

Partida de motores elétricos de indução

* Prof. João Mamede Filho

O presente artigo enfocará os distúrbios gerados numa instalação elétrica industrial quando do acionamento de um motor de indução de grande potência, alimentado em tensão secundária, destacando-se, no final, as alternativas dos métodos de partida mais conhecidos .

Durante a partida de um motor elétrico de indução de potência elevada, o sistema de suprimento fica submetido a uma elevada queda de tensão devido ao alto valor da corrente de acionamento, que pode variar entre 4 a 8 vezes a corrente nominal. Esta queda de tensão transitória assume valores muito superiores aos limites estabelecidos pela norma NBR 5410 para funcionamento em regime, ocasionando sérios distúrbios operacionais nos equipamentos de comando e proteção, além de afetar o desempenho do sistema de iluminação, notadamente a incandescente.

Nas instalações em que são utilizados equipamentos eletrônicos, tais como processadores de dados, as quedas de tensão resultantes da partida de motores afetam consideravelmente a operação destas máquinas que, em geral, trabalham numa pequena faixa de variação de tensão. Nas instalações mais simples onde são utilizados sistematicamente contadores para comando do motor em questão e de outras máquinas do sistema, pode haver operação indevida destes equipamentos, já que seu limite de tensão de trabalho é de 85% da nominal, devendo o projetista limitar, a qualquer custo, a queda de tensão a valores nunca superiores a 15%, sob pena de provocar uma saída generalizada das cargas submetidas a este transitório.

Ao contrário do que muitos pensam, a partida dos motores elétricos não afeta, de modo algum, o valor da demanda

registrada nos medidores da concessionária, pois esta é integralizada durante um período de 15 minutos, tempo excessivamente longo, quando comparado com o tempo de partida dos motores. Também o valor do consumo não é basicamente alterado; senão vejamos: consideremos um motor de 300 cv/1V polos/380 V, cuja corrente nominal é de 385,2A para uma corrente de partida igual a 6,8 da nominal, considerando um tempo de acionamento igual a 1,8s e fator de potência durante a partida igual a 0,4 (valor típico).

A corrente da partida vale:

$$I_p = 6,8 I_{nm} = 6,8 \times 385,2 = 2619,3A$$

A potência em kVA solicitada da rede de alimentação vale:

$$kVA_p = \sqrt{3} V \cdot I_p = \sqrt{3} \times 0,38 \times 2619,3 = 1723,9kVA$$

Logo a potência ativa assume o valor de:

$$kW_p = kVA_p \cdot \cos\psi_p = 1723,9 \times 0,4 = 689,5 kW$$

O medidor registrará o consumo de:

$$kWh_p = kW_p \times H = 689,5 \times \left(\frac{1,8}{60 \times 60}\right) = 0,34kWh$$

O medidor registrará uma demanda integralizada de:

$$kW_d = kW_p \times R_t = 689,5 \left(\frac{1,8}{15 \times 60}\right) = 1,3kW$$

* Engo. Eletricista da COELCE.
Professor do Depto. Engenharia Elétrica da UNIFOR.

Como se pode observar, o consumo é desprezível e a demanda verificada é inferior à demanda que o medidor irá registrar em operação de regime que é de:

$$kW_r = 300 \times 0,736 = 220,8kW$$

Aqui também vale lembrar que o valor da corrente de partida não é alterada em função da carga conectada ao eixo do motor. Portanto, o valor da corrente permanece constante independentemente de o motor ser acionado a vazio ou com carga plena. O que se altera é a duração do tempo de partida, cujo valor depende das curvas conjugado x velocidade do motor e da carga. Quanto menor a diferença entre os conjugados do motor e da carga, dados em cada ponto das curvas respectivas, maior será o tempo gasto pelo motor para sair do estado de repouso até adquirir a rotação nominal de regime. Como exemplo, tome-se as curvas da figura 1.

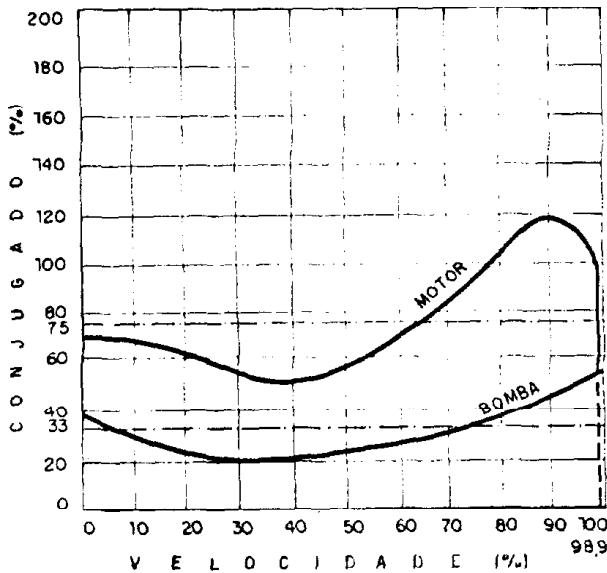


Fig. 1

Voltando-se a analisar a queda de tensão durante a partida do motor, o projetista de uma instalação elétrica industrial deve usar de mecanismos capazes de reduzir a corrente de partida a valores mínimos para obter uma queda de tensão também mínima na rede de alimentação. Porém, há um compromisso que o projetista deverá assumir entre uma redução substancial da corrente de partida e o próprio conjugado da partida do motor. Pois, para se obter baixos valores de corrente de partida, conseqüentemente baixos valores de queda de tensão na rede, é necessário reduzir a tensão nos bornes de conexão do motor, durante o processo de acionamento da máquina. Na prática, se utiliza para isto chaves compensadoras ou estrela-triângulo. Quanto menor for a tensão nos terminais do motor menor será o conjugado de partida, conforme pode-se observar pela expressão:

$$C_p = C_n \left(\frac{V_t}{V_n} \right)^2$$

- C_p — conjugado de partida
- C_n — conjugado nominal
- V_n — tensão nominal do motor
- V_t — tensão nos terminais do motor

Um baixo conjugado de partida poderá inviabilizar o acionamento de um motor em cujo eixo está aplicada a carga nominal, podendo neste caso haver um bloqueio do rotor, trazendo em conseqüência danos aos seus enrolamentos, caso a proteção não atue adequadamente.

A escolha entre a aplicação de uma chave compensadora e de uma estrela-triângulo está ligada, além de fatores econômicos, também a considerações técnicas conforme se pode observar no exemplo adiante desenvolvido.

A chave estrela-triângulo apresenta um sério inconveniente quando operada no tempo indevido. Como se pode observar na figura 2, a comutação da posição estrela para a posição triângulo deve ser feita no ponto correspondente, aproximadamente, ao instante em que o motor adquirir a velocidade de 90% da nominal. Caso contrário a comutação poderá provocar um surto de corrente que, afinal, acaba anulando as vantagens de sua aplicação. Se, por exemplo, a comutação for efetuada quando o motor estiver apenas a 60% da sua velocidade de regime, a corrente assumirá o valor de 440% da corrente de partida com acionamento direto, portanto anulando a vantagem da utilização de chave estrela-triângulo.

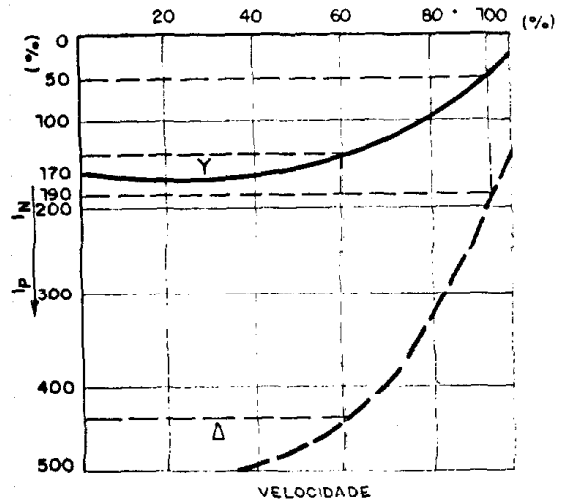


Fig. 2

Esta situação é comum quando se aplica a chave estrela-triângulo com acionamento manual, pois fica a julgamento pessoal do operador o instante de realizar a comutação, o que, em muitos casos, não corresponde ao instante em que o motor adquiriu a velocidade adequada mencionada. Mesmo as chaves estrela-triângulo automáticas, quando não ajustado convenientemente o mecanismo temporizador, apresentam as mesmas deficiências da chave a comando manual.

É bom lembrar que a utilização de chaves de partida com redução de tensão para acionamento de motores de indução somente é necessária quando a queda de tensão na rede, em partida direta, supera o limite de valor estabelecido em projeto. Pode-se estabelecer para este limite o valor de 14% como queda de tensão máxima durante a partida de um motor, desde que esta instalação não contenha nenhum equipamento em operação que possa ser afetado por este transitório. Assim, o referido valor resguarda apenas o limite de atuação dos contadores que em geral é de no máximo 15%. Muitas vezes se observa que em certas instalações in-

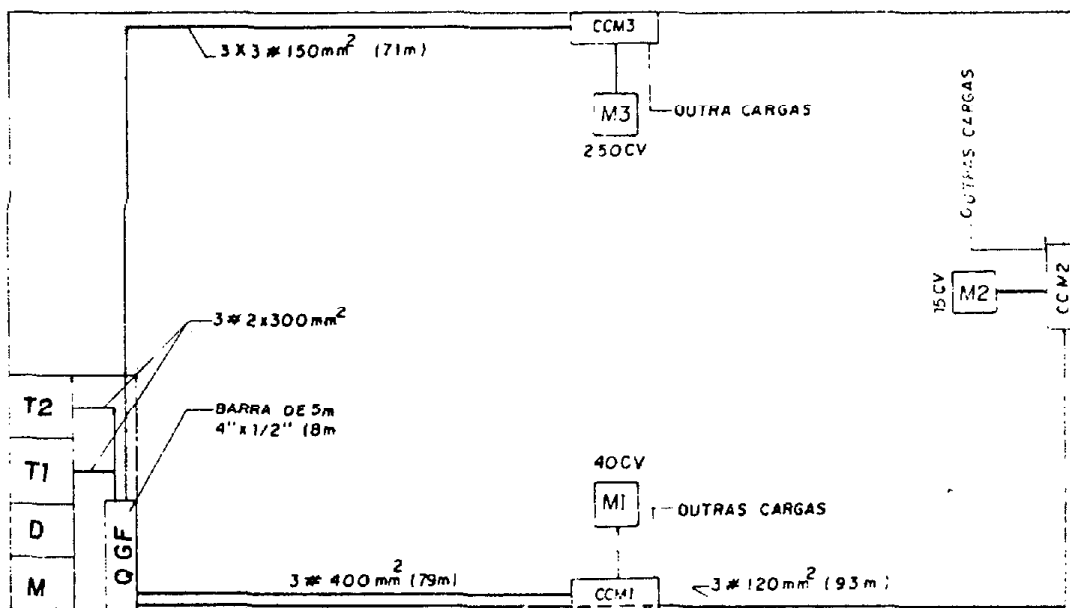


Fig. 3

dustriais são utilizadas indiscriminadamente chaves de partida com redução de tensão e que, na maioria dos casos, os motores a elas acoplados poderiam ser acionados diretamente através de contadores, reduzindo-se, deste modo, o custo da instalação e melhorando-se as condições de partida do próprio motor.

Com o objetivo de sedimentar os conceitos expostos no presente artigo será analisado o caso de uma instalação industrial cujas características são:

- potência de curto-circuito no ponto de entrega: 250 MVA;
- potência da subestação: 2 transformadores em serviço em paralelo de 500 kVA;
- a seção dos condutores de alimentação do GGF e dos CCM's estão definidos na figura 3;
- a resistência e reatâncias dos condutores são:
 - condutor de 120mm² : R ≈ 0,1697Ω ; X = 0,1730Ω
 - condutor de 150mm² : R ≈ 0,1418Ω ; X = 0,1720Ω
 - condutor de 300mm² : R ≈ 0,0755Ω ; X = 0,1690Ω
 - condutor de 400mm² : R ≈ 0,0557Ω ; X = 0,1640Ω
 - barramento de 4''x1/2'' : R = 0,0138Ω ; X = 0,130Ω
- todos os motores são trifásicos de 1V polos, tensões de placa 220/380/660V e frequência de 60Hz;
- a queda de tensão máxima durante a partida dos motores será de 4%, em virtude da existência de componentes eletrônicos ligados à rede.

1. Determinação das Impedâncias dos Circuitos

Serão consideradas somente as impedâncias desde o ponto de entrega de energia até os terminais dos circuitos de distribuição.

Serão escolhidas as seguintes bases:

$$P_B = 1000 \text{ kVA}$$

$$V_B = 380 \text{ V}$$

$$I_B = \frac{1000}{\sqrt{3} \times 0,38} = 1520 \text{ A}$$

1.1. Impedâncias de Seqüência Positiva

1.1.1. Impedância do sistema de alimentação da instalação industrial

a) resistência

$$R_{Us} = 0$$

b) reatância

$$X_{Us} = \frac{P_B}{P_{CC}} = \frac{1000}{250000} = 0,004 \text{ pu}$$

$P_{CC} = 250 \text{ MVA}$ (potência de curto-circuito no ponto de entrega: valor dado)

1.1.2. Impedância dos transformadores

$Z_{pt} = 4,30\%$ (transformadores e pedido)

$P_{cu} = 3000 \text{ W}$ (serão encomendados dois transformadores de perdas reduzidas. Também podem ser utilizados transformadores padronizados)

a) resistência

$$R_{ut} = R_{pt} \frac{P_B}{P_{NT}} \left(\frac{V_{NT}}{V_B} \right)^2 = 0,008 \times \frac{1000}{500} \times \left(\frac{0,38}{0,38} \right)^2 = 0,012 \text{ pu}$$

$$R_{pt} = \frac{P_{cu}}{10P_{NT}} = \frac{3000}{10 \times 500} = 0,6\% = 0,006 \text{ pu}$$

b) reatância

$$Z_{ut} = 0,0430 \times \frac{1000}{500} \times \left(\frac{0,38}{0,38} \right)^2 = 0,086 \text{ pu}$$

$$X_{ut} = \sqrt{0,086^2 - 0,012^2} = 0,086 \text{ pu}$$

1.1.3. Impedância dos condutores que ligam os transformadores ao QGF.

a) resistência

$$R_{UC_1} = R_{C_{300}} \frac{P_B}{1000V^2_B} = 0,000188 \frac{1000}{1000 \times 0,38^2} = 0,001302 \text{ pu}$$

$$R_{C_{300}} = \frac{0,0755 \times 5}{1000 \times 2} = 0,000188$$

b) reatância

$$X_{UC_1} = X_{C_{300}} \frac{P_B}{1000V^2_B} = 0,00042 \frac{1000}{1000 \times 0,38^2} = 0,002908 \text{ pu}$$

$$X_{C_{300}} = \frac{0,188 \times 5}{1000 \times 2} = 0,00042 \Omega$$

Como os dois transformadores vão operar em paralelo, então a impedância equivalente vale:

$$Z_{upt} = \frac{0,0133020 + j0,08890}{2} = 0,006651 + j0,044454$$

$$R_{upt} = 0,006651 \text{ pu}$$

$$X_{upt} = 0,044454 \text{ pu}$$

1.1.4. Impedância do Barramento do QGF

a) resistência

$$R_{ub_1} = \left(\frac{0,0138 \times 8}{1000} \right) \left(\frac{1000}{1000 \times 0,38^2} \right) = 0,000764 \text{ pu}$$

b) reatância

$$X_{ub_1} = \left(\frac{0,130 \times 8}{1000} \right) \left(\frac{1000}{1000 \times 0,38^2} \right) = 0,007202 \text{ pu}$$

O comprimento do barramento foi considerado de 8m.

1.1.5. Impedância total do sistema até os terminais de saída do barramento do QGF.

$$R_{utb} = 0 + 0,006651 + 0,000764 = 0,007415 \text{ pu}$$

$$X_{utb} = 0,004 + 0,044454 + 0,007202 = 0,055656 \text{ pu}$$

1.1.6. Impedância total até o CCM1

a) resistência

$$R_{C_1} = \left(\frac{0,0557 \times 79}{1000} \right) \left(\frac{1000}{1000 \times 0,38^2} \right) = 0,03047 \text{ pu}$$

$$R_{ut} = 0,007415 + 0,03047 = 0,03788 \text{ pu}$$

b) reatância

$$X_{C_1} = \left(\frac{0,184 \times 79}{1000} \right) \left(\frac{1000}{1000 \times 0,38^2} \right) = 0,08972 \text{ pu}$$

$$X_{ut} = 0,055656 + 0,08972 = 0,14537 \text{ pu}$$

1.1.7. Impedância total até o CCM2

a) resistência

$$R_{C_2} = \left(\frac{0,1897 \times 93}{1000} \right) \left(\frac{1000}{1000 \times 0,38^2} \right) = 0,10929 \text{ pu}$$

$$R_{ut} = 0,007415 + 0,10929 = 0,11670 \text{ pu}$$

b) reatância

$$X_{C_2} = \left(\frac{0,173 \times 93}{1000} \right) \left(\frac{1000}{1000 \times 0,38^2} \right) = 0,1142 \text{ pu}$$

$$X_{ut} = 0,055656 + j0,1142 = j0,16707 \text{ pu}$$

1.1.8. Impedância total até o CCM3

a) resistência

$$R_{C_3} = \left(\frac{0,1418 \times 71}{3 \times 1000} \right) \left(\frac{1000}{1000 \times 0,38^2} \right) = 0,02324 \text{ pu}$$

$$R_{ut} = 0,007415 + 0,02324 = 0,03066 \text{ pu}$$

b) reatância

$$X_{C_3} = \left(\frac{0,172 \times 71}{3 \times 1000} \right) \left(\frac{1000}{1000 \times 0,38^2} \right) = 0,02819 \text{ pu}$$

$$X_{ut} = 0,055656 + 0,02819 = 0,08384 \text{ pu}$$

2. Condições de Partida dos Motores

Fica estabelecido que a queda de tensão durante a partida de um motor qualquer não poderá ultrapassar a 4% na barra do seu respectivo CCM. Todos os motores, a princípio, devem partir sob condição de carga nominal.

2.1. Motor de 250 cv

a) Impedância de motor (barramento do CCM3)

$$P_{NM} = \frac{P_{MCV} \times 0,736}{n \times F_p} = \frac{250 \times 0,736}{0,98 \times 0,87} = 220,3 \text{ kVA}$$

$$Z_{um} = \frac{I_{NM}}{I_p} = \frac{1}{6,5} = 0,154 \text{ pu (na base de 250 cv)}$$

$$Z_{umb} = Z_{um} \frac{P_B}{P_{NM}} \times \left(\frac{V_{NM}}{V_B} \right)^2 = 0,154 \frac{1000}{220,3} \times \left(\frac{0,38}{0,38} \right)^2 = 0,699 \text{ pu}$$

$$R_{umb} \cong 0$$

$$X_{umb} = 0,699 \text{ pu}$$

b) corrente de partida

$$I_p = \frac{1}{Z_{us} + Z_{ut} + Z_{ucb} - Z_{um}} \text{ pu}$$

$$I_p = \frac{1}{0,03065 + j0,08384 + j0,699} = 1,276 \text{ pu}$$

$$I_p = 1520 \times 1,276 = 1939,5 \text{ A}$$

c) cálculo da queda de tensão no barramento do CCM3

$$\Delta V_{um} = (Z_{us} + Z_{ut} + Z_{ucb}) I_p = (0,03065 + j0,08384) \times 1,276$$

$$\Delta V_{um} = 0,1139 \text{ pu} = 11,39\%$$

d) cálculo do conjugado de partida

$$C_{up} = C_{un} = \left(\frac{1 - 0,1139}{1} \right)^2 = 0,78 C_{un} = 78\% C_{un}$$

NOTA: desprezou-se a impedância do circuito terminal

2.2. Motor de 40 cv

a) impedância do motor (barramento do CCM1)

$$P_{NM} = \frac{40 \times 0,736}{0,96 \times 0,85} = 36,0 \text{ kVA}$$

$$Z_{um} = \frac{1}{6,7} = 0,149 \text{ pu (na base de 40 cv)}$$

$$Z_{umb} = 0,149 \frac{1000}{36} \left(\frac{0,38}{0,38} \right)^2 = 4,13 \text{ pu}$$

$$R_{umb} \cong 0$$

$$X_{umb} = 4,13 \text{ pu}$$

b) corrente de partida

$$I_p = \frac{1}{0,03788 + j0,14537 + 14,13} = 0,23 \text{ pu}$$

c) cálculo de queda de tensão no barramento do CCM1

$$\Delta V_{um} = (0,03788 + j0,14537) \cdot 0,23 = 0,0345 \text{ pu} = 3,45\%$$

d) cálculo de conjugado de partida

$$C_{up} = \left(\frac{1 - 0,0345}{1} \right)^2 C_{un} = 0,93 C_{un} = 93\% C_{un}$$

2.3. Motor de 15 cv

a) impedância do motor (barramento do CCM2)

$$P_{NM} = \frac{15 \times 0,736}{0,96 \times 0,75} = 15,3 \text{ kVA}$$

$$Z_{um} = \frac{1}{1,8} = 0,128 \text{ pu}$$

$$Z_{umb} = 0,128 \frac{1000}{15,3} \left(\frac{0,38}{0,38} \right)^2 = 8,36 \text{ pu}$$

$$R_{umb} \cong 0$$

$$X_{umb} = 8,36 \text{ pu}$$

b) corrente de partida

$$I_p = \frac{1}{0,11760 + j0,16707 + j8,36} = 0,117 \text{ pu}$$

c) cálculo da queda de tensão no barramento do CCM2

$$\Delta V_{um} = (0,11760 + j0,16707) \cdot 0,117 = 0,024 \text{ pu} = 2,4\%$$

d) cálculo do conjugado de partida

$$C_{up} = \left(\frac{1 - 0,024}{1} \right)^2 C_{un} = 0,952 C_{un} = 95,2\% C_{un}$$

NOTA: Com base nos resultados da queda de tensão durante a partida, conclui-se que o motor de 250 cv deve ser acionado através de dispositivo de compensação. A seguir serão analisadas as alternativas entre a utilização das chaves compensadoras e estrela-triângulo.

2.4. Motor de 250 cv (barramento do CCM3)

a) alternativa de chave compensadora (65%)

$$I_{pL} = K^2 I_p = 0,65^2 \times 1,276 = 0,54 \text{ pu}$$

$$\Delta V_{um} = (0,03065 + j0,08384) \times 0,54 = 0,54 \text{ pu} = 4,8\%$$

b) alternativa da chave estrela-triângulo

$$I_{pL} = 0,33 \times 1,276 = 0,42 \text{ pu}$$

$$\Delta V_{um} = (0,03065 + j0,08384) \cdot 0,42 = 0,037 \text{ pu} = 3,7\%$$

Logo, deverá ser utilizada a chave estrela-triângulo que atende, mesmo no limite, a condição de queda de tensão durante a partida de 4% estabelecida, em função da existência de componentes eletrônicos no sistema de servo-mecanismo das máquinas. Desprezou-se a impedância do circuito terminal do motor.

Como a utilização da chave estrela-triângulo implica num baixo conjugado de partida, o motor em questão deverá ser acionado com um mínimo de conjugado resistente, ou seja:

$$C_{um} = C_{un} \left(\frac{1 - 0,037}{3} \right)^2 = 0,309 C_{un} = 30,9\% C_{un}$$

Quanto ao motor de 40 cv e os demais podem ser acionados através de dispositivo de partida direta.

3. BIBLIOGRAFIA

1. MAMEDE FILHO, J. — *Projeto de Instalações Elétricas Industriais*.
2. BARROS, A. E. — *Queda de Tensão na Partida dos Motores Elétricos*.
3. LACERDA, J. B. de A. — *Queda de Tensão Devido a Partida de Motores*.
4. BECMAN, D. — *Industrial Power Systems Handbook*. Editor.