

Capítulo V

Queda de tensão na partida de motores elétricos de indução

INTRODUÇÃO

As indústrias estão repletas de motores elétricos e o de maior aplicação são os motores de indução, por serem os de menor preço e de baixo custo de manutenção. No entanto, quando são acionados elevam a corrente em todos os elementos dos circuitos que os alimentam, desde a fonte de geração até os seus terminais. A elevação da corrente tem como consequência uma redução de tensão em todos os pontos do sistema que de uma forma ou de outra estejam ligados ao circuito do motor.

Em uma instalação industrial, os motores, em geral, são ligados aos Centros de Controle dos Motores (CCMs) de onde partem os circuitos de alimentação desses motores. Nos CCMs estão instalados os dispositivos de proteção dos circuitos de alimentação dos motores e muitas vezes a chave de acionamento.

Embora a queda de tensão durante a partida direta do motor seja elevada, a duração de sua aceleração é de curto tempo, em média 0,5 s a 1,0 s. Esse tempo depende fundamentalmente da inércia da carga acoplada ao eixo do motor, podendo-se obter tempos muito superiores aos indicados anteriormente para cargas de conjugado resistente elevado. Quando a carga possui uma grande inércia, os motores quase sempre são acionados diretamente da rede, pois assim aproveitam o seu conjugado natural de valor elevado na partida, conforme mostrado na Figura 1.

Os motores são classificados em três categorias básicas quanto à curva conjugado \times velocidade de acordo com NBR 17094: [I] categoria N; [II] categoria D; e [III] categoria H, conforme mostrado na Figura 1.

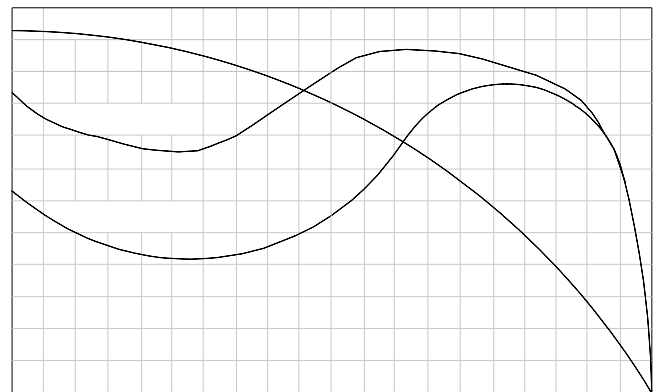


Figura 1 – Curvas características dos motores de indução.

Pode-se observar que os motores de categoria D apresentam um conjugado muito elevado no momento da partida decaindo permanentemente com o aumento da velocidade. São utilizados para cargas com momento de inércia muito elevado, como no caso dos elevadores em geral. Tem corrente de partida normal. Já os motores de categoria N, que constituem a maioria dos motores utilizados nas aplicações de carga normal, tem como característica um conjugado de partida normal, atingindo o seu conjugado máximo na velocidade cerca de 80%. Os motores de categoria H apresentam um conjugado elevado de partida e corrente de partida normal. São utilizados em cargas de inércia muito elevada, tais como britadores.

Como o conjugado de partida varia com a tensão imposta aos terminais do motor no momento do acionamento, deve-se levar em consideração esse parâmetro quando for selecionar a chave de comando. A partida direta dos motores é a forma mais econômica de acionamento que é feita normalmente por

meio do conjunto contactor, relé termomagnético e fusível associado a um dispositivo de proteção diferencial-residual (DPS), ou por meio de disjuntor-motor. O DPS pode ser instalado no circuito de cada motor ou na proteção geral do CCM. No primeiro caso, havendo uma fuga de corrente no circuito do motor e/ou no próprio motor, o DPS aciona o sistema de seccionamento. Logo fica fora de operação aquele motor específico e facilmente se identifica o ponto de defeito. Quando o DPS é instalado junto à chave de comando/proteção do CCM, para uma corrente de fuga, em qualquer circuito dos motores, são desconectados todos os motores do CCM. Isso dificulta a localização do ponto de defeito. No primeiro caso, eleva-se o custo do CCM. Já no segundo caso, o custo é menor, porém, com a desvantagem decorrente do longo período de perda da produção. Na indústria, especificamente, a decisão de selecionar o tipo de partida dos motores deve ser tomada pela análise da queda de tensão durante a partida desses motores. Para aqueles cuja queda de tensão na partida não prejudica a carga que está conectada ao CCM o dispositivo de partida pode ser direto. Quando há interferência na operação do próprio motor e nos demais motores ligados ao mesmo CCM devem-se utilizar dispositivos de compensação de partida: chaves eletromecânicas (estrela x triângulo, compensadora e reator) ou estáticas (soft starters e inversores de frequência).

As chaves de partida estáticas são dotadas de uma função denominada de pulso de tensão de partida (*kick start*) de valor ajustável. Sua finalidade é ajudar os motores com cargas de inércia elevada a iniciar o processo de partida. O valor dessa tensão deverá ser suficientemente elevado para que se possa obter um conjugado motor adequado para vencer o conjugado inicial da carga. Na prática, o pulso de tensão de partida deve ser ajustado entre 75% a 90% da tensão do sistema. Já o tempo de pulso de tensão de partida T_{imp} deve estar ajustado entre 100 ms e 300 ms. Há casos em que é necessário um ajuste maior.

Um exemplo prático para o uso do pulso de tensão de partida refere-se às estações de saneamento em que as bombas, que em muitos casos acumulam lama ou detritos no seu interior, necessitam vencer a sua inércia.

É importante observar que ao habilitar a função do pulso de tensão de partida, fica eliminada a atuação da limitação da corrente de partida e, portanto, o sistema elétrico pode sofrer elevadas quedas de tensão durante o tempo ajustado para o pulso de tensão. Esse recurso só é aconselhável em condições muito desfavoráveis de partida, pois elimina as vantagens da chave estática quanto à queda de tensão reduzida na partida do motor, pois a corrente de partida é muito elevada. Porém, como o tempo de atuação é pequeno, muitas vezes, não influencia no conjugado de partida. Para conjugados resistentes elevados que

SOLUÇÕES ROMAGNOLE SÃO IDEAIS PARA SISTEMAS COMPACTOS E SEGUROS

Especialista na fabricação e montagem de equipamentos homologados ou customizados, possui portfólio amplo de subestações padrão das concessionárias e skids integrados para os diversos tipos de empreendimentos no território nacional e internacional.



CABINES PRIMÁRIAS



SKID RSS 500



SKID RSS 1000



SKID RSS 1250

resulta em tempos elevados durante a partida, não se justifica o uso da chave *soft starter*.

Existem também as chaves estrela x triângulo e as chaves compensadoras. Essas últimas ocupam muito espaço nos CCMs.

Há uma discussão sobre o uso de chaves de partida compensadas para qualquer tipo de motores, por exemplo, acima de 10 cv, mesmo que esses não ofereçam risco de distúrbios durante o seu acionamento, sob o argumento de reduzir a vida útil do motor e/ou da máquina em decorrência do impacto inicial do conjugado resistente.

Por fim, temos a utilização das chaves inversoras muito utilizadas nas indústrias de química e petroquímica, cimento, siderurgia, têxtil, bebidas etc., e é amplamente utilizada no controle de velocidade dos motores elétricos em função do processo de fabricação. Há anos atrás estas questões foram resolvidas com a aplicação de motores de corrente contínua quando se desejava um controle de velocidade contínuo.

Os motores de indução, como se sabe, são robustos, de fácil manutenção e de custo reduzido comparado aos demais. Já os motores de corrente contínua são caros e de manutenção frequente e onerosa. A maioria dos motores de indução utilizada é do tipo rotor em gaiola de esquilo com auto ventilação.

Como se sabe, as perdas de um motor têm origem no ferro e no cobre. As perdas no cobre dependem do valor da carga acionada. Já as perdas no ferro são praticamente constantes com a variação da carga. Quando o motor opera em condições nominais de carga e velocidade angular, as perdas no ferro e no cobre assumem os seus valores nominais. Porém, quando o motor, controlado pelo inversor de frequência, assume velocidades inferiores a sua nominal, mantendo a mesma carga girante, por redução do fluxo refrigerante, aumentará o aquecimento no motor. Nesse caso, é necessário superdimensionar a potência nominal do motor ou utilizar um motor com fator de serviço elevado, dependendo a solução, da faixa de velocidade em que irá operar o motor. No entanto, se ao reduzir a velocidade angular a carga também diminui, como ocorre no bombeamento de líquidos através de bombas centrífugas, a corrente decresce e, conseqüentemente, as perdas diminuem, compensando a deficiência de ventilação.

Deve-se utilizar o inversor de frequência com a mesma tensão nominal do motor. Já a corrente nominal do inversor de frequência deve ser igual ou superior à corrente nominal do motor. Os inversores de frequência fornecem uma forma de onda não inteiramente senoidal, o que implica perdas adicionais no motor em cerca de 15%. No caso de motores já em operação, é necessário verificar se existe capacidade de potência de reserva para compensar o incremento de perda. Em geral, os inversores são dimensionados com um valor da corrente nominal superior à corrente nominal do motor, a fim de atender qualquer necessidade de sobrecarga.

A aplicação de chaves inversoras para controle de velocidade em motores de indução deve ser precedida de uma análise envolvendo as características técnicas do motor, condições operacionais, componentes harmônicas e outras considerações a seguir discutidas.

O uso de inversores de frequência em motores com ventilação independente não resulta em sobreaquecimento, já que o ventilador é acionado por um motor auxiliar.

Os inversores de frequência são equipamentos geradores de correntes harmônicas capazes de prejudicar o desempenho das cargas conectadas ao sistema. Para evitar essa condição é necessário realizar estudos das cargas que poderão ser afetadas pelas componentes harmônicas.

Os motores elétricos operados por chaves inversoras podem desenvolver velocidade desde os valores mínimos necessários (imediatamente superior ao valor nulo) até o valor máximo admitido pelo fabricante do referido motor. Esse limite respeita normalmente o tempo de vida útil dos rolamentos que são afetados severamente pelo regime de velocidade aplicada.

Iremos implementar um exemplo de aplicação utilizando a mesma instalação industrial, vista na Figura 2, estudada no cálculo das correntes de curto-circuito publicado na edição anterior da revista. Considerar as seguintes condições lá previstas: [I] tensão nominal primária: $V_{np} = 13,8kV$; [II] tensão nominal secundária: $V_{ns} = 380 V$; [III] impedância de sequência positiva do sistema de suprimento: $Z_{sp} = 0,0136 + j0,2578 pu$ informada pela concessionária; [IV] potência base dos valores de impedância fornecidos pela concessionária: $100 MVA$. O projetista poderá utilizar outro valor de sua conveniência desde que faça às devidas conversões de base; [V] impedância percentual do transformador: $Z_{pt} = 6\%$; [VI] potência nominal do transformador: $1.500 kVA$; [VII] comprimento do circuito entre o QGF e o CCM4: $30 m$.

Valores calculados no artigo anterior:

- Impedância de sequência positiva do sistema primário de suprimento até o ponto de conexão com a indústria na base $P_b = P_{nt}$: $Z_{sp} = 0,00020 + j0,00387 pu$, sendo P_{nt} a potência nominal do transformador da subestação.

- Impedância do transformador da subestação industrial na base P_b : $Z_{spt} = 0,0103 + j0,0591 pu$

- Impedância do circuito entre o transformador e os terminais do motor na base P_b : $Z_{cir} = 0,02431 + j0,03324 pu$

- Impedância do circuito entre o transformador e o motor M (considerou-se que a distância entre o motor e o Centro de Controle do Motor - CCM é muito pequena o suficiente para desprezar a sua impedância):

$$Z_{us} = Z_{sp} + Z_{spt} + Z_{cir} = 0,03481 + j0,0961 pu \rightarrow |Z_{us}| = 0,10221 pu$$

Há 41 anos levando energia para as principais obras do país.



Conheça
as obras
da mse.



Ano após ano estamos expandindo nossas operações e investindo em tecnologia, com soluções para atender obras industriais, de geração de energia, corporativas e de infraestrutura.

Acesse nosso site e entre em contato com nossa equipe de engenharia.

mse.com.br

mse

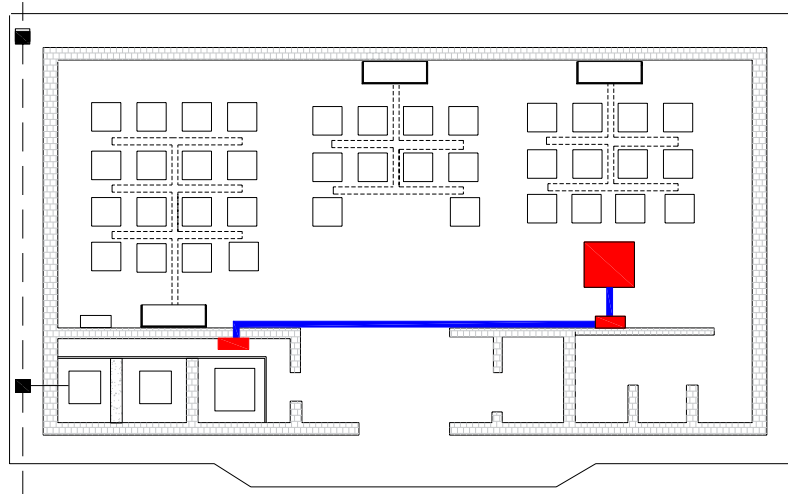


Figura 2 – Planta baixa de uma indústria atendida em média tensão.

VALORES CALCULADOS NA PARTIDA DO MOTOR DE 300 CV

Impedância do motor

- Resistência dos enrolamentos do motor: $R_{um} \cong 0,0pu$ (valor muito pequeno quando comparado com a reatância);
- Reatância dos enrolamentos do motor: X_{um} (valor fornecido pelo fabricante do motor ou calculado tomando como base a relação entre a corrente de partida do motor e a corrente nominal, valor este normalmente dado nos catálogos dos fabricantes);
- Corrente nominal do motor: $I_{nm} = 385,2 A$ (valor fornecido pelo fabricante ou constante na placa do motor);
- Relação entre a corrente de partida do motor, I_{pm} e a corrente nominal do motor I_{nm} : $I_{pm}/I_{nm} = 6,8$ (catálogo)

– Reatância do motor na base de sua potência nominal

$$X_{um} = \frac{I_{nm}}{I_{pm}} = \frac{1}{6,8} = 0,147 pu \text{ (na base de 300 cv)}$$

$$P_{nm} = \frac{P_{mcv} \times 0,736}{\eta \times F_p} = \frac{300 \times 0,736}{0,96 \times 0,88} = 261,3 \text{ kVA}$$

Sendo η o rendimento do motor e F_p o seu fator de potência, valores esses fornecidos pelo fabricante.

– Reatância do motor na base P_b

$$X_{um} = X_{pm} \times \frac{P_2}{P_1} = 0,147 \times \frac{1.500}{261,3} \rightarrow X_{um} = 0,8438 pu \text{ (na potência base } P_{nt})$$

$$\vec{Z}_{um} = 0 + j0,8438 pu$$

Corrente de partida direta do motor

$$\vec{I}_p = \frac{1}{\vec{Z}_{us} + \vec{Z}_{um}} = \frac{1}{\vec{Z}_{tots}} \text{ (corrente de partida do motor em pu na base } P_b)$$

Logo, a impedância total do sistema incluindo a impedância do motor vale:

$$Z_{tots} = Z_{us} + Z_{um} = 0,03481 + j0,09621 + j0,8438 = 0,03481 + j0,94001 pu$$

$$I_p = \frac{1}{0,03481 + j0,94001} = 1,0631 \angle -87,87^\circ pu \rightarrow |I_p| = 1,0631 pu$$

Queda de tensão nos terminais do motor durante a partida direta

$$\begin{aligned} \Delta V_{um} &= Z_{tots} \times I_p = (0,03481 + j0,09621) \times 1,0631 \angle -87,87^\circ \\ &= 0,10877 \angle -17,76^\circ pu = 10,8\% \end{aligned}$$

A queda de tensão 10,8% ultrapassou tenuamente o limite máximo aceitável que é 10% para a partida de motores.

Tensão nos terminais do motor na partida direta do motor

$$V_{up} = 1 - \Delta V_{um} = 1 - 0,10877 = 0,8912 pu = 8,9\%$$

Logo, a tensão nominal do motor é: $380 \times 0,89 = 338,2 V$.

Ou ainda pode ser calculada por:

$$V_{up} = \frac{Z_{um}}{Z_{us} + Z_{um}} = \frac{j0,8438}{(0,03481 + j0,09621) + j0,8438} = 0,8970 \angle 2,12^\circ pu$$

Neste caso, a tensão nos terminais do motor vale:

$$V_{tm} = 0,8970 \times 380 = 340,8 V.$$

Queda de tensão na partida através de chave compensadora no tape 65%

$K = 65\% = 0,65 pu$ (tape de ligação da chave compensadora)

$$I_{pc} = K^2 \times |I_p| = 0,65^2 \times 1,0631 = 0,449 pu \text{ (corrente de partida do motor)}$$

$$\Delta V_{up} = |Z_{us}| \times I_{pc} = 0,10221 \times 0,449 = 0,046 pu = 4,6\%$$

Queda de tensão na partida através de chave estrela-triângulo

$$I_{pc} = 0,33 \times |I_p| = 0,33 \times 1,0631 = 0,3508 pu \text{ (corrente de partida)}$$

$$\Delta V_{up} = |Z_{us}| \times I_{pc} = 0,10221 \times 0,3508 = 0,0358 pu = 3,5\%$$

Queda de tensão no ponto de entrega de energia

$$\Delta V_{up} = Z_{sp} \times |I_p| = (0,00020 + j0,00387) \times 1,0631 = 0,0041 pu = 0,41\%$$

Conjugado de partida

- Partida direta da rede

$$C_{up} = C_{imp} \times \left(\frac{1 - \Delta V_{up}}{1} \right)^2 = C_{imp} \times \left(\frac{1 - 0,10877}{1} \right)^2 = 0,794 \times C_{imp}$$

C_{imp} é o conjugado nominal do motor no momento da partida (veja gráfico da figura 1)

- Partida através da chave compensadora

$$C_{up} = C_{imp} \times \left(\frac{K - \Delta V_{up}}{1} \right)^2 = C_{imp} \times \left(\frac{0,65 - 0,046}{1} \right)^2 = 0,364 \times C_{imp}$$

- Partida através da chave estrela-triângulo

$$C_{up} = C_{imp} \times \left(\frac{1 - \Delta V_{up}}{\sqrt{3}} \right)^2 = C_{imp} \times \left(\frac{1 - 0,0358}{\sqrt{3}} \right)^2 = 0,309 \times C_{imp}$$

CONSIDERAÇÕES FINAIS

- O motor de 300 cv pode ser acionado por um dispositivo de compensação de tensão utilizando um dos dispositivos mencionados na introdução deste artigo e cuja seleção deve ser feita pelo projetista;
- Se não houver cargas sensíveis ligadas ao barramento do CCM, o motor pode ter acionamento direto. Aqui, podemos entender

por cargas sensíveis os dispositivos de TI ou mesmo se há outros motores conectados ao barramento que se possa desligar por perda de conjugado;

- Se o motor for destinado para acionamento de uma bomba, pode-se utilizar a chave estrela x triângulo cuja queda de tensão é muito baixa, conforme foi demonstrado no item “Queda de tensão na partida através de chave-estrela-triângulo”. No entanto, para isso, a bomba deve partir com o registro fechado. Caso isso não seja aceitável por questão de peculiaridades do emprego da bomba, é necessário o uso de uma chave de compensação. Se a bomba, por exemplo, for utilizada em uma estação de tratamento de esgoto, em que durante a madrugada o fluxo dos rejeitos é muito pequeno comparado com os outros horários, é preferível utilizar o inversor de frequência por meio do qual se pode controlar a potência do motor, reduzindo as perdas elétricas, além da partida com conjugado elevado.

**João Mamede Filho é engenheiro eletricista e atualmente é diretor técnico da CPE - Estudos e Projetos Elétricos. Foi professor na Universidade de Fortaleza entre 1979 e 2012 e presidente da Nordeste Energia nos anos 1999 e 2000. É autor dos livros Manual de Equipamentos Elétricos (5ª Edição), Instalações Elétricas Industriais (9ª Edição), Proteção de Sistemas Elétricos de Potência (2ª Edição) e Proteção de Equipamentos Eletrônicos Sensíveis (2ª Edição).*



QUALIDADE
GARANTIDA EM TODAS AS ETAPAS.

Orgulho em ser referência na produção de cabos de alumínio. ⚡

- Isolação XLPE em dupla camada
- Metragem garantida em todos os pedidos
- Alta capacidade produtiva