas como [1]:

- Interrupções momentâneas: perda de potência completa por tempo inferior a 2 segundos;
- Interrupções temporárias: perda de potência completa com duração maior que 2 segundos e menor que 1 minuto;
- Interrupção sustentada: perda de potência com duração maior que 1 minuto.

Os efeitos desta categoria de distúrbios sobre o desempenho de acionamentos com motores de indução trifásicos são abordados neste trabalho.

O problema reside no fato de que durante o período da interrupção transitória, devido às correntes que ainda fluem pelo rotor e à rotação sustentada pela inércia da carga, o motor passa a funcionar por alguns instantes como um gerador assíncrono. No momento do restabelecimento da tensão do sistema, poderá ocorrer uma diferença, tanto em magnitude como em ângulo, entre a tensão da rede e a tensão residual, podendo dar origem a elevadas correntes, por vezes maiores que a própria corrente de partida do motor, causando problemas com torques torcionais e atuação intempestiva do sistema de proteção.

O motor de indução é modelado segundo a teoria geral das máquinas elétricas, a fim de se determinar o comportamento da tensão do estator nestas condições. Um modelo massa-mola girante é utilizado para analisar as solicitações mecânicas no eixo da máquina.

2. MODELAGEM ELÉTRICA DO ACIONAMENTO

Para a simulação digital do acionamento com motor de indução em condições transitórias será empregada a já consagrada teoria geral de máquinas elétricas [2]. Neste modelo, tomando-se um referencial fixado no rotor, a máquina poderá ser representada por dois circuitos ortogonais, um alinhado com o eixo principal do rotor – eixo direto – e outro defasado de noventa graus elétricos – eixo em quadratura –, conforme mostrado da fig. 1.

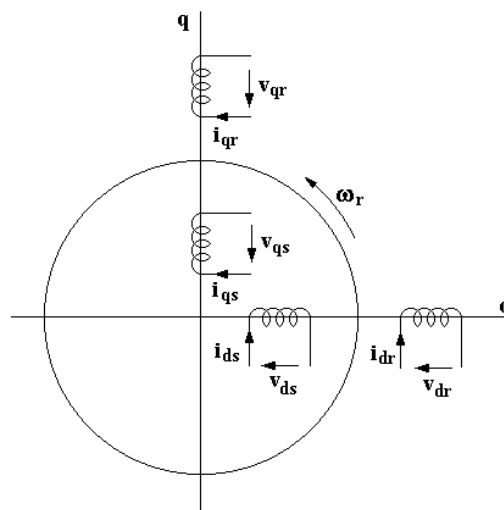


Fig. 1 – Representação da máquina elétrica.

Uma técnica alternativa é apresentada em [3], onde se emprega o método de componentes simétricas instantâneas para a solução do problema da tensão residual.

Aplicando a modelagem escolhida resulta no seguinte sistemas de equações diferenciais:

$$\begin{aligned} v_{ds} &= (r_s + p \cdot L_s) \cdot i_{ds} - \omega_l \cdot L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot p \cdot i_{dr} - \omega_l \cdot L_m \cdot i_{qr} \\ v_{qs} &= \omega_l \cdot L_s \cdot i_{ds} + (r_s + p \cdot L_s) \cdot i_{qs} + \omega_l \cdot L_m \cdot i_{dr} + L_m \cdot p \cdot i_{qr} \\ v_{dr} &= L_m \cdot p \cdot i_{dr} + (r_r + p \cdot L_r) \cdot i_{dr} \\ v_{qr} &= L_m \cdot p \cdot i_{qr} + (r_r + p \cdot L_r) \cdot i_{qr} \end{aligned} \quad (1)$$

Nestas equações p ($=d/dt$) é o operador de Heaviside, v são as tensões, i são as correntes, r as resistências e L as indutâncias. Os índices d, q, s, r e m significam eixo direto, eixo em quadratura, estator, rotor e mútua, respectivamente.

Na forma matricial pode-se escrever:

$$[V] = [R][I] + [L]p[I] + \omega_r[G][I] \quad (2)$$

Considerando o número de pares de polos dados por P , o torque eletromagnético é dado por:

$$T_e = P[I]^T[G][I] \quad (3)$$

Incluindo a equação mecânica do movimento, tem-se:

$$T_e = J \cdot p \cdot \omega_r + k_1 + k_2 \cdot \omega_r^x \quad (4)$$

Esta expressão considera o conjugado da carga como uma função polinomial da rotação. O expoente x poderá assumir um dos seguintes valores em função do tipo da carga: $x = [-1, 0, 1, 2]$, enquanto os coeficientes polinomiais k_1 e k_2 , juntamente com o momento de inércia, J , são determinados usando as técnicas apresentadas em [4].

Várias são as maneiras de solução do sistema de equações apresentado, podendo-se lançar mão, inclusive, de recursos de simulação [5]. No entanto, com base nestas equações é possível construir o seguinte circuito equivalente para o motor:

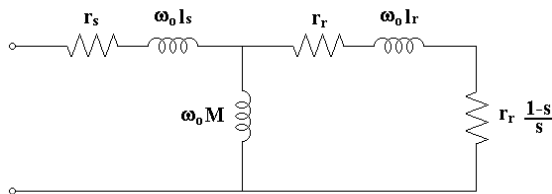


Fig. 2 – Circuito equivalente do motor de indução

Na fig. 2 tem-se $l_s = L_s - M$ e $l_r = L_r - M$.

Como os transitórios envolvidos nestas análises ocorrem em condições de escorregamentos relativamente baixos, o efeito pelicular nas barras do rotor poderão ser desprezados. Como simplificação

adicional, nestas análises também não serão considerados os efeitos da saturação.

Algumas regras gerais têm sido colocadas com relação ao comportamento da tensão residual de um motor de indução trifásico.

A primeira delas preconiza que a tensão terminal tem seu valor alterado subitamente, tanto em módulo como em ângulo, para o valor da tensão sobre a reatância de magnetização. Esta afirmativa, todavia, implica que a corrente de magnetização permaneça constante, subentendendo uma alteração brusca da corrente do rotor e do conjugado do motor.

Outra regra é aquela que assume que a corrente do rotor não tem seu valor alterado, resultando em um aumento da corrente de magnetização e proporcional aumento da tensão residual.

A questão de qual alternativa conduz a melhores resultados para estimativa do comportamento da tensão residual é discutido em [6], o trabalho mostra através de simulações que a corrente do rotor não se mantém constante, mas varia bruscamente, o que leva a crer que a primeira suposição é mais correta.

Uma solução simplificada do sistema descrito irá considerar o decaimento exponencial da tensão terminal inicial, dada por:

$$v_{so} = v_s - (r_s + j\omega_0 l_s) \cdot i_s \quad (5)$$

O módulo e o ângulo da tensão terminal após o interrupção será:

$$|v_s| = |v_{so}| \cdot e^{-t/T_0} \quad (6)$$

$$\angle v_s = \angle v_{so} + \Delta\theta \quad (7)$$

onde

$$T_0 = \frac{M + l_r}{r_r} \quad (8)$$

e

$$\Delta\theta = t \cdot \frac{P}{2} \cdot \left[(\omega_{r0} - \omega_0) - \frac{k_1 + k_2 \cdot \omega_r^x}{J} \cdot \frac{t}{2} \right] \quad (9)$$

Nestas expressões T_0 é a constante de tempo de circuito aberto do motor e $\Delta\theta$ é a variação do ângulo da tensão residual. Sendo assim, a tensão resultante $-v_r-$ aplicada ao motor no instante do restabelecimento da tensão de alimentação da rede $-v_a-$ será dada pela seguinte expressão:

$$v_r = \sqrt{|v_s|^2 + |v_a|^2 - 2 \cdot |v_s| \cdot |v_a| \cdot \cos \angle v_s} \quad (10)$$

3. MODELAGEM MECÂNICA DO ACIONAMENTO

Neste trabalho, o sistema mecânico motor-eixo-carga será representado pelo seguinte sistema massa-mola girante.

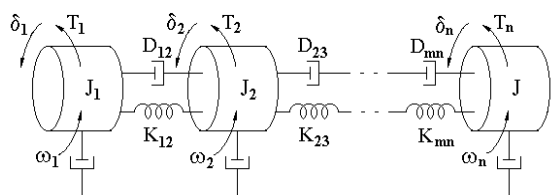


Fig. 3 – Sistema massa-mola girante.

O sistema geral de equações dinâmicas que regem o comportamento deste modelo é descrito a seguir na sua forma matricial [5].

$$J \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = T - D \cdot \omega_r - K \cdot \delta \quad (11)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_r \quad (12)$$

Nestas equações, δ é a posição angular do rotor, T é o conjugado aplicado (motor ou carga), D é o coeficiente de amortecimento, que poderá ser desprezado em função do pequeno período em que ocorre a interrupção transitória, e K é a constante de mola. Da equação (11), o torque torcional – Γ – em um eixo situado entre o motor e da carga é dado por:

$$\Gamma = K \cdot (\delta_e - \delta_c) \quad (13)$$

Tomando a derivada segunda desta expressão em função do tempo e manipulando convenientemente, pode-se escrever:

$$\frac{d^2\Gamma}{dt^2} + K \cdot \left(\frac{J_e + J_c}{J_e \cdot J_c} \right) \cdot \Gamma = K \cdot \left(\frac{T_e}{J_e} - \frac{T_c}{J_c} \right) \quad (14)$$

Desta expressão pode-se obter a frequência natural de oscilação torcional, dada por:

$$\omega_n = \sqrt{K \cdot \frac{J_e + J_c}{J_e \cdot J_c}} \quad (15)$$

Reescrevendo a equação (14), e resolvendo-a tem-se o torque torcional que é uma função do conjugado da carga mais uma parcela proporcional ao conjugado eletromagnético decorrente do transitório.

$$\Gamma = T_c + (T_e - T_c) \cdot \frac{J_c}{J_e + J_c} \cdot [1 - \cos(\omega_n t)] \quad (16)$$

4. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

A metodologia apresentada será aplicada ao estudo de um motor de 15 cv e um ventilador, cujas características nominais são apresentados na Tab. 1 e Tab. 2, respectivamente.

Tabela 1 – Características do motor estudado

Dados Nominais	Circuito Equivalente
$P_N = 15 \text{ cv}$	$r_s = 0,0249 \text{ pu}$
$U_N = 440 \text{ V } \Delta$	$l_s = 0,0811 \text{ pu}$
$I_N = 22,9 \text{ A}$	$r_r = 0,0187 \text{ pu}$
$P = 6 \text{ polos}$	$l_r = 0,0828 \text{ pu}$
$J_e = 0,951 \text{ Nm}^2$	$M = 1,0466 \text{ pu}$

Tabela 2 – Características da carga [4]

$k_1 = 3,1201 \text{ Nm}$	$k_2 = 0,0019 \text{ Nm/rpm}^2$
$J_c = 5,4604 \text{ Nm}^2$	$x = 2$

Considerando que o motor estava operando inicialmente a plena carga no instante da interrupção transitória, resulta no seguinte comportamento da tensão residual, mostrado na fig. 4, onde tem-se uma representação polar do módulo da tensão e o seu ângulo após a interrupção.

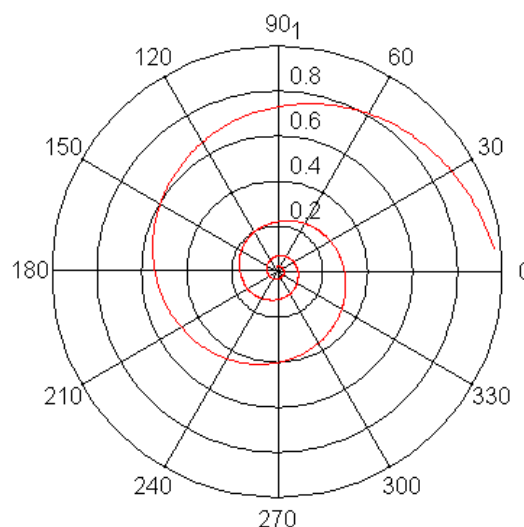


Fig. 4 – Diagrama polar da tensão residual.

A tensão resultante é dada pela diferença vetorial entre a tensão do sistema e a tensão residual. Observe nesta figura que a tensão residual já parte com um valor menor que a unidade e ângulo diferente de zero. Este fato é devido ao escorregamento do rotor do motor. A fig. 5 apresenta o seu comportamento em função do número de períodos, mostrando que, em decorrência da variação da defasagem angular, o seu valor pode, por vezes, superar a tensão nominal (1 p.u.).

Com o passar do tempo, a tensão resultante tende para a unidade, porquanto haverá a redução da tensão residual até zero.

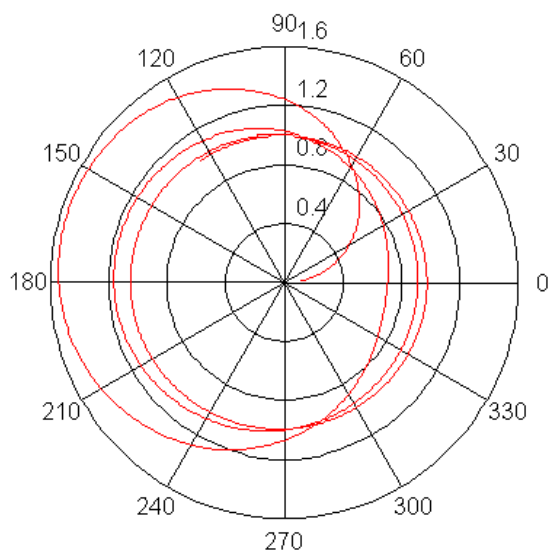


Fig. 5 – Diagrama polar da tensão resultante.

Nos casos em que o momento de inércia da carga for bem maior que o do motor, pode-se obter a seguinte expressão simplificada para o torque torcional máximo. Tal aproximação será aqui utilizada.

$$\Gamma_{\text{máx}} = 2 \cdot T_e - T_c \quad (17)$$

A figura a seguir apresenta os valores de torques torcionais máximos em função da tensão residual.

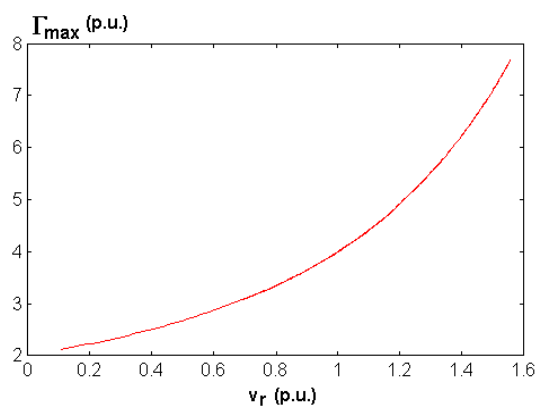


Fig. 6 – Conjugados torcionais máximos.

5. CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas desta análise são:

- Ângulos de defasagem iguais ou menores que 30° resultam em correntes transitórias menores que a metade da corrente de partida;
- Ângulos de defasagem entre 30° e 60° resultam em correntes transitórias entre a metade e a totalidade da corrente de partida;
- Ângulos de defasagem maiores que 60° resultam em correntes transitórias maiores que a corrente de partida;
- Ângulos maiores que 90° resultam em correntes transitórias muito grandes, levando à atuação intempestiva da proteção.

Todos estes resultados permitem tecer análises da influência desta categoria de distúrbios e qualidade técnica do fornecimento de energia, tanto em nível de solicitação térmica e mecânica do motor quanto em nível de um melhor ajuste e filosofia de proteção.

6. REFERÊNCIAS

- Abreu, J.P.G.; Arango, H.; Oliveira, J.C.; Bueno, A.M.; Silva, S.R.; "Reflexões sobre qualidade da energia" – SBQEE'96 – Seminário Brasileiro da Qualidade de Energia Elétrica, pp. 1-5. Uberlândia-MG, 1996.
- Adkins, B.; "The general theory of electrical machines" – Chapman & Hall Ltd, 1962.
- Barbi, I.; "Teoria fundamental do motor de indução" – UFSC/ELETROBRÁS, 1985.
- Santos, A.H.M.; Bortoni, E.C.; Diedrich, E.K.; "Parameters identification of a load-motor set for energy conservation: Dynamic analysis" – IEEE 30TH IAS International Meeting Conference Record, Vol 2, pp. 1707-1714. Orlando – USA, 1995.
- Smith, J.R.; "Response analysis of AC electrical machines: Computer models and simulation" – Research Studies Press – John Wiley & Sons, 1990.
- Daugherty, R.H.; "Analysis of transient electrical torques and shaft torques in induction motors as a result of power supply disturbances" – IEEE Trans. on PAS-101(8), pp. 2826-2836, 1982.