António Manuel Luzano de Quadros Flores
Instituto Superior de Engenharia do Porto

DIAGNÓSTICO REMOTO DE DEFEITOS EM CARGAS ACOPLADAS A UM MOTOR DE INDUÇÃO.

Resumo

A variação do binário de uma carga acoplada ao motor de indução desencadeia uma série de fenómenos internos conducentes a um novo ponto de funcionamento. No caso de um dente partido numa roda dentada de um redutor de velocidade, quando acionada, este tipo de defeito produz um aumento de binário sempre que a zona de defeito é sujeita à ação de engrenamento. Assim, pode afirmar-se que este tipo de defeito produz uma interferência periódica com frequência igual à frequência de rotação da roda dentada que possui o dente partido. Neste artigo apresenta-se uma abordagem teórica dos fenómenos internos do motor de indução na presença de uma interferência periódica da carga mecânica revelando a presença de frequências caraterísticas na corrente absorvida.

Uma metodologia de diagnóstico remoto, baseada nos parâmetros de alimentação de um motor, que possibilite monitorizar o funcionamento sem uso de sensores dedicados, tem necessariamente de se apoiar nas grandezas elétricas de alimentação da máquina que, direta ou indiretamente, fornecem informação que poderá ser analisada utilizando software de aquisição e processamento de sinal.

Dado que a tensão de alimentação do motor é imposta pela rede, pode aceitar-se que esta não contém informação útil ao diagnóstico, embora o seu valor possa sofrer influência da variação da corrente absorvida pelo motor, através das quedas de tensão que esta produz. Considerando a tensão de alimentação trifásica equilibrada e constante, a corrente elétrica absorvida é, de facto, a única variável direta disponível para análise, mas o seu conhecimento permite determinar um conjunto de variáveis que podem fornecer indicações úteis sobre o estado de funcionamento do próprio motor e da carga associada.

O facto de se tratar de uma máquina trifásica permite dispor de três valores de corrente elétrica de alimentação que contêm informação resultante dos desequilíbrios das indutâncias dos enrolamentos da máquina que são provocados tipicamente por excentricidade ou desalinhamento do rotor ou por avarias, quer nos enrolamentos do estator quer do rotor que podem ser detetados com recurso a diversas técnicas: pela análise da representação do vetor de Park [1], por aplicação da técnica das componentes simétricas [2] e pela análise espetral das correntes [3] com posterior identificação de variações anormais de determinadas componentes espetrais associadas ao funcionamento normal da máquina. O conhecimento das tensões e correntes da máquina permite obter novas variáveis de funcionamento associadas à potência ativa, reativa, fator de potência e ângulo de fase que podem ser analisadas globalmente ou para cada fase e, além disso, também podem ser analisadas a nível bidimensional convertendo as grandezas trifásicas em coordenadas dq por transformação de variáveis. Os defeitos de engrenamento resultantes de dentes partidos nas rodas dentadas de redutores acoplados ao motor de indução produzem variações instantâneas periódicas de binário aplicado ao veio do motor. Quando estas variações correspondem a um aumento de binário da carga a consequência imediata é uma diminuição instantânea da velocidade do rotor, ou seja, um aumento do deslizamento que origina um aumento de corrente elétrica absorvida da rede.

Baseado nos trabalhos desenvolvidos por [4], ir-se-á seguidamente apresentar a análise teórica que revela a presença de frequências caraterísticas na corrente absorvida por um motor, relativas a um dado defeito mecânico a diagnosticar. Como defeito da carga acionada pelo motor consideremos a situação de engrenamento de um redutor com um dente partido numa roda dentada.

A interferência cíclica resultante deste defeito produz um binário de defeito, T_d, constituído por um sinal periódico que pode ser decomposto numa série de sinusoides (Fourier) (1).

$$T_d(t) = \sum_k T_k \cos(\omega_k t) \tag{1}$$

sendo T_k a amplitude do termo de ordem k e ω_k a respetiva frequência. Considerando apenas o termo fundamental com a frequência caraterística do defeito, ω_d, resultante de um dente partido, pode obter-se uma expressão para o binário da carga total aplicada ao veio do motor (2).

$$T_{carga}\,(t) = T_{const} + T_d\, cos(\omega_d t) \tag{2}$$

Assim, o binário aplicado ao veio do motor é constituído pela soma de um valor constante T_{const} associado à carga propriamente dita e de um termo correspondente a uma oscilação de binário $T_d\, cos(\omega_d t)$ relativa ao defeito. Seguidamente analisar-se-á teoricamente qual é a sua influência na intensidade de corrente absorvida pelo motor. A equação (3) representa o equilíbrio dinâmico da máquina que é uma função da diferença entre os binários eletromagnético e da carga, da qual resulta uma aceleração no caso de existir um diferencial positivo e consequente alteração da velocidade do veio (3).

$$J\,\frac{d\omega_r}{dt} = T_{em}(t) - T_{carga}(t) = T_{em}(t) - T_{const} - T_d\cos(\omega_d t) \tag{3}$$

sendo J a constante de inércia global do motor e carga, ω_r a velocidade do rotor e T_{em} o binário eletromagnético gerado pelo motor.

Se se considerar que, em regime permanente, num período de tempo suficientemente curto, o binário eletromagnético do motor é constante e com o mesmo valor da componente constante da carga, estas anulam-se, contribuindo apenas a componente das oscilações da carga para introduzir variações da velocidade do rotor (4):

$$\omega_r(t) = -\frac{1}{J}\int T_d cos(\omega_d t)\, dt = \omega_{r0} - \frac{T_d}{J\omega_d} sin(\omega_d t) \tag{4}$$

A leitura da equação (4) confirma que um aumento do binário de defeito T_d conduz a uma diminuição de velocidade do rotor ω_r relativamente à sua velocidade em regime estacionário ω_{r0}.

Qualquer interferência na velocidade de rotação do rotor tem uma influência direta na frequência e no valor das tensões induzidas neste, as quais originam as correntes nos próprios enrolamentos e, consequentemente, estas correntes ao circularem produzem a força magnetomotriz do rotor que gira relativamente ao próprio rotor a uma velocidade dependente da frequência das correntes induzidas. Em rigor, a variação de velocidade do rotor produz variação na frequência das correntes induzidas e por conseguinte variação do valor da reatância ωL dos enrolamentos do rotor, variando o atraso da corrente relativamente à tensão induzida e consequentemente alterando também o ângulo de fase da força magnetomotriz do rotor FMM. Como os enrolamentos do rotor têm um número reduzido de espiras, o seu coeficiente de autoindução é pequeno e, por conseguinte, a variação da frequência das correntes no rotor produz uma variação do desfasamento desprezável. Tendo isso em atenção e dado se considerar ser pequena a amplitude de variação de velocidade do rotor, desprezar-se-á a variação de desfasamento entre a corrente e a tensão induzida do rotor e, assim, considerar-se-á constante o desfasamento da FMM do rotor que resulta da soma dos campos magnéticos produzidos no rotor que estão em quadratura com as respetivas correntes.

Quando o movimento de oscilação do rotor se dá em sentido contrário ao da rotação deste, produz-se uma diminuição da velocidade, ou seja, um atraso do rotor, logo surge um aumento de tensão induzida nos enrolamentos do rotor, dado aumentar a taxa de variação do fluxo nas respetivas espiras, produzindo um aumento de corrente e consequente aumento da FMM do rotor. Do mesmo modo, quando a oscilação conduz a um aumento de velocidade do rotor, a tensão induzida neste diminui, diminuindo a corrente e respetiva FMM.

Sintetizando, oscilações do binário da carga produzem variações de velocidade das quais resultam variações de amplitude da FMM produzida pelos enrolamentos do rotor.

A força magnetomotriz do rotor, F_r', em situação normal pode ser expressa em função do número de pares de polos e da frequência das correntes do rotor pela equação (5) relativa ao referencial do rotor.

$$F_r'(\theta',t) = F_r \, cos(s\omega_s t - p\theta') \tag{5}$$

em que s representa o deslizamento, p o número de pares de pólos, θ' o ângulo de rotação do vetor força magnetomotriz relativamente ao rotor e F_r o valor máximo da FMM do rotor. Os harmónicos de baixa amplitude resultantes da imperfeição do sistema não serão considerados nesta análise.

A força magnetomotriz do rotor, F_r, referida ao estator (6) pode ser obtida a partir da expressão (5) por substituição das variáveis $\theta = \theta' + \theta_r$, em que θ_r representa o ângulo de desfasamento do rotor relativamente ao estator e θ a posição angular do campo magnético girante produzido pelos enrolamentos do estator (6).

$$F_r(\theta,t) = F_r \, cos(\omega_s t - p\theta) \tag{6}$$

Como se referiu anteriormente, quando o rotor sofre uma diminuição de velocidade, as tensões nele induzidas aumentam, aumentando as próprias correntes que por sua vez conduzem a um aumento da força magnetomotriz produzida por estes enrolamentos. No caso de um aumento de velocidade verifica-se o caso inverso.

Esta variação de amplitude da FMM do rotor, resultante da oscilação do binário de defeito de frequência ω_d, pode ser incorporada na equação (6) obtendo-se uma nova expressão para a força magnetomotriz do rotor (7).

$$F_r(\theta,t) = F_r \, [1 + k\cos(\omega_d t - \varphi_d)].cos(\omega_s t - p\theta) \tag{7}$$

sendo k uma constante que representa a influência da oscilação de velocidade na variação de amplitude da força magnetomotriz do rotor e φ_d o desfasamento do defeito relativamente à origem angular.

Assim, esta expressão inclui o efeito da variação de binário aplicado ao rotor que se reflete numa modulação em amplitude da força magnetomotriz deste. Considerando a simplificação teórica de que pequenas oscilações do rotor não produzem efeito significativo na FFM do estator, esta última, em regime estacionário, pode representar-se pela equação seguinte (8).

$$F_s(\theta,t) = F_s \, cos(\omega_s t - p\theta - \varphi_s) \tag{8}$$

sendo φ_s o desfasamento entre as FMM do estator e do rotor que se assumiu ser constante. Também neste caso, para simplificação, não se consideraram os harmónicos de tempo e espaço resultantes de imperfeições do sistema.

Supondo a relutância do circuito magnético $\mathcal{R}$ constante e desprezando a influência das ranhuras e da não linearidade do entreferro, pode calcular-se a densidade do campo magnético B em função das FMM do rotor e do estator (9).

$$B(\theta,t) = \frac{F_s(\theta,t) + F_r(\theta,t)}{\mathcal{R}} \tag{9}$$

$$= B_s \, cos(\omega_s t - p\theta - \varphi_s) + B_r \, [1 + k \, cos(\omega_d t - \varphi_d)].cos(\omega_s t - p\theta)$$

$$= B_s \, cos(\omega_s t - p\theta - \varphi_s) + B_r \, cos(\omega_s t - p\theta) + kB_r \, cos(\omega_d t - \varphi_d).cos(\omega_s t - p\theta)$$

$$= B_s \, cos(\omega_s t - p\theta - \varphi_s) + B_r \, cos(\omega_s t - p\theta) + \frac{\mathrm{kB_r}}{2} cos((\omega_s - \omega_d)t - \varphi_d - p\theta) + \frac{\mathrm{kB_r}}{2} cos((\omega_s + \omega_d)t - \varphi_d - p\theta)$$

sendo B_s, B_r os valores máximos da densidade do campo magnético do estator e do rotor.

A expressão anterior pode simplificar-se, se se tiver em conta que as componentes fundamentais dos campos magnéticos do estator e do rotor giram à mesma velocidade e se somam vectorialmente resultando a expressão (10) em que B_{s1} representa o valor máximo correspondente e φ_{s1} o desfasamento resultante.

$$B(\theta,t) = B_{s1}\,cos(\omega_s t - p\theta - \varphi_{s1}) + \frac{kB_r}{2}cos((\omega_s - \omega_d)t - \varphi_d + p\theta) + \frac{kB_r}{2}cos((\omega_s + \omega_d)t - \varphi_d - p\theta) \qquad (10)$$

O fluxo de ligação pode ser obtido pelo integral da densidade do campo magnético $B(\theta,t)$ pela superfície do circuito magnético dos enrolamentos do motor. A estrutura dos enrolamentos tem apenas influência direta na amplitude das componentes harmónicas e não altera o valor das próprias frequências. Tendo isso em consideração, partindo da expressão (10) pode obter-se uma expressão genérica (11) para o fluxo de ligação de uma dada fase.

$$\Phi(t) = \Phi_s\,cos(\omega_s t - \varphi_s) + \frac{\Phi_r}{2}cos((\omega_s - \omega_d)t + \varphi_d) + \frac{\Phi_r}{2}cos((\omega_s + \omega_d)t - \varphi_d) \qquad (11)$$

em que Φ_s e Φ_r são constantes.

A corrente absorvida pelo motor está relacionada com o fluxo de ligação através da expressão (12).

$$v(t) - R_s i_s(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} \qquad (12)$$

Calculando a derivada da equação (11) relativa ao fluxo de ligação obtém-se a equação (13).

$$\frac{d\Phi(t)}{dt} = -\omega_s\Phi_s\ sen(\omega_s t - \varphi_s) - (\omega_s - \omega_d)\frac{\Phi_r}{2}\mathrm{sen}((\omega_s - \omega_d)t + \varphi_d) - - (\omega_s + \omega_d)\frac{\Phi_r}{2}\mathrm{sen}((\omega_s + \omega_d)t - \varphi_d) \qquad (13)$$

Considerando a tensão da fonte $v(t)$ constante na equação (12), verifica-se existir uma relação linear entre a derivada do fluxo de ligação e a corrente absorvida pelo motor $i_s\,(t)$ conservando-se o respetivo conteúdo harmónico. Tendo isso em atenção, a partir da expressão (13) obtém-se a equação genérica para a corrente absorvida pelo motor (14).

sendo φ_s o desfasamento entre a componente fundamental da corrente I_s e as componentes de defeito I_d que se podem considerar constantes durante um período de tempo suficientemente curto em que a carga média se pode considerar invariável.

$$i_s(t) = I_s\,sen(\omega_s t - \varphi_s) + \frac{I_d}{2}sen((\omega_s - \omega_d)t + \varphi_d) + \frac{I_d}{2}sen((\omega_s + \omega_d)t - \varphi_d) \qquad (14)$$

Dado que φ_s representa o desfasamento na origem entre a componente fundamental e as bandas laterais correspondentes à existência de defeito, se se considerar a origem das fases coincidente com a componente fundamental, este desfasamento passará para as bandas laterias (15) em que $\varphi_{d1} = \varphi_d + \varphi_s$.

$$i_s(t) = I_s\,sen(\omega_s t) + \frac{I_d}{2}sen((\omega_s - \omega_d)t + \varphi_{d1}) + \frac{I_d}{2}sen((\omega_s + \omega_d)t - \varphi_{d1}) \qquad (15)$$

Tendo em atenção que, em corrente alternada, a origem das fases é normalmente atribuída à tensão da fonte, a corrente absorvida pelo motor de indução está atrasada, relativamente à tensão, de um ângulo φ correspondente ao fator de potência, resultando uma nova expressão para a corrente em que $\varphi_{d2} = \varphi_{d1} + \varphi$ (16).

$$i_s(t) = I_s\, sen(\omega_s t - \varphi) + \frac{I_d}{2} sen((\omega_s - \omega_d)t + \varphi_{d2}) + \frac{I_d}{2} sen((\omega_s + \omega_d)t - \varphi_{d2}) \tag{16}$$

Obtém-se, assim, uma expressão para a corrente elétrica composta por três componentes: uma é relativa à componente fundamental correspondente ao regime estacionário e as outras duas são consequência da oscilação de binário da carga. Estas duas componentes surgem no espetro das frequências como duas bandas laterais igualmente espaçadas de *fd* da componente fundamental de frequência *fs*.

Pode então concluir-se que, de facto, a análise espetral da intensidade de corrente absorvida pelo motor de indução permite identificar a presença de frequências que podem ter origem em defeitos provenientes da carga mecânica acionada por um motor de indução.

Referências

[1] Cardoso, A. J. M., "Diagnóstico e análise da ocorrência de excentricidade estática em motores de indução trifásicos, através da aplicação da Transformada Complexa Espacial (Vetor de Park)", Dissertação de Doutoramento, Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, 1995.

[2] Wu, L., "Separating load torque oscillations and rotor faults in stator current based-induction motor condition monitoring," Ph.D. Thesis, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, U. S. A., 2007.

[3] Attia, H. B., "Detection et localisation de defaults mécaniques d'un entrainment électrique à vitesse variable", Ph.D. dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2003.

[4] Flores, A. Q., "Utilização do Motor de Indução no Diagnóstico de Avarias em Cargas Acopladas", Dissertação de Doutoramento, Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, 2013.