

INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS

7.^a EDIÇÃO

JOÃO MAMEDE FILHO

Engenheiro eletricista

Ex-Diretor de Planejamento e Engenharia da Companhia Energética do Ceará (1988-1990)

Ex-Diretor de Operação da Companhia Energética do Ceará — Coelce (1991-1994)

Ex-Diretor de Planejamento e Engenharia da Companhia Energética do Ceará (1995-1998)

Ex-Presidente do Comitê Coordenador de Operações do Norte-Nordeste — CCON

Ex-Presidente da Nordeste Energia S.A. — Nergisa (1999-2000)

Atual Presidente da CPE — Consultoria e Projetos Elétricos

Professor de Eletrotécnica Industrial da Universidade de Fortaleza — Unifor (desde 1979)

LTC
EDITORA

CAPÍTULO 7

PARTIDA DE MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO

7.1 INTRODUÇÃO

Os motores elétricos, durante a partida, solicitam da rede de alimentação uma corrente de valor elevado, da ordem de 6 a 10 vezes a sua corrente nominal. Nestas condições, o circuito, que inicialmente fora projetado para transportar a potência requerida pelo motor, é solicitado agora pela corrente de acionamento durante um certo período de tempo. Em consequência, o sistema fica submetido a uma queda de tensão normalmente muito superior aos limites estabelecidos para o funcionamento em regime, podendo provocar sérios distúrbios operacionais nos equipamentos de comando e proteção, além de afetar o desempenho da iluminação, notadamente a incandescente.

Os equipamentos de comando, tais como os contadores, podem operar diante de uma queda de tensão, de acordo com os valores normativos ou com a especificação do próprio fabricante. Também, os motores síncronos e assíncronos, quando submetidos a tensões inferiores aos limites estabelecidos, podem parar por perda de sincronismo ou por insuficiência de conjugado motor.

A Tabela 7.1 fornece os valores percentuais de tensão sob os quais os motores e diversos dispositivos de comando podem operar indevidamente.

Em virtude dos motivos expostos, durante a elaboração de um projeto de instalação elétrica industrial devem ser analisados, dentre os motores de potência elevada, aqueles que podem degradar a operação em regime normal do sistema, a fim de aplicar a solução adequada do método de partida ou dimensionar circuitos exclusivos. Estes circuitos tanto podem ser alimentados do QGF, como diretamente de um transformador, também exclusivo.

Ao contrário do que muitos pensam, a partida dos motores não afeta praticamente em nada o valor da demanda e o consumo de energia elétrica, já que a demanda vista pelo medidor é integralizada no tempo de 15 min, muito superior ao tempo de partida dos motores, normalmente da ordem de 0,5 a 10 s, enquanto o consumo em kWh também é extremamente pequeno, tendo em vista o baixo fator de potência de partida num tempo de pouca expressividade.

Durante a elaboração de um projeto industrial, é de suma importância verificar a possibilidade de partida simultânea de dois ou mais motores de potência muito elevada capaz de provocar graves perturbações na instalação. Medidas preventivas devem ser tomadas de modo a evitar tal fenômeno, cujo assunto será tratado com detalhes mais adiante.

TABELA 7.1

Limites da tensão percentual e seus efeitos no sistema

Tensão de V_{nm} (%)	Consequências
85	Tensão abaixo da qual os contadores da classe 600 V não operam
76	Tensão em que os motores de indução e síncronos deixam de operar, quando funcionando a 115% de sua potência nominal
71	Tensão em que os motores de indução deixam de operar, quando em funcionamento a plena carga
67	Tensão em que motores síncronos deixam de operar

Em algumas instalações industriais, certas máquinas, como os compressores de ar, são instaladas de tal modo que, quando há falta momentânea de energia, os seus respectivos motores retornam automaticamente ao estado de operação após o distúrbio. Se estes motores estiverem ligados a dispositivos de partida que permitam um baixo conjugado e a carga solicitar um alto conjugado de partida, então há grandes possibilidades de estes motores serem danificados se não houver um apropriado sistema de proteção.

Como já mencionado, a iluminação é afetada durante a partida dos motores que solicitam da rede correntes demasiadamente elevadas. As lâmpadas fluorescentes sofrem pouca influência comparativamente às lâmpadas incandescentes. No entanto, são suscetíveis de apagar se a tensão resultante da partida for inferior a 85% da tensão nominal.

Ao contrário das lâmpadas fluorescentes, as lâmpadas incandescentes não apagam quando submetidas a quedas de tensão excessivas. Estão sujeitas, porém, ao fenômeno de cintilação, que prejudica a uniformidade do fluxo luminoso diante de um observador. A cintilação, ou simplesmente *flicker*, é tolerada para valores limitados do número de partidas dos motores num determinado intervalo de tempo.

Segundo a NBR 5410/04 recomenda, a queda de tensão durante a partida de um motor não deve ultrapassar 10% de sua tensão nominal no ponto de instalação do dispositivo de partida correspondente, desde que respeitados os limites previstos para a queda de tensão fornecidos na Tabela 3.21. Pode-se adotar uma queda de tensão superior a 10% em casos específicos, quando são acionadas cargas de alto conjugado resistente, desde que a tensão mínima das bobinas da chave de partida seja inferior à tensão resultante durante a partida do motor.

1.2 INÉRCIA DAS MASSAS

Inicialmente, deve-se conhecer o conceito de carga. Genericamente, pode-se definir carga de um motor como o conjunto de massa formado pelos componentes da máquina que está em movimento e firmemente preso ao eixo do motor.

As cargas acionadas pelos motores elétricos podem ser classificadas de duas diferentes formas:

a) Carga com conjugado constante

É aquela que apresenta o mesmo valor de conjugado durante toda a faixa de variação de velocidade a que é submetido o motor. Nesse caso, a demanda de potência cresce linearmente com a variação da velocidade. Como exemplo, podem ser citados os laminadores, os elevadores de carga, esteira transportadora etc.

b) Carga com potência constante

É aquela em que o conjugado inicial é elevado, reduzindo-se de forma exponencial durante toda a faixa de variação da velocidade. Nesse caso, a demanda de potência permanece constante com a variação da velocidade. Como exemplo, podem ser citadas as bobinadeiras de fios ou de chapas, cujo diâmetro da bobina varia ao longo do processo, necessitando maior conjugado motor para maiores diâmetros e menor conjugado motor para menores diâmetros. Quando o diâmetro da bobinadeira aumenta, a velocidade do motor deve diminuir e vice-versa, mantendo-se, assim, constante a velocidade periférica da bobinadeira.

Agora, pode-se conhecer o conceito de momento de inércia das massas. Assim, o rotor dos motores elétricos apresenta uma determinada massa que *resiste* à mudança de seu estado de movimento. Logo, o rotor *reage* quando, submetido a uma determinada rotação, é obrigado a acelerar. A partir destas considerações básicas, percebe-se que a inércia do rotor é um obstáculo à sua aceleração. Da mesma forma pode-se considerar o movimento das massas que estão ligadas ao eixo do motor, no caso a carga, e que, como o rotor, *resiste* à mudança de movimentos.

O momento de inércia é uma característica fundamental das massas girantes e que pode ser definida como a resistência que os corpos oferecem à mudança de seu movimento de rotação em torno de um eixo considerado, que, no caso do rotor, é a sua própria massa, cuja unidade de medida é o $\text{kg} \cdot \text{m}^2$. A inércia a ser vencida pelo motor é dada pela Equação (7.1).

$$J_{mc} = J_m + J_c \text{ (kg} \cdot \text{m}^2\text{)} \quad (7.1)$$

J_m – momento de inércia do rotor do motor;

J_c – momento de inércia da carga.

7.2.1 Momento de Inércia do Motor (J_m)

Depende do tipo, do fabricante e é função do projeto do motor. Seu valor típico pode ser encontrado na Tabela 6.3.

7.2.2 Momento de Inércia da Carga (J_c)

É um valor particularmente característico do tipo de carga do motor. A NBR 7094 fornece a expressão que permite determinar o valor máximo do momento de inércia J_c , que deve ter uma determinada carga a ser acoplada ao eixo de um motor de potência nominal P_{nm} com N_p de pares de pólos, ou seja:

$$J_c = 0,04 \times P_{nm}^{0,9} \times N_p^{2,5} \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^2) \quad (7.2)$$

P_{nm} – potência nominal do motor, em kW;
 N_p – número de pares de pólos do motor.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (7.1)

Considerar um motor cuja potência nominal seja de 50 cv/380 V, 1V pólos. Determinar o momento de inércia máximo que deve ter a carga a ser acoplada ao seu eixo.

$$J_c = 0,04 \times (0,736 \times 50)^{0,9} \times 2^{2,5} = 5,80 \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$$

A inércia da carga determina o aquecimento do motor durante a partida, devendo-se, portanto, limitar o acionamento ao que estabelece a NBR 7094.

Quando a carga é acoplada ao eixo do motor através de polia, engrenagem ou através de qualquer acoplamento que permita que a sua rotação seja diferente da do motor, pode-se determinar o seu momento de inércia em relação ao eixo do motor através da Equação (7.3).

$$J_{cm} = J_c \times \left(\frac{W_c}{W_{nm}} \right)^2 \quad (7.3)$$

J_{cm} – momento de inércia da carga em relação ao eixo do motor;
 W_{nm} – velocidade angular nominal do eixo do motor, em rpm;
 W_c – velocidade angular do eixo da carga, em rpm.

A Figura 7.1 mostra um exemplo de acoplamento indireto entre carga e motor.

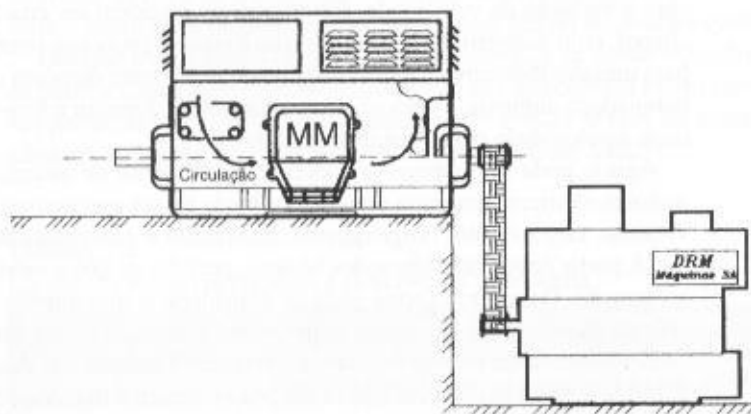


FIGURA 7.1
 Acoplamento indireto motor-
 carga

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (7.2)

Supondo que uma carga esteja acoplada ao eixo do motor de 50 cv mencionado anteriormente, determinar o momento de inércia do conjunto, sabendo-se que a carga é ligada ao motor através de uma polia que lhe permite uma rotação de 445 rpm.

$$J_{cm} = 5,80 \times \left(\frac{445}{1.780} \right)^2 = 0,362 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$W_{na} = 1.800 - 1.800 \times 0,011 = 1.780 \text{ rpm}$$

$$S = 1,1\% \text{ (escorregamento do motor)}$$

7.3 CONJUGADO

Os motores elétricos quando ligados apresentam um esforço que lhes permite girar o seu eixo. A este esforço dá-se o nome de *conjugado do motor*. Já a carga acoplada *reage* a este esforço negativamente, ao que se dá o nome de *conjugado de carga* ou conjugado resistente.

7.3.1 Conjugado do Motor

Todo motor dimensionado para acionar adequadamente uma determinada carga acoplada ao seu eixo necessita, durante a partida, possuir em cada instante um conjugado superior ao conjugado resistente de carga.

A curva do conjugado motor deve guardar uma distância da curva do conjugado resistente durante o tempo de aceleração do conjunto (motor-carga) até que o motor adquira a velocidade de regime. Este intervalo de tempo é especificado pelo fabricante, acima do qual o motor deve sofrer sobreaquecimento, podendo danificar a isolação dos enrolamentos.

Por esse motivo, cuidados especiais devem ser tomados na utilização de dispositivos de partida com redução de tensão. Nessas circunstâncias, o conjugado motor é reduzido, enquanto o conjugado da carga não é alterado. Como consequência, o tempo de aceleração é aumentado e, sendo superior ao tempo de rotor bloqueado, pode danificar o motor.

A Especificação Brasileira de Motores de Indução, que leva no Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial o número NBR 7094, define as características de partida dos motores, que, em seguida, são analisadas resumidamente:

a) Categoria N

Abrange os motores de aplicação geral que acionam a maioria das cargas de utilização prática. Os motores enquadrados nesta categoria apresentam conjugado de partida normal e corrente de partida elevada.

No dimensionamento de motores da categoria N, é aconselhável estabelecer o conjugado mínimo superior em pelo menos 30% ao conjugado resistente da carga. Em situações críticas, pode-se admitir um conjugado mínimo de 15%.

b) Categoria H

Abrange os motores que acionam cargas cujo conjugado resistente durante a partida é de valor aproximado ao conjugado nominal. Os motores enquadrados nesta categoria apresentam conjugado de partida elevado e corrente de partida normal.

c) Categoria D

Abrange os motores que acionam cargas cujo conjugado resistente durante a partida é de valor elevado. Os motores enquadrados nesta categoria apresentam conjugado de partida muito elevado e corrente de partida normal.

A Figura 7.2 apresenta, esquematicamente, as curvas características de *conjugado* \times *velocidade* dos motores de indução, segundo as categorias mencionadas.

7.3.1.1 Conjugado médio do motor

Muitas vezes, para facilidade de cálculo, é desejável substituir a curva de conjugado do motor C_m pelo seu valor médio C_{mm} , conforme representado na Figura 7.3. Neste caso, a soma das áreas A1 e A2 deve ser igual à área A3. Cada categoria de motor obviamente apresenta uma expressão que determina o valor médio de seu conjugado, ou seja:

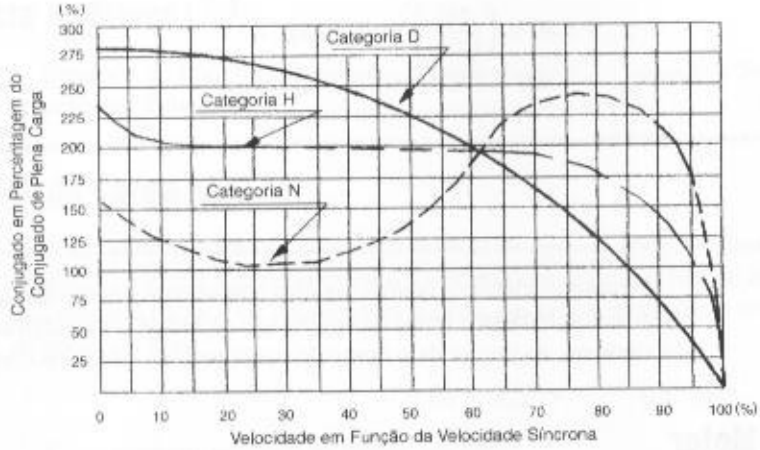


FIGURA 7.2
Curvas típicas conjugado × velocidade

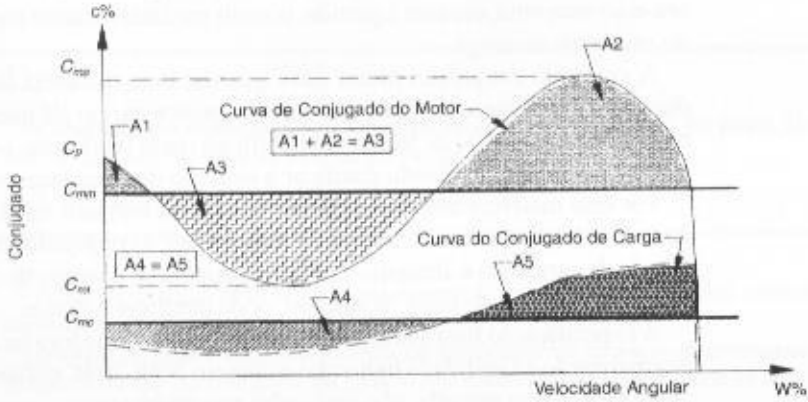


FIGURA 7.3
Curvas de conjugado do motor e de carga

a) Motores de categoria N e H

$$C_{nm} = 0,45 \times (C_p + C_{ma}) \tag{7.4}$$

b) Motores de categoria D

$$C_{nm} = 0,60 \times C_p \tag{7.5}$$

7.3.2 Conjugado da Carga

O conjugado da carga pode reagir de diferentes formas, de acordo com a Equação (7.6).

$$C_c = C_i + \alpha \times W_{nm}^\beta \tag{7.6}$$

- C_c – conjugado da carga, em kgf · m; ou N · m ou, ainda, em % de C_{nm};
- C_i – conjugado da carga em repouso, ou seja, no instante da partida ou conjugado inercial em kgf · m; ou N · m, ou, ainda, em % de C_{nm}. É obtido diretamente dos gráficos dos conjugados da carga apresentados nos catálogos dos respectivos fabricantes das máquinas: bombas, por exemplo;
- W_{nm} – velocidade angular em qualquer instante a que está submetido o motor, em rps, considerando-se que a carga está diretamente solidária ao eixo do motor;
- α – constante que depende das características da carga;
- β – constante que depende da natureza da carga (bombas, ventiladores, britadores etc.).

A partir do valor de β, define-se a forma da curva do conjugado da carga, ou seja:

a) Conjugado da carga constante

É definido para β = 0. Podem ser tomadas como exemplo as cargas acionadas por guindastes, britadores etc. Sua representação gráfica é dada na Figura 7.4, ou seja:

FIGURA 7.4
Conjugado da carga constante

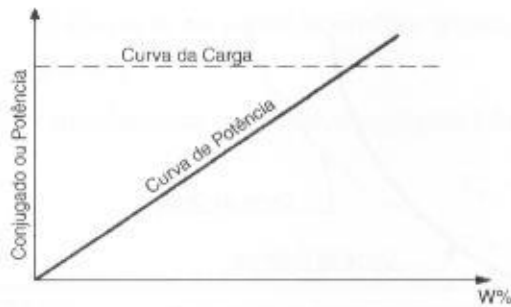
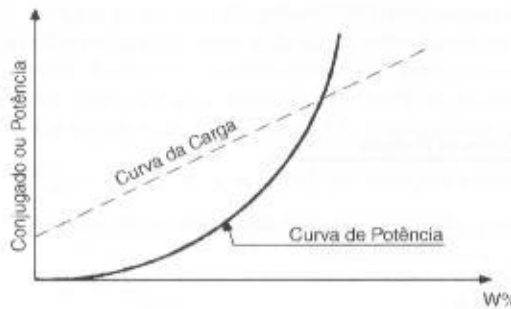


FIGURA 7.5
Conjugado da carga linear



$$C_c = C_i + \alpha \times W_{nm}^0$$

$$C_c = C_i + \alpha \text{ (constante)}$$

Nesse caso, a potência requerida pela carga aumenta na mesma proporção da velocidade angular, ou seja:

$$P_c = K \times W_{nm} \quad (7.7)$$

K – constante que depende da carga.

b) Conjugado de carga linear

É aquele definido para $\beta = 1$. Podem ser tomadas como exemplo a serra para madeira, calandras etc. Sua representação gráfica é dada na Figura 7.5, ou seja:

$$C_c = C_i + \alpha \times W_{nm} \text{ (linear)}$$

Nesse caso, a potência varia com o quadrado da velocidade, ou seja:

$$P_c = C_i \times W_{nm} + K \times W_{nm}^2 \quad (7.8)$$

c) Conjugado da carga parabólico

É aquele definido para $\beta = 2$. Podem ser tomadas como exemplo as bombas centrífugas, ventiladores, compressores, exaustores, misturadores centrífugos etc. Sua representação gráfica é dada na Figura 7.6, ou seja:

$$C_c = C_i + \alpha \times W_{nm}^2 \text{ (parabólico)}$$

Nesse caso, a potência varia com o cubo da velocidade, ou seja:

$$P_c = C_i \times W_{nm} + K \times W_{nm}^3 \quad (7.9)$$

d) Conjugado da carga hiperbólico

É aquele definido para $\beta = -1$. Podem ser tomados como exemplo os tornos elétricos, as bobinadeiras de fio, fresas etc. Sua representação gráfica é dada na Figura 7.7, ou seja:

$$C_i = 0$$

$$C_c = \frac{\alpha}{W_{nm}} \text{ (hiperbólico)}$$

FIGURA 7.6
Conjugado da carga parabólico

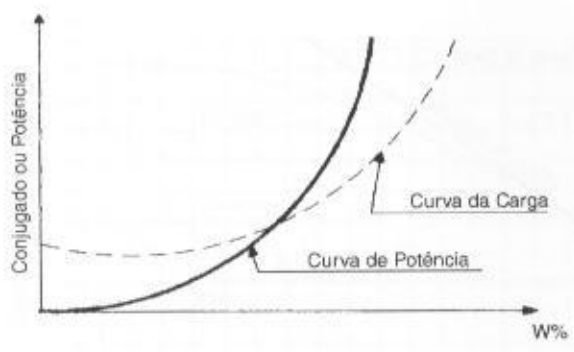
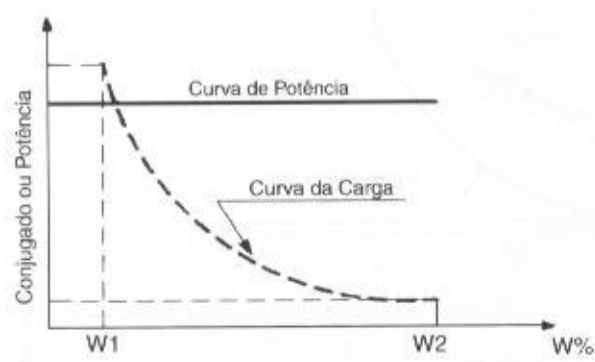


FIGURA 7.7
Conjugado da carga hiperbólico



Nesse caso, a potência permanece constante, ou seja:
 $P_c = K$ (constante)

Como todos os valores da Equação (7.6) já foram facilmente identificados, fica, por conseguinte, determinado o valor de α .

7.3.2.1 Conjugado da carga médio

O conjugado da carga médio pode reagir de diferentes formas, de acordo com a Equação (7.10).

$$C_{mc} = C_i + \alpha \times \frac{W_{nm}^\beta}{\beta + 1} \tag{7.10}$$

W_{nm} – velocidade angular a que está submetida a carga que, neste estudo, é considerada sólida ao eixo do motor e, portanto, ambos submetidos à mesma velocidade.

Semelhantemente ao conjugado médio do motor, pode-se determinar o conjugado médio da carga, C_{mc} , representado na Figura 7.3. Nesse caso, as áreas A4 e A5 devem ser iguais. Com base na Equação (7.10), podem-se obter as seguintes expressões:

- a) Cargas de conjugado constante (Figura 7.4)
 $\beta = 0$

$$C_{mc} = C_i + \alpha \tag{7.11}$$

- b) Cargas de conjugado linear (Figura 7.5)
 $\beta = 1$

$$C_{mc} = C_i + 0,5 \times \alpha \times W_{nm} \tag{7.12}$$

- c) Cargas de conjugado parabólico (Figura 7.6)
 $\beta = 2$

$$C_{mc} = C_i + 0,33 \times \alpha \times W_{nm}^2 \tag{7.13}$$

d) Cargas de conjugado hiperbólico (Figura 7.7)

$$\beta = -1$$

Particularmente, nesse caso, o conjugado é dado com base na Equação (7.6) para $C_i = 0$, ou seja:

$$C_{mc} = \frac{\alpha}{W_{nm}} \quad (7.14)$$

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (7.3)

Um motor de 50 cv/IV pólos/1.780 rpm, categoria N, aciona uma bomba centrífuga. Determinar os conjugados médios do motor e da carga, sabendo-se que o conjugado da carga em repouso é 25% do conjugado nominal do motor. A bomba, cujo conjugado nominal é de 16 mkgf, está acoplada diretamente ao eixo do motor, cujo conjugado máximo é de 240% do seu nominal.

De acordo com a Equação (7.13), o conjugado médio da carga vale:

$$C_{mc} = C_i + 0,33 \times \alpha \times W_{nm}^2 \text{ (o conjugado resistente das bombas é do tipo parabólico)}$$

O valor de α é dado pela Equação (7.6) para a condição de $\beta = 2$.

$$\alpha = \frac{C_c - C_i}{W_{nm}^2}$$

$$C_i = 25\% \times C_{nm}$$

$$C_i = 0,25 \times 19,95 = 4,98 \text{ Kgf} \cdot \text{m}$$

$$C_{nm} = 19,95 \text{ kgf} \cdot \text{m (Tabela 6.3)}$$

$$C_c = 16 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

$$W_{nm} = 1.780 \text{ rpm (a velocidade angular da carga é a mesma velocidade do eixo do motor)}$$

$$W_{nm} = 1.780 \text{ rpm} = \frac{1.780}{60} = 29,66 \text{ rps}$$

$$\alpha = \frac{16 - 4,98}{29,66^2} = 0,0125$$

$$C_{mc} = 4,98 + 0,33 \times 0,0125 \times 29,66^2$$

$$C_{mc} = 8,6 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

De acordo com a Equação (7.4), o conjugado médio do motor vale:

$$C_{nm} = 0,45 \times (C_p + C_{ms})$$

$$C_{ms} = 240\% C_{nm}$$

$$C_{ms} = 2,4 \times 19,95 = 47,8 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

$$C_p = 3 \times C_{nm} \text{ (Tabela 6.3)}$$

$$C_p = 2 \times 19,95 = 59,85 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

$$C_{nm} = 0,45 \times (47,8 + 59,85)$$

$$C_{nm} = 107,6 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

7.3.2.2 Estimativa do conjugado da carga

Como será visto adiante, a escolha das chaves de partida dos motores necessita do conhecimento do comportamento do conjugado da carga ao longo do processo de partida. É muito difícil encontrar no catálogo do fornecedor da máquina a curva *conjugado* \times *velocidade*. Afora do uso dos laboratórios especializados, o conjugado da carga pode ser determinado de forma aproximada, registrando-se os valores de corrente para as diferentes condições de operação do motor, desde o momento de sua partida até o momento de operação nominal. Além disso, deve-se fazer os mesmos registros nas condições de sobrecarga eventual. Para isso, pode-se aplicar a Equação (7.15), ou seja:

$$C_c = \frac{P_{nm} \times 0,736 \times 10^3}{\frac{2 \times \pi}{60} \times W_{nm}} \text{ (N} \cdot \text{m)} \quad (7.15)$$

P_{nm} – potência nominal do motor, cv;

W_{nm} – velocidade angular do motor, em rpm.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (7.4)

Um motor de 100 cv/IV pólos/380 V aciona uma determinada carga. Foram registradas com um medidor digital de precisão as correntes durante o acionamento do motor, cujos valores estão expressos na Tabela 7.2. O rendimento do motor a plena carga vale 92%.

TABELA 7.2
Correntes registradas durante a aceleração do motor

Variação do Tempo (s)	Corrente (A)	Conjugado na Aceleração (kgf · m)
0:00	783	263
0:10	758	255
0:20	727	244
0:30	680	228
0:40	620	208
0:50	530	177
1:00	450	150
1:10	370	123
1:20	215	70
1:30	117	37

- Cálculo do conjugado nominal

$$C_c = \frac{P_{nm} \times 0,736 \times 10^3}{\frac{2 \times \pi}{60} \times W_{nm}} = \frac{100 \times 0,736 \times 10^3}{\frac{2 \times \pi}{60} \times 1.770} = 397 \text{ N} \cdot \text{m} \rightarrow C_c = 39,7 \text{ kgf} \cdot \text{m} = 397 \text{ N} \cdot \text{m}$$

- Cálculo da taxa de conjugado por corrente que produz torque

$I_{nm} = 117 \text{ A}$ (corrente nominal)
 $\eta = 0,92$

- Corrente que produz torque motor

$$I_{tor} = \eta \times I_{nm} = 0,92 \times 117 = 107,6 \text{ A}$$

- Corrente que só produz perda

$$I_{per} = (1 - 0,92) \times 117 = 9,36 \text{ A}$$

- Conjugado que produz torque, por ampère

$$R_{ct} = \frac{397}{117} = 3,4 \text{ N} \cdot \text{m/A}$$

- Cálculo do conjugado durante a aceleração

- No momento da partida

$$C_{acel} = (783 - 9,36) \times 3,4 = 2.630 \text{ N} \cdot \text{m} \rightarrow C_{acel} = 263 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

- A 50% da velocidade de aceleração

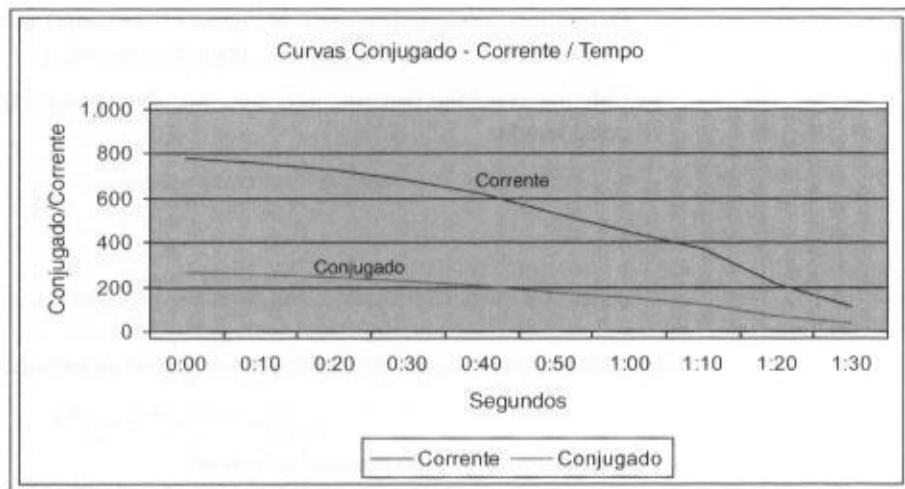
$$C_{acel} = (530 - 9,36) \times 3,4 = 1.770 \text{ N} \cdot \text{m} \rightarrow C_{acel} = 177 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

- No final do período de aceleração ou conjugado nominal

$$C_{acel} = (117 - 9,36) \times 3,4 = 366 \text{ N} \cdot \text{m} \rightarrow C_{acel} = 37 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

A Figura 7.8 mostra as curvas de conjugado e corrente durante a aceleração do motor. Já a Tabela 7.2 reproduz os dados da Figura 7.8.

FIGURA 7.8
Curvas conjugado e corrente \times tempo



7.4 TEMPO DE ACELERAÇÃO DE UM MOTOR

A determinação do tempo de aceleração de um motor acoplado a uma carga é baseada no conhecimento das curvas dos conjugados do motor e da carga traçadas num mesmo gráfico.

Divide-se a velocidade angular em intervalos de pequenos incrementos, calculando-se para cada incremento o tempo correspondente à aceleração nesses intervalos, com base no conjugado médio desenvolvido a cada incremento.

A seguir será explanada a metodologia de cálculo:

- Conhecer os momentos de inércia do motor (J_m) e da carga (J_c) na unidade $\text{kg} \cdot \text{m}^2$.
- Conhecer as curvas dos conjugados do motor e da carga representadas genericamente no gráfico da Figura 7.9.
- Escolher os incrementos percentuais e aplicá-los sobre a velocidade angular síncrona W_s . Normalmente, atribuem-se incrementos regulares de 10%, exceto para os intervalos da curva, onde os conjugados assumem valores de acentuada declividade.

$$W_1 = 0 \times W_s \text{ rpm}$$

$$W_2 = 10\% \times W_s \text{ rpm}$$

- Determinar a diferença entre as velocidades.

$$\Delta W = W_2 - W_1 \text{ rpm}$$

- Determinar, pelo gráfico da Figura 7.9, os conjugados percentuais do motor (C_{m1} , C_{m2}) à velocidade angular W_1 e W_2 , respectivamente.

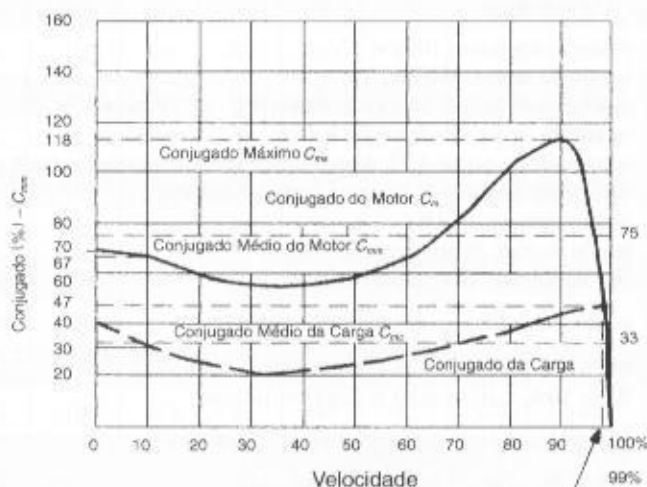


FIGURA 7.9
Curvas conjugado \times velocidade
do motor e da carga

- f) Determinar, ainda, pelo gráfico da Figura 7.9, os conjugados, em percentagem, da carga (C_{c1} , C_{c2}) à velocidade angular W_1 e W_2 , respectivamente.
- g) Calcular as médias percentuais dos conjugados do motor (C_{mm}) e da carga (C_{mc}) no intervalo considerado.

$$C_{mm} = \frac{C_{m1} + C_{m2}}{2} \quad (\%) \quad (7.16)$$

$$C_{mc} = \frac{C_{c1} + C_{c2}}{2} \quad (\%) \quad (7.17)$$

- h) Calcular o conjugado de aceleração percentual desenvolvido no intervalo considerado.

$$C_{ap} = C_{mm} - C_{mc} \quad (\%) \quad (7.18)$$

- i) Calcular o conjugado nominal do motor.

$$C_{mc} = \frac{0,716 \times P_{nm}}{W_{nm}} \quad (\text{kgf} \cdot \text{m}) \quad (7.19)$$

P_{nm} – potência nominal do motor, em cv;

W_{nm} – velocidade angular nominal do motor, em rpm.

Os motores assíncronos, funcionando com carga nominal, possuem escorregamento variável entre 1 e 5%.

- j) Calcular o conjugado de aceleração no intervalo considerado.

$$C_{ac} = C_{mm} \times C_{ap} \quad (\text{kgf} \cdot \text{m}) \quad (7.20)$$

- k) Calcular o tempo de aceleração do motor entre os instantes de velocidade angular W_1 e W_2 .

$$T = \frac{J_{mc} + \Delta W}{94 \times C_{ac}} \quad (\text{s}) \quad (7.21)$$

Esse processo se repete até o motor atingir a velocidade de regime. Por ser um método normalmente trabalhoso, é conveniente que seja elaborado um programa para computador. Quando não se deseja uma maior precisão no resultado, o tempo de aceleração pode ser obtido através dos conjugados médios do motor e da carga durante todo o intervalo de acionamento, isto é, do estado de repouso até a velocidade de regime.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (7.5)

Determinar o tempo de aceleração de um motor de categoria N, ao qual está acoplada uma bomba hidráulica, cujas curvas conjugado \times velocidade estão mostradas na Figura 7.9. Os dados disponíveis do motor, da carga e do sistema são:

- potência do motor: 100 cv;
- tensão do motor: 380/660 V;
- momento de inércia do motor: 1,0600 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ (Tabela 6.3);
- momento de inércia da carga: 9,4 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ (valor dado);
- conjugado da carga: 47% do conjugado nominal do motor (veja gráfico da Figura 7.9);
- velocidade angular síncrona do motor: 1.800 rpm;
- escorregamento: 1,1%;
- tensão da rede de alimentação: 380 V;
- tipo de acionamento: direto da rede.

- a) Incrementos percentuais

$$W_1 = 0\% \times W_s = 0 \times 1.800 = 0 \text{ rpm}$$

$$W_2 = 10\% \times W_s = 0,10 \times 1.800 = 180 \text{ rpm}$$

- b) Variação da velocidade no intervalo de 0 a 10%

$$\Delta W = W_2 - W_1 = 180 - 0 = 180 \text{ rpm}$$

A aplicação dessa metodologia a cada intervalo de tempo considerado até o motor atingir a velocidade de regime permite calcular o tempo total gasto na partida. A formação da Tabela 7.3 auxilia a sequência de cálculo.

O tempo total de aceleração do motor é $T = 12,03$ s.

Esse mesmo valor poderia ser obtido também com base nos valores médios de conjugado do motor e da carga, ou seja:

a) Conjugado médio do motor

Por se tratar de motor de categoria N, adotar a Equação (7.4).

$$\begin{aligned}C_{nm} &= 0,45 \times (C_p + C_{na}) \\C_p &= K_1 \times C_{nm} = 0,70 \times 40,2 = 28,14 \text{ kgf} \cdot \text{m} \\K_1 &= 70\% = 0,70 \text{ (gráfico da Figura 7.9)} \\C_{na} &= 40,2 \text{ kgf} \cdot \text{m} \text{ (Tabela 6.3)} \\C_{na} &= K_2 \times C_{nm} = 1,18 \times 40,2 = 47,43 \text{ kgf} \cdot \text{m} \\K_2 &= 118\% = 1,18 \text{ (gráfico da Figura 7.8)} \\C_{nm} &= 0,45 \times (28,14 + 47,43) = 34,0 \text{ kgf} \cdot \text{m}\end{aligned}$$

b) Conjugado médio da carga ou resistente

Por se tratar de uma carga de conjugado parabólico, adotar a Equação (7.13).

$$\begin{aligned}C_{nc} &= C_i + 0,33 \times \alpha \times W_c^2 \\C_i &= K_3 \times C_{nc} = 0,40 \times 40,2 = 16,08 \text{ kgf} \cdot \text{m} \\K_3 &= 40\% = 0,40 \text{ (gráfico da Figura 7.9)}\end{aligned}$$

Da Equação (7.6), toma-se o valor de α para $\beta = 2$.

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{C_c - C_i}{W_{nc}^2} = \frac{18,9 - 16,08}{29,67^2} = 0,0032 \\C_c &= 47,0\% \times C_{nm} = 0,47 \times 40,2 = 18,9 \text{ kgf} \cdot \text{m} \\W_c &= \frac{1.800 - 0,011 \times 1.800}{60} = 29,67 \text{ rps} \\W_{nc} &= 29,67 \text{ rps} \text{ (acoplamento direto: carga e motor)} \\C_{nc} &= 16,08 + 0,33 \times 0,0032 \times 29,67^2 \\C_{nc} &= 17,0 \text{ kgf} \cdot \text{m}\end{aligned}$$

c) Tempo de aceleração

De acordo com a Equação (7.20), toma-se o valor do tempo de aceleração do motor.

$$\begin{aligned}T_{ac} &= \frac{J_{mc} \times \Delta W}{94 \times C_{ac}} = \frac{10,46 \times 1.780}{94 \times 17,0} = 11,65 \text{ s} \\C_{ac} &= C_{nm} - C_{nc} = 34,00 - 17,0 = 17,0 \text{ kgf} \cdot \text{m}\end{aligned}$$

De forma imprecisa, esse valor ainda poderia ser obtido traçando-se aproximadamente os valores médios dos conjugados motor e da carga, conforme se mostra no gráfico da Figura 7.9, ou seja:

$$\begin{aligned}C_{acp} &= 75 - 33 = 42\% \text{ (valores marcados com aproximação no gráfico da Figura 7.9).} \\C_{ac} &= 0,42 \times 40,2 = 16,88 \text{ kgf} \cdot \text{m} \\T_{ac} &= \frac{J_{mc} \times \Delta W}{94 \times C_{ac}} = \frac{10,46 \times 1.780}{94 \times 16,88} = 11,73 \text{ s}\end{aligned}$$

Observar que os três resultados são praticamente iguais. É importante também saber que os motores de indução trifásicos acionados sob carga plena apresentam um tempo total de aceleração variável entre 2 e 15 s, na maioria dos casos. Quando o acionamento é feito através de redução de tensão, o tempo de aceleração é função dos ajustes aplicados aos dispositivos de partida.

7.1 Influência da Partida de um Motor sobre o Consumo e a Demanda de Energia Elétrica

A partida de um motor elétrico de indução pouco influencia no consumo e na demanda registrados no medidor de energia elétrica de uma instalação.

a) Influência sobre o consumo

O medidor de consumo de energia elétrica registra somente a potência ativa absorvida pela carga num intervalo de tempo determinado. Como o fator de potência de partida dos motores elétricos

de indução é muito pequeno, da ordem de 0,30 a 0,40, e o tempo de partida destes motores é também de valor reduzido, o consumo de energia no intervalo de partida é, conseqüentemente, muito pequeno.

b) Influência sobre a demanda

Muitas vezes se confunde a corrente de partida elevada, característica do acionamento dos motores elétricos de indução, com um conseqüente e proporcional aumento de demanda. Na realidade, mesmo o motor partindo no período de demanda máxima, o acréscimo de demanda é muito pequeno. Isto se deve ao fato de o medidor da concessionária de energia elétrica registrar a demanda máxima integrando todas as demandas transitórias no período de 15 min. Logo, a partida do motor, apesar de solicitar da rede uma corrente elevada, tem uma duração muito pequena quando comparada com o tempo de integração do medidor. Ademais, a corrente de partida é acompanhada de um fator de potência muito baixo. E como o medidor registra potência ativa, kW, e não potência aparente, kVA, a potência ativa envolvida neste transitório é relativamente pequena, quando comparada com a potência total solicitada pela rede de alimentação.

A partida com carga ou através de chaves de redução de tensão é, acentuadamente, mais lenta que a partida com motor a vazio ou utilizando dispositivos de partida direta. Ainda continuam válidas, porém, as afirmações anteriores, pois, mesmo que o intervalo de tempo na partida tenha sido ampliado, a potência ativa correspondente é severamente reduzida. Assim, é aconselhável desligar todos os motores ligados desnecessariamente, a fim de economizar energia elétrica. Para demonstrar a grandeza do acréscimo do consumo e demanda durante a partida de um motor de indução, veja o exemplo seguinte:

EMPLO DE APLICAÇÃO (7.6)

Considerar uma indústria dotada de várias cargas, dentre elas a de um motor de 200 cv/380 V – 4V pólos acionado diretamente da rede. O consumo médio mensal da instalação é de 100.000 kWh e a demanda registrada de 685 kW no horário de ponta de carga. Determinar os acréscimos de consumo e demanda durante a partida do motor de 200 cv. Os valores da tarifa de consumo e demanda de energia estão contidos na Tabela 1.13. O tempo de partida do motor é de 2 s, o fator de potência 0,35.

a) Demanda de partida do motor, em kW

$$D_1 = \sqrt{3} \times V_{sm} \times I_{pm} \times \cos \psi = \sqrt{3} \times 0,38 \times 1.871,2 \times 0,35 = 431,05 \text{ kW}$$

$$I_{pm} = K \times I_p = 6,9 \times 271,2 = 1.871,2 \text{ A}$$

$$I_p = 271,2 \text{ A (Tabela 6.3)}$$

$$K = 6,9 \text{ (Tabela 6.3)}$$

$$\cos \psi = 0,35 \text{ (valor de resultado prático)}$$

b) Energia consumida no intervalo de partida de 2 s

$$E_{el} = D_1 \times T_p = 431,05 = \frac{2}{3.600} = 0,239 \text{ kWh}$$

c) Energia consumida no intervalo de 15 min de integração do medidor

$$E_2 = 0,239 + 200 \times 0,736 \times \left(\frac{15 \times 60 - 2}{3.600} \right) = 36,95 \text{ kWh}$$

d) Demanda registrada pelo medidor no intervalo de 15 min considerando-se toda a carga da instalação ligada

$$D_m = \left(685 - 200 \times 0,736 + 36,95 \frac{\text{kWh}}{1/4 \text{ h}} \right) = 685,60 \text{ kW}$$

e) Acréscimo na fatura de energia

A conta de energia, sem considerar a partida do motor na hora de ponta, vale:

$$C_1 = 685 \times 3,23 + 100.000 \times 0,278 = \text{US\$ } 30.012,55$$

A conta de energia considerando a partida do motor na hora de ponta vale:

$$C_2 = 685,60 \times 3,23 + (100.000 + 0,239) \times 0,278 = \text{US\$ } 30.014,55$$

$$C_2 = \Delta C = C_2 - C_1 = 30.014,55 - 30.012,55 = \text{US\$ } 2,00$$

Vale ressaltar que nas próximas partidas durante aquele mês de leitura do medidor somente se contará o consumo correspondente, pois a demanda já atingiu o seu valor máximo e somente será afetada se for registrado o acionamento de um segundo motor no mesmo instante da partida da máquina de 200 cv. Para que o medidor não registre a partida simultânea de todos os motores, em muitas indústrias costuma-se desligar o disjuntor geral quando ocorre a falta de energia na rede de alimentação, o que não é necessário, na maioria delas, devido, normalmente, ao fato de os contadores e as chaves de partida com redução de tensão que ligam os referidos motores terem as suas bobinas ligadas a um autocontato auxiliar que impede a partida de qualquer máquina com o retorno da tensão de alimentação.

7.4.2 Influência de Partidas Frequentes sobre a Temperatura de Operação do Motor

Durante a partida, a elevada corrente resultante provoca perdas excessivas nos enrolamentos estatóricos e rotóricos. Se o motor já está em operação e, portanto, aquecido à sua temperatura de regime, e se for desligado e logo em seguida religado, sem que haja tempo suficiente para a temperatura de suas partes ativas declinarem de um certo valor, este procedimento pode elevar a temperatura dos enrolamentos a níveis superiores àqueles indicados para a classe de isolamento do motor.

Há muitas aplicações em que o motor funciona em ciclos de operação que leva a freqüentes acionamentos. Neste caso, é necessário especificar o motor para aquela atividade em particular. A verificação da capacidade do motor em funcionar para um ciclo de operação determinado pode ser obtida da seguinte forma:

a) Determinação do tempo de aceleração

Este procedimento já foi discutido na seção anterior.

b) Potência de perda nos enrolamentos durante a partida transformada em calor

- Enrolamentos estatóricos

$$P_e = \frac{3 \times R_e \times I_p^2}{1.000} \text{ (kW)} \quad (7.22)$$

R_e – resistência estatórica, em Ω ;

I_p – corrente de partida, em A.

- Enrolamentos rotóricos

$$P_r = \frac{0,01974 \times J_{mc} \times W_r^2}{F^2 \times T_{ac}} \text{ (kW)} \quad (7.23)$$

W_s – velocidade angular síncrona do motor, em rpm;

F – freqüência da rede, em Hz;

J_{mc} – momento de inércia do motor e da carga em $\text{kg} \cdot \text{m}^2$;

T_{ac} – tempo de aceleração do motor, em s.

Logo, a potência de perda total na partida vale:

$$P_p = P_e + P_r$$

c) Potência de perda em regime normal

$$P_m = P_{nm} \times 0,736 \times \frac{1 - \eta}{\eta} \quad (7.24)$$

P_{nm} – potência nominal do motor;

η – rendimento do motor.

d) Potência de perda eficaz referente à operação normal durante o ciclo de carga

$$P_d = \sqrt{\frac{\sum (P_p^2 \times T_{ac} + P_m^2 \times T_r)}{\sum T_c}} \text{ (kW)} \quad (7.25)$$

T_{ac} – tempo de aceleração do motor;

T_r – tempo de regime de operação normal, em s;

T_c – tempo total de um ciclo completo de operação, em s.

e) Temperatura do motor devida ao ciclo de operação

Neste caso, considera-se que a temperatura do ambiente esteja a 40°C. Logo, a elevação de temperatura acima da temperatura ambiente é de:

$$\Delta T_{op} = \frac{\Delta T_n \times P_{ef}}{P_m} \quad (^\circ\text{C}) \quad (7.26)$$

ΔT_{op} – elevação da temperatura acima da ambiente, em °C;

ΔT_n – elevação de temperatura nominal do motor, em °C.

A sobrelevação da temperatura nominal dos motores depende de sua classe de isolamento, cujos valores são dados na Tabela 7.4.

TABELA 7.4

Sobrelevação de temperatura nominal

Classe de Isolamento	Sobrelevação de Temperatura	Acréscimo para o Ponto Mais Quente	Limite da Temperatura
A	60	5	105
E	75	5	120
B	80	10	130
F	100	15	155
H	125	15	180

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (7.7)

Considerar um motor de 300 cv/380 V – IV pólos, cuja resistência do enrolamento estatístico é de 0,016 Ω/fase. O momento de inércia da carga está no limite da capacidade do motor. O escorregamento do motor é de 1, 1% e tem classe de isolamento F. O ciclo de acionamento do motor é dado na Figura 7.10. Determinar a temperatura do motor para o ciclo de carga considerado.

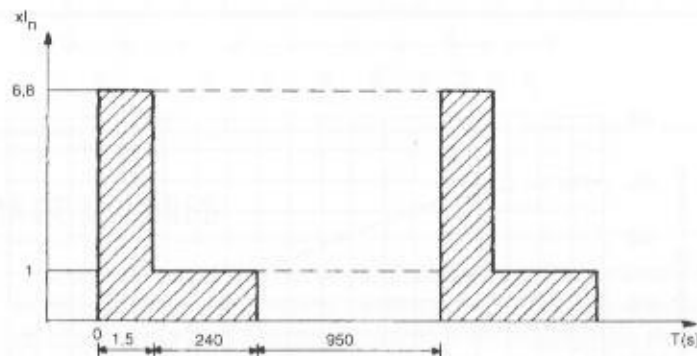


FIGURA 7.10
Ciclo de acionamento do motor

a) Momento de inércia da carga

De acordo com a Equação (7.2), tem-se:

$$J_c = 0,04 \times P_{m0}^{0,9} \times N_p^{2,5}$$

$$J_c = 0,04 \times (0,736 \times 300)^{0,9} \times 2^{2,5} = 29,12 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

b) Momento de inércia motor-carga

$$J_{mc} = J_m + J_c = 6,66 + 29,12 = 35,78 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_m = 6,66 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \text{ (Tabela 6.3)}$$

c) Potência de perda nos enrolamentos durante a partida

• Enrolamentos estatóricos

$$P_e = \frac{3 \times R_s \times I_p^2}{1.000} = \frac{3 \times 0,016 \times 2.619,3^2}{1.000} = 329,31 \text{ kW}$$

$$I_p = 6,8 \times I_{av} \text{ (Figura 7.10)}$$

$$I_p = 6,8 \times 385,2 = 2.619,3 \text{ A}$$

• Enrolamentos rotóricos

De acordo com a Equação (7.23), tem-se:

$$P_r = \frac{0,01974 \times 35,78 \times 1.800^2}{60^2 \times 1,5} = 423,77 \text{ kW}$$

$$T_{ar} = 1,5 \text{ s (Figura 7.10)}$$

d) Potência total de perda na partida

$$P_p = P_e + P_r = 329,31 + 423,77 = 753,08 \text{ kW}$$

e) Potência de perda em regime normal

$$P_{rs} = P_{av} \times 0,736 \times \frac{1-\eta}{\eta} = 300 \times 0,736 \times \frac{1-0,96}{0,96} = 9,2 \text{ kW}$$

$$\eta = 0,96 \text{ (Tabela 6.3)}$$

f) Potência de perda eficaz

$$P_{ef} = \sqrt{\frac{\sum (P_p^2 \times T_{ac} + P_{rs}^2 \times T_r)}{\sum T_c}} = \sqrt{\frac{753,08^2 \times 1,5 + 9,2^2 \times 240}{1.191,5}}$$

$$P_{ef} = 27,03 \text{ kW}$$

$$T_r = 240 \text{ s (Figura 7.10)}$$

$$T_c = 1,5 + 240 + 950 = 1.191,5 \text{ s}$$

g) Temperatura do motor devida ao ciclo de carga

$$\Delta T_{op} = \frac{\Delta T_n \times P_{ef}}{P_m} = \frac{100 \times 27,03}{9,2} = 293,8^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_n = 100^\circ\text{C (Tabela 7.4)}$$

Conclui-se que o motor fica submetido a uma temperatura muito superior ao limite de sua classe de isolamento, no caso, 155°C . Portanto, é necessário alterar o ciclo de operação, permitindo um maior tempo entre cada ciclo.

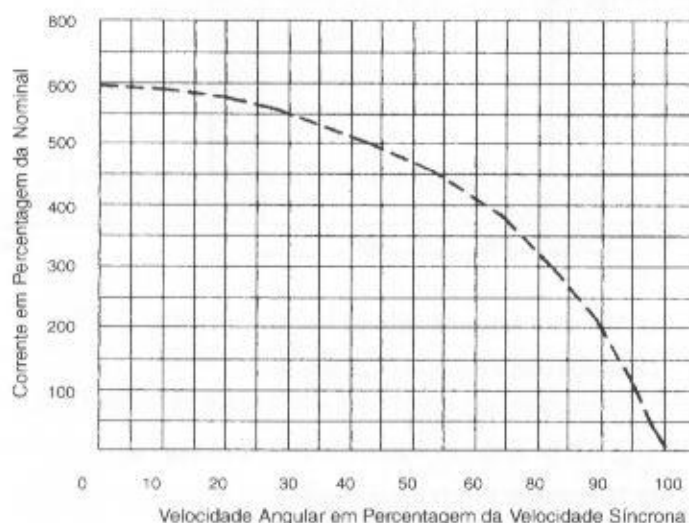


FIGURA 7.11
Curva corrente \times velocidade angular de um motor

7.5 TEMPO DE ROTOR BLOQUEADO

É aquele durante o qual o motor pode permanecer com o rotor travado, absorvendo, neste período, a sua corrente nominal de partida sem afetar a sua vida útil.

O fabricante normalmente informa na *folha de dados* do motor o tempo de rotor bloqueado a partir da temperatura de operação, bem como a sua corrente de rotor bloqueado. Estes valores assumem uma importância fundamental na montagem do esquema de proteção dos motores.

O tempo de rotor bloqueado é calculado em função do gráfico *corrente \times velocidade angular* fornecido pelo fabricante. Tomando-se os valores médios destas correntes para os intervalos de tempo de aceleração determinados, obtém-se a curva média *corrente \times tempo de aceleração*. No ponto de inflexão dessa curva marca-se o tempo de aceleração que corresponde ao tempo de rotor bloqueado.

A curva *corrente \times velocidade angular* é uma característica própria do motor. Já a curva *corrente \times tempo de aceleração* é função da carga e do sistema utilizado para o acionamento do motor.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (7.8)

Tomando como base o Exemplo de Aplicação (7.5), determinar o tempo de rotor bloqueado do motor em questão.

Traça-se inicialmente a curva de conjugado aceleração \times velocidade. Com base no gráfico da corrente \times velocidade angular, dado na Figura 7.9 e na Tabela 7.3, dos tempos de aceleração, determina-se a curva média corrente \times tempo de aceleração vista na Figura 7.12. O ponto T_{rb} mede o tempo de rotor bloqueado, que, no caso, é de 11,48 s, no ponto em que a curva mostra o seu ponto de inflexão.

Para exemplificar a determinação de um ponto no gráfico da Figura 7.12, considerar que o tempo de 1,48 s corresponde à velocidade de 10% da velocidade angular síncrona do gráfico da Figura 7.9. Com esse valor, obtém-se a corrente de partida que vale 5,7 vezes a corrente nominal.

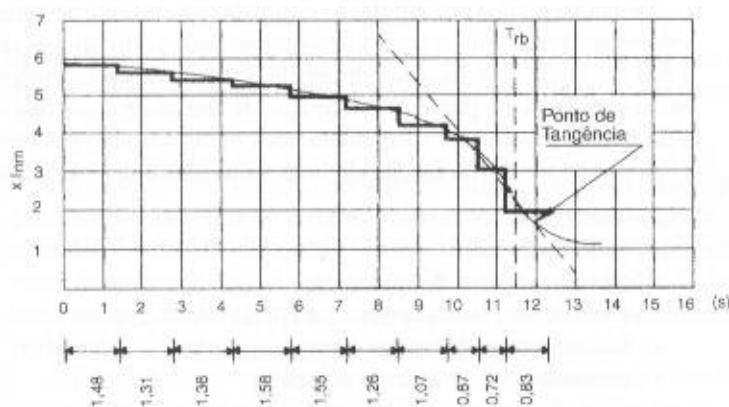


FIGURA 7.12
Curva média corrente \times tempo
de aceleração

7.6 SISTEMA DE PARTIDA DE MOTORES

A adoção de um sistema de partida eficiente pode ser considerada uma das regras básicas para se obter do motor uma vida útil prolongada, custos operacionais reduzidos, além de dar à equipe de manutenção da indústria tranquilidade no desempenho das tarefas diárias.

Os critérios para a seleção do método de partida adequado envolvem considerações quanto à capacidade da instalação, requisitos da carga a ser considerada, além da capacidade do sistema gerador.

Os principais tipos de partida e suas características particulares serão objeto de estudo detalhado nas seções seguintes.

7.6.1 Partida Direta

É o método de partida mais simples em que não são empregados dispositivos especiais de acionamento do motor. Apenas são utilizados contadores, disjuntores ou chaves interruptoras.

Os motores somente podem partir diretamente da rede se forem satisfeitas as seguintes condições:

- a corrente nominal da rede é tão elevada que a corrente de partida do motor não é relevante;
- a corrente de partida do motor é de baixo valor porque a sua potência é pequena;
- a partida do motor é feita sem carga, o que reduz a duração da corrente de partida e, conseqüentemente, atenua os efeitos sobre o sistema de alimentação.

Os fatores que impedem a partida direta dos motores são:

- a potência do motor é superior ao máximo permitido pela concessionária local, normalmente estabelecida em 5 cv, quando a unidade de consumo é alimentada em baixa tensão pela rede da concessionária;
- a carga a ser movimentada necessita acionamento lento e progressivo.

7.6.2 Partida Através da Chave Estrela-triângulo

Em instalações elétricas industriais, principalmente aquelas sobrecarregadas, podem ser usadas as chaves estrela-triângulo como forma de suavizar os efeitos de partida dos motores elétricos.

Como já observado, só é possível o acionamento de um motor elétrico através de chaves estrela-triângulo se este possuir seis terminais acessíveis e dispor de dupla tensão nominal, tal como 220/380 V ou 380/660 V.

O procedimento para o acionamento do motor é feito, inicialmente, ligando-o na configuração estrela até que este alcance uma velocidade próxima da velocidade de regime, quando, então, esta conexão é desfeita e executada a ligação em triângulo. A troca da ligação durante a partida é acompanhada por uma elevação de corrente, fazendo com que as vantagens de sua redução desapareçam se a comutação for antecipada em relação ao ponto ideal. A Figura 7.13 representa esquematicamente uma chave estrela-triângulo conectada aos terminais de um motor.

Durante a partida em estrela, o conjugado e a corrente de partida ficam reduzidos a 1/3 de seus valores nominais. Neste caso, um motor só pode partir através de chave estrela-triângulo quando o seu conjugado, na ligação em estrela, for superior ao conjugado da carga do eixo. Devido ao baixo conjugado de partida e relativamente constante a que fica submetido o motor, as chaves estrela-triângulo são mais adequadamente empregadas em motores cuja partida se dá em vazio.

A seguir, são apresentadas algumas vantagens e desvantagens das chaves estrela-triângulo:

a) Vantagens

- custo reduzido;
- elevado número de manobras;
- corrente de partida reduzida a 1/3 da nominal;
- baixas quedas de tensão durante a partida;
- dimensões relativamente reduzidas.

b) Desvantagens

- aplicação específica a motores com dupla tensão nominal e que disponham de pelo menos seis terminais acessíveis;

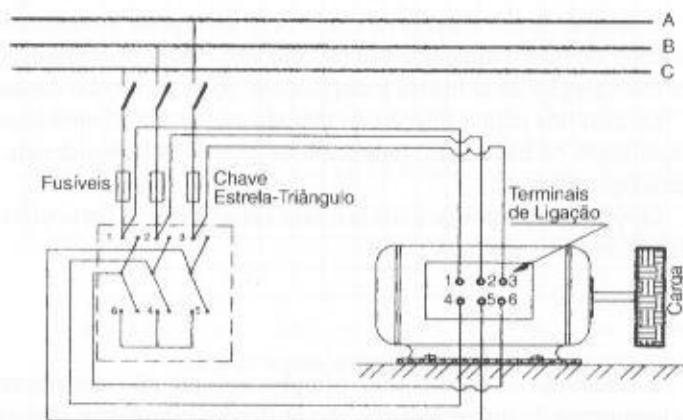


FIGURA 7.13
Esquema de ligação tripolar de
chave estrela-triângulo

- conjugado de partida reduzido a 1/3 do nominal;
- a tensão da rede deve coincidir com a tensão em triângulo do motor;
- o motor deve alcançar, pelo menos, 90% de sua velocidade de regime para que, durante a comutação, a corrente de pico não atinja valores elevados, próximos, portanto, da corrente de partida com acionamento direto.

A Figura 7.14 caracteriza o diagrama que relaciona a corrente de partida pela corrente nominal quando o motor está submetido a um conjugado resistente M_r . Conectando-se o motor em estrela, este acelera a carga até a velocidade aproximada de 85% de sua rotação nominal, quando, neste ponto, a chave é levada à posição triângulo. Assim, a corrente, que era de praticamente 170% da nominal, alcança o valor de 380% da corrente nominal, não apresentando, portanto, redução significativa, já que na partida em estrela o seu valor atingiu 270% da corrente nominal. A Figura 7.15 mostra o comportamento do conjugado do motor em percentagem do nominal relativamente à sua velocidade de acionamento.

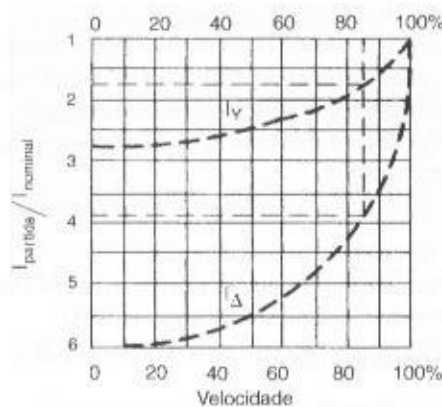


FIGURA 7.14
Curvas corrente \times velocidade

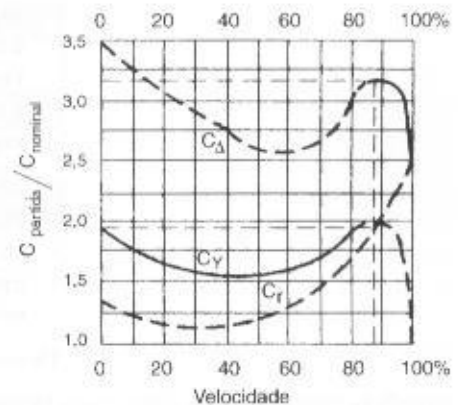


FIGURA 7.15
Curvas conjugado \times velocidade

Observando-se a Figura 7.15, característica do mesmo motor, partindo na conexão em estrela e acelerando agora até 95% da velocidade nominal, obtém-se uma corrente de partida de 130% da nominal. Quando neste ponto a chave é comutada para a ligação em triângulo, a corrente atinge o valor de apenas 290% da nominal, melhorando as condições do acionamento. Se o acionamento fosse direto da rede, a corrente atingiria o valor de 600% da nominal. A Figura 7.17 mostra o comportamento do conjugado motor nas mesmas circunstâncias.

A Tabela 6.2 orienta a ligação de motores trifásicos, relacionando as tensões nominais de placa com a correspondente tensão nominal da rede de alimentação, indicando a possibilidade de acionamento dos mesmos através de chave estrela-triângulo.

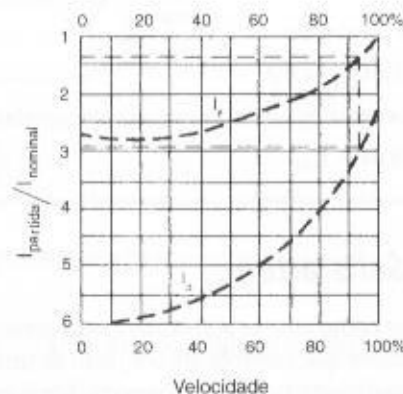


FIGURA 7.16
Curvas corrente \times velocidade

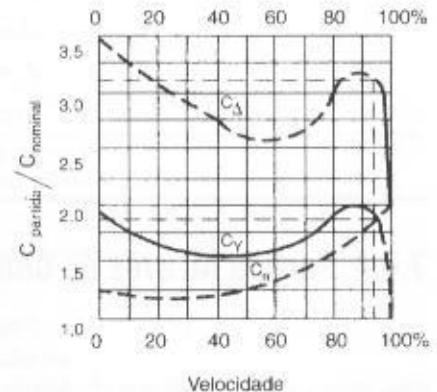


FIGURA 7.17
Curvas conjugado \times velocidade

7.6.3 Partida Através de Chave Compensadora

A chave compensadora é composta, basicamente, de um autotransformador com várias derivações, destinadas a regular o processo de partida. Este autotransformador é ligado ao circuito do estator. O ponto estrela do autotransformador fica acessível e, durante a partida, é curto-circuitado e esta ligação se desfaz logo que o motor é conectado diretamente à rede. Normalmente, este tipo de partida é empregado em motores de potência elevada, acionando cargas com alto índice de atrito, tais como britadores, máquinas acionadas por correias transportadoras, calandras e semelhantes. A Figura 7.18 representa esquematicamente uma chave compensadora construída a partir de três autotransformadores monofásicos.

As derivações, normalmente encontradas nos autotransformadores de chaves compensadoras são de 65% e 80%. Relativamente às chaves estrela-triângulo, podem-se enumerar algumas vantagens e desvantagens da chave compensadora.

- a) Vantagens:
 - na derivação 65%, a corrente de partida na linha se aproxima do valor da corrente de acionamento, utilizando chave estrela-triângulo;
 - a comutação da derivação de tensão reduzida para a tensão de suprimento não acarreta elevação da corrente, já que o autotransformador se comporta, neste instante, semelhantemente a uma reatância que impede o crescimento da mesma;
 - variações gradativas de tape para que se possa aplicar a chave adequadamente à capacidade do sistema de suprimento.
- b) Desvantagens:
 - custo superior ao da chave estrela-triângulo;
 - dimensões normalmente superiores às chaves estrela-triângulo, acarretando o aumento no volume dos Centros de Controle de Motores (CCM).

Deve-se alertar para o fato de que:

$V_l \times I_l = V_s \times I_s$
 V_l – tensão de linha ou de alimentação do autotransformador;
 I_l – corrente de linha;
 V_s – tensão de saída do autotransformador equivalente ao tape de ligação;
 I_s – corrente de saída do autotransformador.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (7.9)

Determinar a tensão nos terminais de um motor de 50 cv (68,8 A/380 V) durante a sua partida quando a chave compensadora está ajustada ao tape de 80%.

$V_s = 0,80 \times 380 = 304 \text{ V}$

Nessas condições, a corrente nos terminais do motor também se reduzirá ao valor de 80% da corrente nominal, ou seja:

$I_s = 0,80 \times 68,8 = 55,04 \text{ A}$

A corrente de linha assume o valor de:

$I_l = 0,80 \times I_s = 0,80 \times 55,04 = 44,0 \text{ A}$

O conjugado de partida fica reduzido relativamente ao valor nominal de:

$C_p = 0,8 \times 0,80 \times C_{np} = 0,64 \times C_{np}$

7.6.4 Partida Através de Chaves Estáticas (*Softstarter*)

Popularmente conhecidas como chaves *softstarters*, são constituídas de um circuito eletrônico acoplado a um microprocessador que controla um conjunto de tiristores responsáveis pelo ajuste da tensão aplicada aos terminais do motor. Ademais, através de ajustes acessíveis, pode-se controlar o torque do motor e a corrente de partida a valores desejados em função da exigência da carga.

As principais características das chaves de partida estáticas são:

7.6.4.1 Corrente nominal da chave

A determinação correta da corrente nominal da chave estática muitas vezes é prejudicada pela falta de informação das condições operacionais do motor. Assim, o dimensionamento da corrente nominal da chave estática pode ser realizado, de forma prática, aplicando sobre a corrente nominal do motor um fator de sobrecarga, cujo resultado é a corrente que deve ser adotada para a chave estática, de acordo com a Tabela 7.5.

TABELA 7.5

Fator de multiplicação de corrente do motor

Tipo de Máquina	Fator de Multiplicação
Compressores	1
Bomba centrífuga	1
Ventiladores inferiores a 25 cv	1,3
Ventiladores superiores a 25 cv	1,5
Moinhos	2
Transportadores	2
Máquinas centrífugas	2
Misturadores	2

7.6.4.2 Acionamento em rampa de tensão

É a principal função da chave de partida estática quando empregada para substituir as chaves de partida eletromecânicas. Essa função gera na saída uma tensão controlada de valor crescente e contínuo, a partir do valor ajustado, conforme pode ser observado na Figura 7.19.

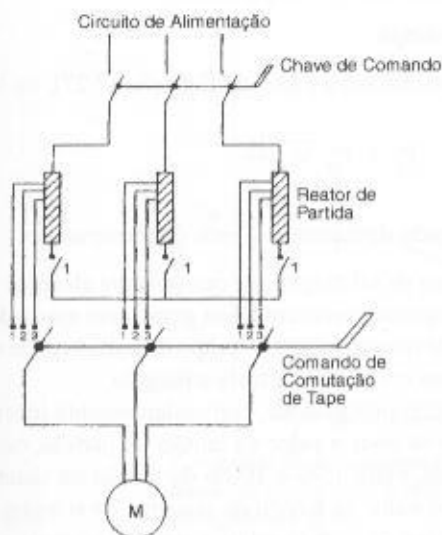


FIGURA 7.18
Ligação da chave compensadora

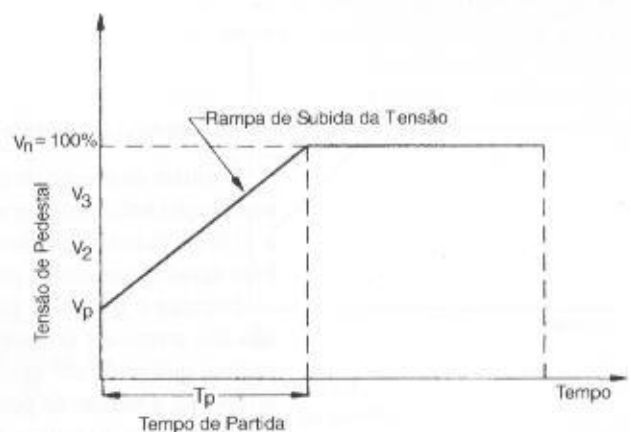


FIGURA 7.19
Elevação da tensão aplicada

a) Ajuste do valor da tensão em rampa

As chaves de partida estáticas podem ser ajustadas no módulo de tensão, de forma a se ter uma tensão inicial de partida responsável pelo conjugado inicial que irá acionar a carga. Ao se ajustar a tensão de partida num valor V_p e um tempo de partida ou tempo de rampa T_p , a tensão cresce do

valor V_p até atingir a tensão de linha do sistema no intervalo de tempo T_p , conforme está mostrado na Figura 7.19. Ajustado o tempo de rampa T_p na chave estática, o seu valor poderá não ocorrer no final da partida em função das condições operacionais do motor, tais como momento de inércia da carga, curva conjugado \times velocidade do motor e da carga etc.

O valor do ajuste da tensão de rampa pode ser determinado aproximadamente pela Equação (7.27), ou seja:

$$V_p = V_{nm} \times \sqrt{\frac{C_i + 0,15 \times C_{nm}}{C_p}} \quad (7.27)$$

V_{nm} – tensão nominal do motor;

C_{nm} – conjugado nominal do motor;

C_i – conjugado nominal da carga no momento da partida;

C_p – conjugado nominal do motor no momento da partida.

O valor do ajuste da tensão de partida V_p é função do tipo de carga que se deseja acionar, conforme se pode explicar através dos seguintes exemplos:

- Bombas

Neste caso, a tensão de partida não deve receber um ajuste elevado, a fim de evitar o fenômeno conhecido como golpe de aríete que se traduz pela onda de pressão da coluna de líquido durante os processos de partida e parada. Por outro lado, a tensão não pode receber um ajuste muito baixo sob pena de não se realizar o processo de partida. Durante a aceleração do motor, o conjugado do motor deve ser, no mínimo, superior a 15% do conjugado resistente, neste caso, o conjugado da bomba. As bombas são cargas beneficiadas pelas características da função da tensão de partida.

- Ventiladores

Assim como as bombas, o valor de ajuste da tensão de partida V_p deve ser baixo mas suficiente para permitir um torque motor adequado à carga. O ajuste do tempo de partida T_p não deve ser muito curto. Em geral, usa-se a limitação da corrente de partida para estender o tempo de partida T_p enquanto a inércia do sistema é superada. O conjugado de partida do motor deve estar, no mínimo, 15% acima do conjugado do ventilador.

- a) Ajuste do tempo de partida em rampa

O tempo de partida T_p pode ser determinado a partir da Equação (7.27), ou seja:

$$T_p = T_{pd} \times \frac{V_{nm}}{V_p} \quad (7.28)$$

T_{pd} – tempo de partida do motor ligado diretamente à rede de alimentação.

O ajuste da tensão de partida deve ser de tal magnitude que permita alcançar um conjugado de aceleração suficiente para vencer o conjugado resistente. Em geral, esse ajuste deve corresponder a 75% do pulso de tensão de partida. De forma prática, o tempo de partida pode ser admitido também igual ao tempo de partida do motor com chave estrela-triângulo.

Durante o tempo de partida T_p , o microprocessador, convenientemente instruído, eleva a tensão nos terminais do motor, iniciando-se com o valor da tensão de partida, ou tensão inicial de rampa, que pode ser ajustada, em geral, entre 15% e 100% da tensão do sistema e, ao cabo do tempo T_p , a tensão de partida assume o valor da tensão do sistema. Se o motor atingir a rotação nominal antes do tempo T_p , então a chave de partida estática transfere a tensão plena do sistema aos terminais do motor.

A Figura 7.19 mostra a curva de corrente resultante durante o processo de aceleração do motor em partida direta e com chave estática. A curva de característica de corrente \times tempo está definida na Figura 7.20.

Considerando-se que o conjugado motor varia de forma quadrática com a tensão e a corrente cresce de forma linear, pode-se limitar o conjugado de partida do motor, bem como a sua corrente de partida, mediante o controle da tensão eficaz que é aplicada aos terminais do motor.

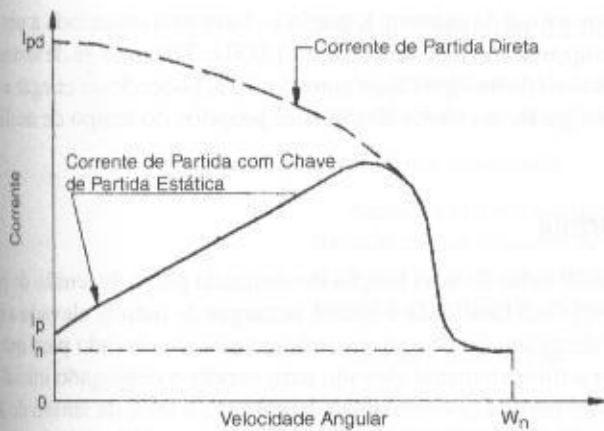


FIGURA 7.20
Redução da corrente de partida

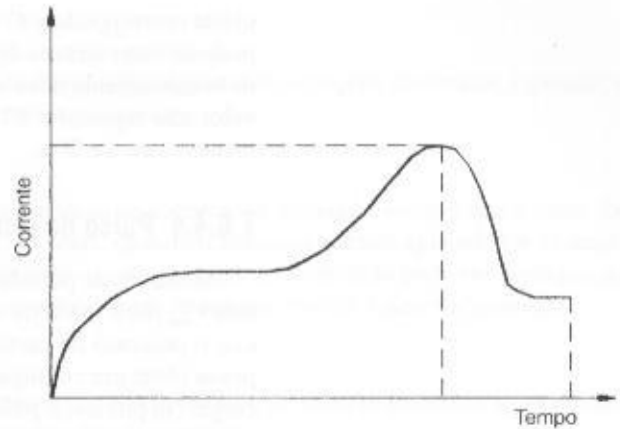


FIGURA 7.21
Característica corrente \times tempo

7.6.4.3 Desaceleração em rampa de tensão

Muitas cargas necessitam de uma desaceleração suave. Assim, no caso de uma esteira transportadora de garrafas, é fundamental que se faça uma parada lenta, a fim de evitar que as garrafas tombem, quebrando-se ou derramando o líquido. Outro caso típico são as bombas centrífugas que, quando desligadas, podem produzir o denominado golpe de arfete que consiste numa brusca parada da coluna d'água, podendo provocar a ruptura da tubulação ou danos à própria bomba. Na indústria têxtil, pode-se citar o exemplo de paradas bruscas nos filatórios ou teares que acarretam a quebra dos fios, prejudicando a qualidade do tecido.

As chaves estáticas permitem que se desacelere o motor de duas diferentes formas. A primeira forma consiste em tornar repentinamente nula a tensão nos terminais de saída da chave, fazendo o motor parar por inércia das massas acopladas ao eixo. No segundo caso, a chave estática controla o tempo de desaceleração do motor, decrescendo a tensão de seu valor nominal até um valor mínimo de tensão, conforme Figura 7.22.

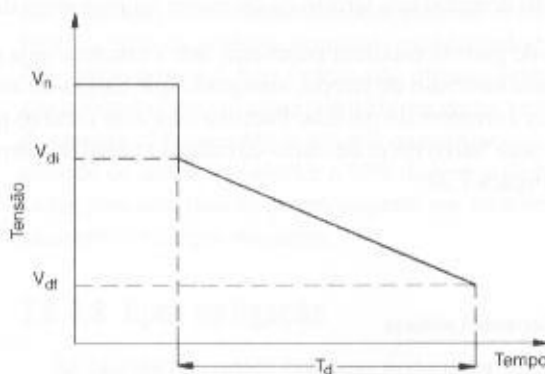


FIGURA 7.22
Desaceleração do motor

T_d – tempo de desligamento; V_n – tensão nominal; V_{di} – tensão de desligamento inicial; V_{df} – tensão de desligamento final.

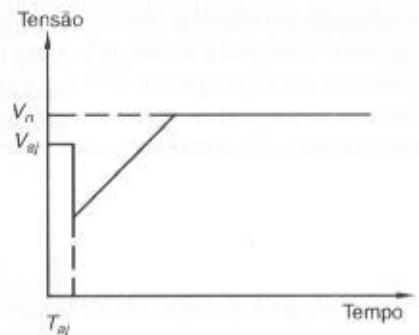


FIGURA 7.23
Pulso de tensão

A função de desaceleração em rampa V_{df} é normalmente ajustada no valor em que se quer que o motor inicie a sua desaceleração. A tensão V_{di} vai reduzindo o seu valor na forma de uma rampa declinante até o valor da tensão de desligamento final V_{df} , quando o motor parar de girar. Neste instante, a tensão é retirada dos terminais do motor.

O tempo de desligamento T_d pode ser ajustado entre 1 e 20 s, sendo que a tensão inicial de desligamento V_{di} é igual, em geral, a 90% da tensão nominal do sistema, enquanto a tensão de desligamento final V_{df} é cerca de 85% da tensão de partida V_p , ou seja, no nível mais baixo de

ajuste corresponde a 47% da tensão nominal do sistema. Quando a chave está conectada a um PC pode-se obter através de *software* tempos de desligamento de até 1.000 s. Tratando-se de sistemas de bombeamento deve-se ajustar o tempo de desligamento entre 5 e 15 s, podendo-se chegar a um valor não superior a 80 s. Porém, em geral, as chaves têm ajustes próprios do tempo de desligamento entre 1 e 20 s.

7.6.4.4 Pulso de tensão de partida

As chaves de partida estáticas são dotadas de uma função denominada pulso de tensão de partida V_{imp} (*kick start*) de valor ajustável. Sua finalidade é ajudar as 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 do motor suficientemente elevado para vencer o conjugado inicial da carga. Na prática, o pulso de tensão de partida deve ser ajustado entre 75 e 90% da tensão do sistema. Já o tempo de pulso de tensão de partida T_{imp} deve estar ajustado entre 100 e 300 ms. Existem 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 onde as bombas, que em muitos casos acumulam lama ou detritos no seu interior, necessitam vencer a sua inércia.

É importante observar que ao se 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 a uma queda de tensão reduzida na partida do motor. A Figura 7.23 mostra o perfil de tensão resultante da habilitação da função de pulso de tensão.

7.6.4.5 Corrente limitada de partida

É a função que limita a corrente que circula na rede a um valor conhecido no instante da partida do motor. É dada pela Equação (7.29).

$$I_{pl} = I_{pm} \times \frac{V_m}{V_{nm}} \quad (7.29)$$

I_{pm} – corrente de partida do motor conectado diretamente na rede;

V_m – tensão nominal nos terminais do motor no momento da partida.

As chaves de partida estáticas permitem que a corrente seja mantida num valor ajustável por um determinado intervalo de tempo, ensejando que cargas de inércia elevada sejam aceleradas à custa de baixas correntes de partida. Pode-se usar este recurso para partida de motores em sistemas elétricos com baixo nível de curto-circuito. O perfil de corrente resultante dessa função está mostrado na Figura 7.24.

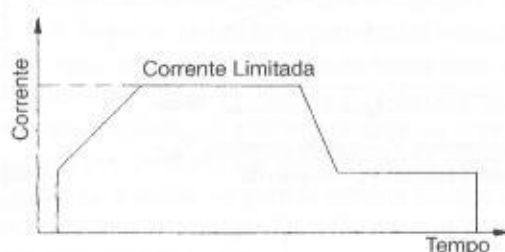


FIGURA 7.24
Limitação da corrente de partida

A função da corrente limitada é desligada quando o motor entra em regime de operação. No entanto, se a partida do motor for bloqueada por insuficiência de conjugado, a proteção da chave estática entra em operação desligando o motor do sistema. O tempo de limitação da corrente deve ser suficiente para que o motor alcance a sua rotação nominal.

7.6.4.6 Proteção do motor

As chaves de partida estáticas são dotadas de um conjunto de proteções destinadas a garantir a integridade do motor e facilidades operacionais, ou seja:

a) Rotor bloqueado

Algumas chaves possuem um relé eletrônico de sobrecarga acionado sempre que o rotor for travado no seu processo de aceleração; ou ainda, quando o tempo de partida ajustado for alcançado o relé interrompe a ligação do motor com o sistema elétrico. A unidade pode ser configurada para dar proteção de sobrecorrente ou de subcorrente de acordo com os valores ajustáveis.

b) Sequência de fase

Esta proteção garante que o motor não opere com o sentido de rotação invertido ao se efetuar por engano uma mudança de fase no sistema de alimentação.

c) Final de rampa ascendente

Esta função ativa um relé com contatos acessíveis quando a tensão nos terminais de saída da chave atinge a tensão do sistema. Tem como finalidade acionar um contator posto em paralelo com a chave de partida estática desligando-a do sistema com o objetivo de eliminar as perdas provocadas por ela.

7.6.4.7 Economia de energia elétrica

Se o motor está operando em carga reduzida, conseqüentemente a baixo fator de potência, a chave de partida estática otimiza o ponto operacional do motor minimizando as perdas de energia reativa, fornecendo apenas a energia ativa requerida pela carga, o que caracteriza um procedimento de economia de energia elétrica.

A função de limitação da corrente de partida é aplicada com vantagens em situações em que o motor permanece funcionando a vazio por um longo período de tempo. Isto é feito mediante a redução da tensão fornecida nos terminais do motor durante o tempo em que o motor desenvolve a sua operação em carga reduzida ou a vazio. Ao se reduzir a tensão reduz-se a corrente a vazio e, conseqüentemente, as perdas no ferro que é proporcional ao quadrado da tensão.

Para se calcular a quantidade de energia economizada é necessário que sejam conhecidos a potência do motor, o número de pares de pólos, a carga, o tempo de operação e as características básicas do motor. Dependendo do caso, pode-se obter uma economia de energia com carregamento inferior a 50% da potência nominal considerando que o motor opere nas mesmas condições, porém sob tensão nominal. Esta função não oferece nenhuma vantagem quando aplicada em situações em que o motor opera em carga reduzida por curtos períodos de tempo. Na prática, a função de otimização de energia só faz sentido se ativada quando a carga for menor que 50% da carga nominal durante um período de operação superior a 50% do tempo de funcionamento do motor. As aplicações mais indicadas para esta função dizem respeito aos motores de serraria, esmeril, esteiras transportadoras de aeroportos e cargas similares.

7.6.4.8 Tipos de ligação

As chaves de partida estáticas podem ser ligadas ao sistema de diferentes formas, ou seja:

a) Ligação normal

Nas aplicações convencionais, a chave é ligada conforme o esquema da Figura 7.25.

b) Ligação com contator em paralelo

Visando à redução de perdas Joule em operação normal recomenda-se utilizar um contator ligado em paralelo, conforme a Figura 7.26.

c) Ligação em partida sequencial de vários motores

Pode-se utilizar uma mesma chave de partida estática para acionar um certo número de motores, conforme Figura 7.27. Se os motores forem de mesma potência e característica de carga, pode-se utilizar o mesmo ajuste. Para potências e características de carga diferentes, devem-se ajustar

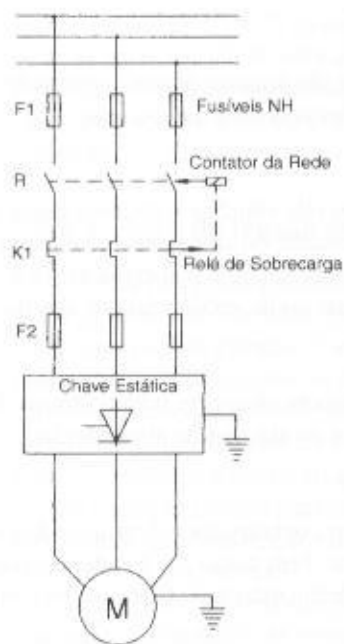


FIGURA 7.25
Ligação normal

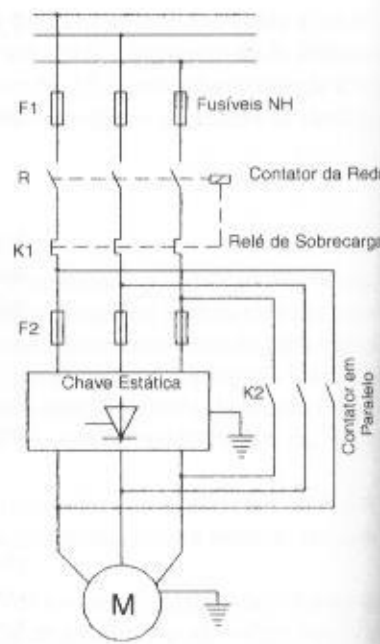


FIGURA 7.26
Ligação com contator

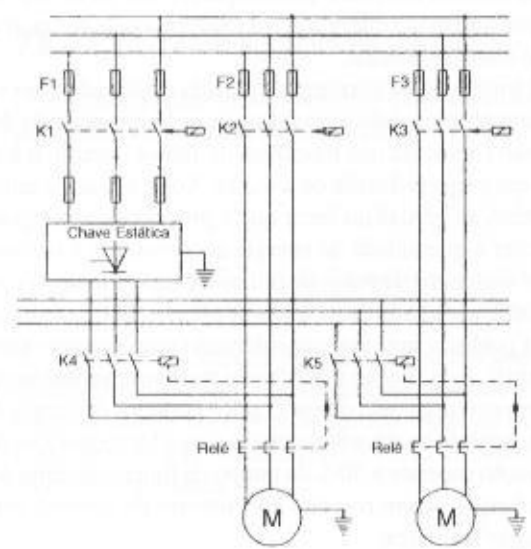


FIGURA 7.27
Ligação sequencial

os parâmetros para cada tipo de motor, o que pode ser feito através do *software* de comunicação entre a chave e um PC.

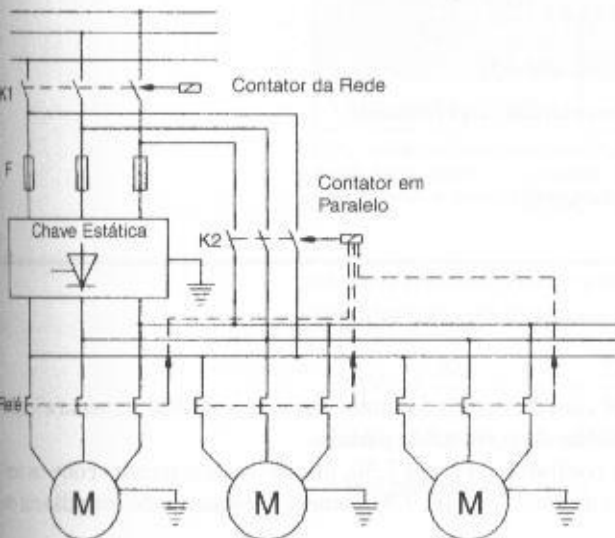
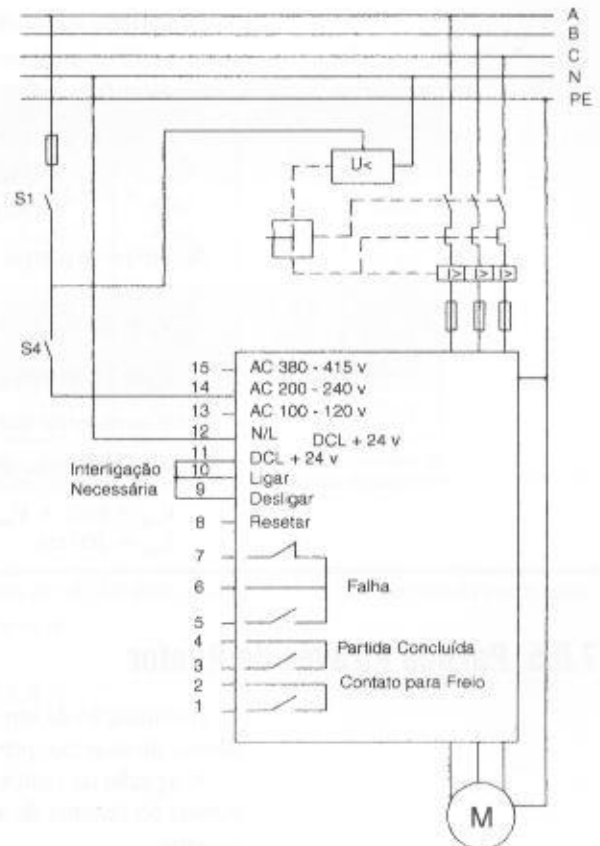
d) Ligação para partida simultânea de vários motores

Neste caso, a capacidade da chave deve ser no mínimo igual à soma das potências de todos os motores. Como ilustração, pode-se observar o esquema básico de ligação da Figura 7.28.

Para complementar a questão da ligação das chaves de partida estática, a Figura 7.29 mostra o esquema de comando remoto e as facilidades que podem ser obtidas com o seu uso.

7.6.4.9 Comunicação de dados

As chaves de partida estáticas mais modernas podem ser conectadas a um PC através de uma interface serial RS 232. Esta característica amplia a potencialidade da chave, já que é possível a sua parametrização à distância e o uso de *softwares* dedicados aos ajustes que se fizerem necessários.

FIGURA 7.28
Ligação simultâneaFIGURA 7.29
Diagrama de comando

7.6.4.10 Fator de potência

Se for conectado um banco de capacitores aos terminais do motor para corrigir o fator de potência, este deve ser desligado durante o processo de partida do motor, a fim de evitar a queima dos componentes semicondutores da chave estática, devido aos transitórios de corrente que podem ocorrer nesse período. O comando de operação do banco de capacitores pode ser realizado através dos contatos auxiliares da chave estática.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (7.10)

Determinar a tensão de partida, o tempo de partida em rampa e a corrente de partida referentes ao motor do Exemplo de Aplicação 7.5.

- Corrente nominal da chave estática
 - Corrente nominal do motor: $I_{mn} = 135,4 \text{ A}$
 - Tipo de máquina acionada: bomba centrífuga $\rightarrow F_m = 1,0$ (Tabela 7.5)
 - Corrente nominal da chave estática: $I_{nch} = 135,4 \times 1 = 135,4 \text{ A} \rightarrow I_{nch} = 158 \text{ A}$ (Tabela 9.19)
- Tensão de partida

$$V_p = V_{mn} \times \sqrt{\frac{C_i + 0,15 \times C_{am}}{C_p}} \rightarrow V_p = 380 \times \sqrt{\frac{16,08 + 0,15 \times 40,2}{28,14}} = 336 \text{ V}$$

$$C_{am} = \frac{716 \times P_{am}}{W_{am}} = \frac{716 \times 100}{1.780} = 40,2 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

$$C_p \times 70\% \times C_{am} = 0,70 \times 40,2 = 28,14 \text{ kgf} \cdot \text{m} \text{ (veja gráfico da Figura 7.9)}$$

$$C_i \times 40\% \times C_{am} = 0,40 \times 40,2 = 16,08 \text{ kgf} \cdot \text{m} \text{ (veja gráfico da Figura 7.9)}$$

c) Corrente inicial de partida

$$I_{pi} = I_{pm} \times \frac{V_m}{V_{nm}}$$

$$I_{pm} = 135,4 \times 6,7 = 907,1 \text{ A}$$

$$I_{pi} = 907,1 \times \frac{336}{380} = 802 \text{ A}$$

d) Tempo de partida

$$T_p = T_{pd} \times \frac{V_{nm}}{V_p} = 12,03 \times \frac{380}{336} = 13,6 \text{ s}$$

$$T_{pd} = 12,03 \text{ s (veja Exemplo de Aplicação 7.5)}$$

Deve-se observar que o motor tem uma elevada carga resistente.

e) Pulso de tensão de partida

$$V_{imp} = 90\% \times V_{nm} = 0,90 \times 380 = 342 \text{ V}$$

$$T_{imp} = 300 \text{ ms}$$

7.6.5 Partida Através de Reator

A utilização de um reator em série com o circuito do motor durante a partida aumenta a impedância do sistema, provocando a redução da corrente de partida.

A ligação do reator pode ser feita conforme a Figura 7.30, inserindo-se o mesmo entre os terminais do sistema de alimentação e o motor. A Figura 7.31 fornece o esquema de impedâncias do sistema.

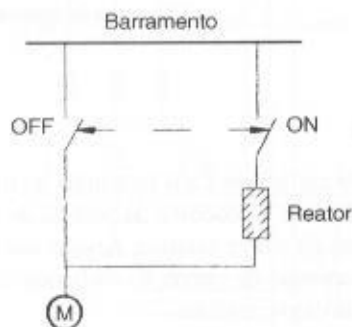


FIGURA 7.30
Partida através de reator

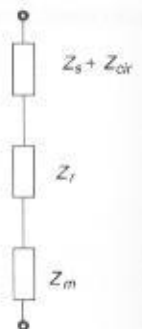


FIGURA 7.31
Diagrama de impedâncias

A Tabela 7.6 fornece as relações de tensão, corrente e conjugado de partida de motores de indução com rotor em curto-circuito, utilizando diferentes métodos de acionamento.

7.7 QUEDA DE TENSÃO NA PARTIDA DOS MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO

A partida de um motor elétrico pode solicitar o sistema de maneira severa, causando perturbações às vezes inadmissíveis. Em alguns casos, porém, é necessário realizar o acionamento simultâneo de dois ou mais motores, o que agrava ainda mais as condições do sistema de suprimento. Nesta seção, portanto, serão estudados separadamente os efeitos ocasionados pelas duas condições de acionamento antes mencionadas.

Os motores elétricos, bem como algumas cargas específicas — por exemplo, os fornos a arco — provocam oscilações prejudiciais à operação de certos equipamentos, principalmente os eletrônicos, além de irritar o observador. Analisando o gráfico da Figura 7.32 e considerando, para exemplificação, uma tensão de 220 V, a queda máxima de tensão permitida na partida do motor

TABELA 7.6

Possibilidade de ligação de motores de indução com chave estrela-triângulo

Tipo de Partida	Tapes (%)	V_m/V_l	C_p/C_{np}	I_l/I_p	I_m/I_p
Direta	—	1,000	1,00	1,00	1,00
Chave compensadora ajustada nos tapes	80	0,800	0,64	0,64	0,80
	65	0,650	0,42	0,42	0,65
	50	0,500	0,25	0,25	0,50
Reator ajustado nos tapes	50	0,500	0,25	0,25	0,50
	45	0,450	0,20	0,20	0,45
	37,5	0,375	0,14	0,14	0,39
Chave estrela-triângulo	—	0,330	0,33	0,33	0,33

V_m/V_l – tensão nos terminais do motor/tensão de linha – C_p/C_{np} – conjugado de partida do motor/conjugado nominal de partida à plena tensão – I_l/I_p = corrente de linha/corrente de partida a plena tensão – I_m/I_p – corrente nos terminais do motor/corrente de partida à plena tensão.

elétrico acionado cinco vezes por hora deve ser de no máximo 15,4 V, a fim de não irritar o consumidor que está ligado no seu circuito, ou seja:

$$\Delta V_2 = \frac{220}{120} \times \Delta V_1 = \frac{220}{120} \times 8,4 = 15,4 \text{ V}$$

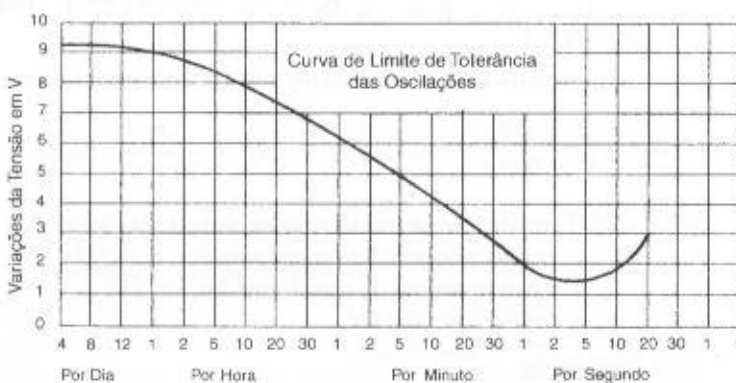
$$\Delta V_1 = 8,4 \text{ V (gráfico da Figura 7.32)}$$

Em percentagem vale:

$$\Delta V_2 = \frac{15,4}{220} \times 100 = 7\%$$

O nível de irritação das pessoas devido às oscilações de tensão é função do nível econômico e social de cada indivíduo.

Há dois pontos importantes em relação aos quais deve-se calcular a queda de tensão durante a partida dos motores. O primeiro é de interesse da concessionária local, que normalmente limita a queda de tensão no ponto de entrega do seu sistema distribuidor. Geralmente, este valor fica limitado de 3% a 5% da tensão nominal primária. O segundo ponto é de interesse do projetista, que deve limitar a queda de tensão nos terminais de ligação dos motores ou em outros pontos considerados sensíveis do sistema. Além disso, deve ser calculado o conjugado de partida do motor e comparado com o valor do conjugado resistente, a fim de se poder assegurar ou não a capacidade de o motor acionar a carga acoplada ao seu eixo.

**FIGURA 7.32**

Oscilações de tensão permitidas
a base de 120 V

7.7.1 Queda de Tensão na Partida de um Único Motor

Este é o caso mais comum de ocorrer na prática. Normalmente, a operação dos grandes motores se faz por unidade, a fim de reduzir o impacto das perturbações sobre o sistema.

A seguir, será explanado o método de determinação dos principais fatores resultantes do acionamento de motores elétricos, os quais permitirão ao projetista elaborar uma análise técnica e econômica para decidir sobre a melhor opção de partida. Devem ser conhecidos, no entanto, os seguintes dados sobre o sistema elétrico, o motor em questão e os valores de base adotados, ou seja:

- potência de curto-circuito ou impedância no ponto de entrega da instalação.

Devido ao pequeno comprimento, em geral, do ramal de entrada, pode-se atribuir o valor do curto-circuito aos terminais primários do transformador. Deve ser expresso em kVA.

- potência nominal do transformador, dada em kVA;
- impedância percentual do transformador: resistência e reatância em percentagem;
- impedância do circuito desde os terminais secundários do transformador até os terminais de ligação do motor;
- potência nominal do motor, em cv;
- fator de potência do motor;
- rendimento do motor;
- indicação do método de partida e, se for o caso, o ajuste pretendido da chave utilizada;
- potência base, em kVA;
- tensão base, em kV.

Com base nos elementos anteriores, segue a metodologia de cálculo em valor *por unidade* (*pu*).

a) Cálculo da impedância reduzida no ponto de entrega de energia

- Resistência (R_{ur})

$$R_{ur} \cong 0 \text{ pu (valor muito inferior à reatância)}$$

- Reatância (X_{ur})

$$X_{ur} = \frac{P_b}{P_{cc}} \text{ (pu)} \quad (7.30)$$

P_b – potência base, em kVA;

P_{cc} – potência de curto-circuito no ponto de entrega, em kVA.

- Impedância (\bar{Z}_{ur})

$$\bar{Z}_{ur} = 0 + jX_{ur} \text{ (pu)} \quad (7.31)$$

b) Cálculo da impedância do transformador

- Resistência

$$R_{ur} = R_{pt} \times \frac{P_b}{P_{nt}} \times \left(\frac{V_{nt}}{V_b} \right)^2 \text{ (pu)} \quad (7.32)$$

R_{pt} – resistência percentual do transformador conforme a Equação (7.32), ou seja:

$$R_{pt} = \frac{P_{cu}}{10 \times P_{nt}} \text{ (\%)} \quad (7.33)$$

R_{ur} – resistência do transformador, em *pu*, nas bases P_b e V_b ;

P_{nt} – potência nominal do transformador, em kVA;

V_{nt} – tensão nominal do transformador, em kV;

V_b – tensão base, em kV.

- Reatância

$$X_{ur} = X_{pt} \times \frac{P_b}{P_{nt}} \times \left(\frac{V_{nt}}{V_b} \right)^2 \text{ (pu)} \quad (7.34)$$

X_{pt} – reatância do transformador, em *pu*, nas bases P_{nt} e V_{nt} ;

X_{ur} – reatância do transformador em *pu*, nas bases P_b e V_b .

- Impedância

$$\bar{Z}_{ut} = R_{ut} + jX_{ut} \text{ (pu)} \quad (7.35)$$

- c) Impedância do sistema compreendido entre os terminais secundários do transformador e o QGF (Z_{uc1})

- Resistência (R_{uc1})

$$R_{c1\Omega} = \frac{R_{u\Omega} \times L_{c1}}{1.000 \times N_{c1}} \text{ (}\Omega\text{)} \quad (7.36)$$

$$R_{uc1} = R_{c1\Omega} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} \text{ (pu)} \quad (7.37)$$

$R_{u\Omega}$ – resistência de sequência positiva do condutor fase, em m Ω /m (Tabela 3.22);

L_{c1} – comprimento do circuito medido entre os terminais do transformador e o ponto de conexão com o barramento, dado em m;

N_{c1} – número de condutores, por fase, do circuito mencionado.

- Reatância (X_{uc1})

A reatância do cabo é:

$$X_{c1\Omega} = \frac{X_{u\Omega} \times L_{c1}}{1.000 \times N_{c1}} \text{ (}\Omega\text{)} \quad (7.38)$$

$$X_{uc1} = X_{c1\Omega} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} \text{ (pu)} \quad (7.39)$$

$X_{u\Omega}$ – reatância de sequência positiva do condutor fase, em m Ω /m (Tabela 3.22).

$$\bar{Z}_{uc1} = R_{uc1} + jX_{uc1} \text{ (pu)} \quad (7.40)$$

- d) Impedância do barramento do QGF (Z_{ub1})

- Resistência (R_{ub1})

$$R_{b1\Omega} = \frac{R_{u\Omega} \times L_{b1}}{1.000 \times N_{bp}} \text{ (}\Omega\text{)} \quad (7.41)$$

$R_{u\Omega}$ – resistência ôhmica da barra, em m Ω /m (Tabela 3.38);

N_{bp} – número de barras em paralelo;

L_{b1} – comprimento da barra, em m.

$$R_{ub1} = R_{b1\Omega} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} \text{ (pu)} \quad (7.42)$$

- Reatância (X_{ub1})

$$X_{b1\Omega} = \frac{X_{u\Omega} \times L_{b1}}{1.000 \times N_{bp}} \text{ (}\Omega\text{)} \quad (7.43)$$

$X_{u\Omega}$ – reatância ôhmica da barra, em m Ω /m (Tabela 3.38).

A reatância, em pu, é dada por:

$$X_{ub1} = X_{b1\Omega} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} \text{ (pu)} \quad (7.44)$$

$$\bar{Z}_{ub1} = R_{ub1} + jX_{ub1} \text{ (pu)} \quad (7.45)$$

- e) Impedância do circuito que conecta o QGF ao CCM1 (Z_{uc2})

Os valores da resistência e reatância, em pu, respectivamente iguais a R_{uc2} , e X_{uc2} , são calculados à semelhança de R_{uc1} e X_{uc1} , segundo a alínea c.

f) Impedância do circuito que conecta o CCM1 aos terminais do motor (Z_{uc3})

Aqui também é válida a observação feita na alínea anterior.

g) Impedância do motor (Z_{umb})

$R_{um} \cong 0$ (valor muito pequeno quando comparado com a sua impedância)

$$X_{um} = \frac{I_{nm}}{I_p} (pu) \text{ (na base da potência nominal do motor)}$$

$$P_{um} = \frac{P_{mcr} \times 0,736}{\eta \times F_p} \text{ (kVA)} \quad (7.46)$$

I_{nm} – corrente nominal do motor, em A;

I_p – corrente de partida do motor, em A;

F_p – fator de potência do motor;

P_{mcr} – potência nominal do motor, em cv.

Logo, é necessário tomar o valor de Z_{umb} nas bases adotadas.

$$\vec{Z}_{umb} = 0 + jX_{umb} (pu) \text{ (nas bases } P_b \text{ e } V_b)$$

h) Corrente de partida

$$\vec{I}_p = \frac{1}{\vec{Z}_{uz} + \vec{Z}_{ut} + \vec{Z}_{uc} + \vec{Z}_{ub} + \vec{Z}_{umb}} (pu) \quad (7.47)$$

Z_{uc} – soma das impedâncias dos condutores, em pu;

Z_{ub} – soma das impedâncias dos barramentos, em pu.

i) Queda de tensão nos terminais do motor

$$\Delta \vec{V}_{um} = \vec{Z}_t \times \vec{I}_p (pu) \quad (7.48)$$

$$\vec{Z}_t = \vec{Z}_{uz} + \vec{Z}_{ut} + \vec{Z}_{uc} + \vec{Z}_{ub} (pu) \quad (7.49)$$

j) Tensão nos terminais da chave de partida do motor

$$\vec{V}_{um} = 1 - \Delta \vec{V}_{um} (pu) \quad (7.50)$$

• Partida através de chave compensadora

$$\Delta \vec{V}_{um} = \vec{Z}_t \times \vec{I}_{pc} (pu) \quad (7.51)$$

$$\vec{I}_{pc} = K^2 \times \vec{I}_p (pu) \quad (7.52)$$

K – valor do tape de ligação da chave;

I_{pc} – corrente de partida compensada.

• Partida através de estrela-triângulo

$$\Delta \vec{V}_{um} = \vec{Z}_t \times \vec{I}_{pc} (pu) \quad (7.53)$$

$$\vec{I}_{pc} = 0,33 \times \vec{I}_p (pu) \quad (7.54)$$

Observar que, ao se conectar a chave na posição estrela, a corrente que circula no bobinado é $\sqrt{3}$ inferior à corrente nominal do motor (ligação triângulo), enquanto a tensão a que fica submetido cada enrolamento é $\sqrt{3}$ inferior à tensão nominal do referido enrolamento. Considerando-se Z a impedância de fase de um enrolamento, pode-se estabelecer a seguinte relação:

$$\frac{I_y}{I_\Delta} = \frac{\frac{V_l}{\sqrt{3} \times Z}}{\frac{V_l}{Z \times \sqrt{3}}} = \frac{1}{3} = 0,33$$

V_l – tensão entre fases do sistema.

k) Queda de tensão nos terminais primários do transformador

$$\Delta \vec{V}_{ut} = \vec{Z}_{ut} \times \vec{I}_{pc} \text{ (pu)} \quad (7.55)$$

l) Conjugado de partida

$$C_{up} = C_{anp} \times \left(\frac{1 - \Delta V_{um}}{1} \right)^2 \quad (7.56)$$

C_{anp} – conjugado nominal de partida do motor, em pu.

Analisando-se as expressões anteriores, podem ser comentados alguns pontos importantes para o melhor entendimento do assunto:

- quanto mais elevados e freqüentes forem os valores de $\Delta \vec{V}_{um}$, mais acentuados serão os efeitos de cintilação da iluminação incandescente e perturbações em aparelhos e equipamentos;
- quanto maior a capacidade de curto-circuito do sistema de suprimento, tanto menor será Z_{ut} ; conseqüentemente, mais reduzida será a queda de tensão no ponto de entrega de energia. Assim, a capacidade de partida de um determinado motor de potência elevada é função, entre outros elementos, da capacidade do sistema da concessionária de energia elétrica local;
- quanto menor for a impedância resultante dos transformadores da subestação, menor será a queda de tensão no sistema secundário de distribuição de força e luz.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (7.11)

Considere a indústria representada na Figura 7.33. Sabe-se que:

- tensão primária de fornecimento: $V_p = 13,80 \text{ kV}$;
- tensão secundária de distribuição: $V_s = 380 \text{ V}$;
- tensão nominal primária: $V_{np} = 13,80 \text{ kV}$;
- potência nominal do transformador: $P_{nt} = 1.000 \text{ kVA}$;
- impedância do transformador: $Z_{pt} = 5,5\%$ (Tabela 9.11);
- potência de curto-circuito no ponto P: $P_{cc} = 200 \text{ MVA}$.

Deseja-se calcular para o motor de $P_{nm} = 300 \text{ cv}$:

- as quedas de tensão percentuais, durante partida direta e compensada a 65% da tensão nominal;
- as tensões nos terminais do motor, durante partida direta e compensada a 65% da tensão nominal;
- as tensões nos terminais de alimentação do transformador, nas condições de partida à tensão plena e compensada a 65% da tensão nominal;
- os conjugados de partida, durante o acionamento direto e compensado a 65% da tensão nominal.
- A queda de tensão no ponto de entrega de energia, cujo valor deve ser igual ou inferior a 3%.

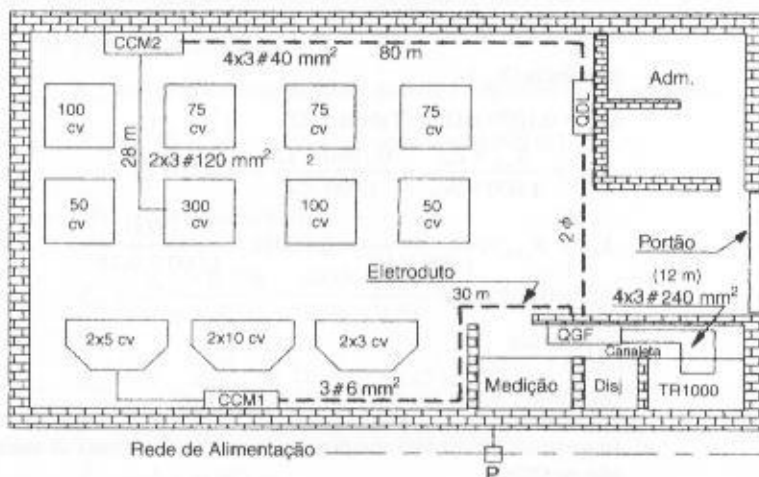


FIGURA 7.33
Instalação industrial

Desenvolver uma análise semelhante com a aplicação da chave estrela-triângulo.

a) Escolha dos valores de base

- potência base $P_b = 1.000 \text{ kVA}$;
- tensão base $V_b = 0,38 \text{ kV}$.

b) Impedância reduzida do sistema no ponto de entrega de energia

- Resistência

$$R_w \cong 0 \text{ pu}$$

- Reatância

$$X_w = \frac{P_b}{P_{cc}} = \frac{1.000}{200.000} = 0,005 \text{ pu}$$

$$\vec{Z}_{av} = R_w + jX_w = 0 + j0,005 \text{ pu}$$

c) Impedância do transformador

- Resistência

$$R_{pt} = \frac{P_{cu}}{10 \times P_{at}} = \frac{11.000}{10 \times 1.000} = 1,1\% = 0,0110 \text{ pu (na base da potência nominal do transformador)}$$

$$P_{cu} = 11.000 \text{ W (Tabela 9.11)}$$

$$R_w = R_{pt} \times \left(\frac{P_b}{P_{at}} \right) \times \left(\frac{V_w}{V_b} \right)^2 = 0,0110 \times \frac{1.000}{1.000} \times \left(\frac{0,38}{0,38} \right)^2$$

$$R_w = 0,0110 \text{ pu (nas bases da potência e tensão bases)}$$

- Reatância

$$X_{pt} = \sqrt{Z_{pt}^2 - R_{pt}^2} = \sqrt{5,5^2 - 1,1^2} = 5,38\% = 0,0538 \text{ pu (na base da potência nominal do transformador)}$$

$$X_w = X_{pt} \times \left(\frac{P_b}{P_{at}} \right) \times \left(\frac{V_w}{V_b} \right)^2 = 0,0538 \times \frac{1.000}{1.000} \times \left(\frac{0,38}{0,38} \right)^2$$

$$X_w = 0,0538 \text{ pu (nas bases da potência e tensão bases)}$$

- Impedância

$$\vec{Z}_w = R_w + jX_w = 0,0110 + j0,0538 \text{ pu}$$

d) Impedância do sistema entre os terminais secundários do transformador e o do QGF

- Resistência (R_{wcl})

$$R_{sl\Omega} = 0,0958 \text{ m}\Omega/\text{m (Tabela 3.22)}$$

$$R_{cl\Omega} = \frac{R_{sl\Omega} \times L_{cl}}{1.000 \times N_{cl}} = \frac{0,0958 \times 12}{1.000 \times 4} = 0,000287 \Omega$$

$$R_{wcl} = R_{cl\Omega} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} = 0,000287 \times \frac{1.000}{1.000 \times 0,38^2}$$

$$R_{wcl} = 0,00198 \text{ pu}$$

- Reatância (X_{wcl})

$$X_{sl\Omega} = 0,1070 \text{ m}\Omega/\text{m (Tabela 3.22)}$$

$$X_{cl\Omega} = \frac{X_{sl\Omega} \times L_{cl}}{1.000 \times N_{cl}} = \frac{0,1070 \times 12}{1.000 \times 4} = 0,00032 \Omega$$

$$X_{wcl} = X_{cl\Omega} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} = 0,00032 \times \frac{1.000}{1.000 \times 0,38^2}$$

$$X_{wcl} = 0,00221 \text{ pu}$$

- Impedância

$$\vec{Z}_{wcl} = R_{wcl} + jX_{wcl} = 0,00198 + j0,00221 \text{ pu}$$

e) Impedância do circuito compreendido entre os terminais de saída do QGF e os terminais de alimentação do CCM2

- Resistência (R_{w2})

$$R_{c2\Omega} = \frac{R_{a\Omega} \times L_{c2}}{1.000 \times N_{c2}} = \frac{0,0958 \times 80}{1.000 \times 4} = 0,00191 \, \Omega$$

$$R_{w2} = R_{c2\Omega} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} = 0,00191 \times \frac{1.000}{1.000 \times 0,38^2}$$

$$R_{w2} = 0,01322 \, pu$$

- Reatância (X_{w2})

$$X_{c2\Omega} = \frac{X_{a\Omega} \times L_{c2}}{1.000 \times N_{c2}} = \frac{0,1070 \times 80}{1.000 \times 4} = 0,00214 \, \Omega$$

$$X_{w2} = X_{c2\Omega} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} = 0,00214 \times \frac{1.000}{1.000 \times 0,38^2}$$

$$X_{w2} = 0,01482 \, pu$$

- Impedância

$$\bar{Z}_{w2} = R_{w2} + jX_{w2} = 0,01322 + j0,01482 \, pu$$

- f) Circuito de alimentação do motor

- Resistência (R_{w3})

$$R_{c3\Omega} = \frac{R_{a\Omega} \times L_{c3}}{1.000 \times N_{c3}} = \frac{0,1868 \times 28}{1.000 \times 2} = 0,00261 \, \Omega$$

$$R_{w3} = R_{c3\Omega} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} = 0,00261 \times \frac{1.000}{1.000 \times 0,38^2}$$

$$R_{w3} = 0,01807 \, pu$$

- Reatância (X_{w3})

$$X_{c3\Omega} = \frac{X_{a\Omega} \times L_{c3}}{1.000 \times N_{c3}} = \frac{0,1076 \times 28}{1.000 \times 2} = 0,00150 \, \Omega$$

$$X_{w3} = X_{c3\Omega} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2} = 0,00150 \times \frac{1.000}{1.000 \times 0,38^2}$$

$$X_{w3} = 0,01038 \, pu$$

- Impedância

$$\bar{Z}_{w3} = R_{w3} + jX_{w3} = 0,01807 + j0,01038 \, pu$$

- g) Impedância do sistema até os terminais do motor

$$\bar{Z}_t = \bar{Z}_{ex} + \bar{Z}_w + \bar{Z}_{w1} + \bar{Z}_{w2} + \bar{Z}_{w3}$$

$$\bar{Z}_t = j0,005 + 0,0110 + j0,0538 + 0,00198 + j0,00221 + 0,01322 + j0,01482 + 0,01807 + j0,01038 \, pu$$

$$\bar{Z}_t = 0,04427 + j0,08621 \, pu \rightarrow \bar{Z}_t = 0,09691 \, pu$$

- h) Impedância do motor

$R_{am} \cong 0$ (valor muito pequeno quando comparado com a reatância)

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

$$\frac{I_{nm}}{I_p} = 6,8 \text{ (Tabela 6.3)}$$

$$P_{sm} = \frac{P_{mv} \times 0,736}{\eta \times F_r} = \frac{300 \times 0,736}{0,96 \times 0,88} = 261,3 \, kVA$$

$$X_{sm} = X_{pm} \times \frac{P_b}{P_{sm}} \times \left(\frac{V_{sm}}{V_b} \right)^2 = 0,147 \times \frac{1.000}{261,3} \times \left(\frac{0,38}{0,38} \right)^2$$

$$X_{sm} = 0,562 \, pu \text{ (na potência e tensão de base)}$$

$$\bar{Z}_{sm} = 0 + j0,562 \, pu$$

i) Corrente de partida

$$\bar{I}_p = \frac{1}{\bar{Z}_{ur} + \bar{Z}_{ut} + \bar{Z}_{ac} + \bar{Z}_{ab} + \bar{Z}_{unb}} = \frac{1}{\bar{Z}_{un}}$$

$$\bar{Z}_{un} = 0,04427 + j0,08621 + j0,562 = 0,04427 + j0,64821$$

$$\bar{Z}_{un} = 0,649 \text{ pu}$$

$$I_p = \frac{1}{0,649} = 1,5408 \text{ pu}$$

j) Queda de tensão nos terminais do motor na partida direta

$$\Delta V_{un} = Z_t \times I_p = 0,09691 \times 1,5408 = 0,1493 \text{ pu} = 14,9\%$$

k) Tensão nos terminais do motor na partida direta do motor

$$V_{un} = 1 - \Delta V_{un} = 1 - 0,1493 = 0,8507 \text{ pu} = 85,07\% \text{ da tensão nominal do motor, ou seja: } 380 \times 0,8507 = 323,2 \text{ V}$$

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

$$\Delta V_{un} = Z_t \times I_{pc} = 0,09691 \times 0,650 = 0,0629 \text{ pu} = 6,29\%$$

$$\bar{I}_{pc} = K^2 \times \bar{I}_p = 0,65^2 \times 1,540 = 0,650 \text{ pu}$$

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

m) Tensão nos terminais de alimentação da chave compensadora no tape 65%

$$V_{un} = 1 - \Delta V_{un} = 1 - 0,0629 = 0,937 \text{ pu} = 93,7\% \text{ da tensão nominal, ou seja: } 380 \times 0,937 = 356 \text{ V}$$

n) Queda de tensão na partida através de chave estrela-triângulo

$$\Delta V_{un} = Z_t \times I_{pc} = 0,09691 \times 0,5084 = 0,0492 \text{ pu} = 4,92\%$$

$$\bar{I}_{pc} = 0,33 \times \bar{I}_p = 0,33 \times 1,5408 = 0,5084 \text{ pu}$$

o) Queda de tensão no ponto de entrega de energia

$$\Delta V_{ut} = Z_{ur} \times I_p = 0,005 \times 1,5408 = 0,0077 \text{ pu} = 0,77\%$$

p) Conjugado de partida

- Partida direta da rede

$$C_{up} = C_{unp} \times \left(\frac{1 - \Delta V_{un}}{1} \right)^2 = C_{unp} \times \left(\frac{1 - 0,1493}{1} \right)^2 = 0,723 \times C_{unp}$$

- Partida através da chave compensadora

$$C_{up} = C_{unp} \times \left(\frac{K - \Delta V_{un}}{1} \right)^2 = C_{unp} \times \left(\frac{0,65 - 0,0629}{1} \right)^2 = 0,344 \times C_{unp}$$

- Partida através da chave estrela-triângulo

$$C_{up} = C_{unp} \times \left(\frac{1 - \Delta V_{un}}{\sqrt{3}} \right)^2 = C_{unp} \times \left(\frac{1 - 0,0492}{\sqrt{3}} \right)^2 = 0,301 \times C_{unp}$$

Com os resultados obtidos, podem ser feitas as seguintes considerações:

- a queda de tensão na partida direta está acima do limite máximo de 10%. É oportuno abandonar esta solução e instalar uma chave compensadora ou estrela-triângulo;
- a queda de tensão com a chave compensadora no tape de 65% permite uma queda de tensão abaixo do limite recomendado de 10%, podendo ser a solução adotada. Deve-se analisar também, antes, a partida do motor no tape 80%, que, se for o caso, é uma solução ainda mais adequada;
- a queda de tensão com a chave estrela-triângulo permite também uma queda de tensão abaixo do limite recomendado de 10%. Tratando-se de um equipamento de menor preço, deve ser a solução preferida, devendo-se não esquecer o ajuste do tempo correto da chave para a passagem da posição estrela para a posição triângulo;
- o conjugado do motor com a chave estrela-triângulo é muito baixo, devendo-se adotar esta solução apenas na condição de o motor partir praticamente sem carga e se este dispuser de seis terminais acessíveis.

Outra alternativa é utilizar a chave de partida estática para motor de 300 cv.

Para se obter uma corrente de partida que produza uma queda de tensão igual ao limite de 10%, pode-se ajustar a chave de partida estática na tensão de partida de 90% da tensão nominal com uma corrente de partida de:

$$\Delta V = Z_i \times I_{pc}$$

$$0,10 = 0,09691 \times I_{pc} \rightarrow I_{pc} = 1,0318 \text{ pu}$$

O tempo de partida pode ser escolhido de acordo com a Equação (7.27), considerando-se que o tempo de partida direta do motor tenha sido calculado em 5 s.

$$T_p = T_{pd} \times \frac{V_{mn}}{V_p} = 5 \times \frac{1}{0,90} = 5,5 \text{ s}$$

- a queda de tensão no ponto de entrada da instalação é bem inferior ao máximo admitido, que é de 3% no presente caso.

Uma análise detalhada nos resultados finais permite ao leitor várias conclusões interessantes.

7.7.2 Queda de Tensão na Partida Simultânea de Dois ou Mais Motores

Os estudos efetuados até agora analisaram a partida individual dos motores de indução. Às vezes, porém, é necessário que dois ou mais motores de grande potência sejam acionados simultaneamente como parte de um processo qualquer de produção, sendo sempre conveniente evitar tal manobra, isto porque pode produzir severa queda de tensão na instalação, acarretando distúrbios que, se não estudados adequadamente, podem interferir no funcionamento de outros equipamentos.

A severidade das partidas simultâneas pode ser atenuada ou não, dependendo da localização dos motores acionados. Se estes estiverem ligados no mesmo circuito terminal, ou de distribuição, as condições tornam-se significativamente mais desfavoráveis do que se estiverem ligados em circuitos de distribuição diferentes.

Quando os motores estão ligados ao mesmo barramento do CCM, o procedimento adotado para o cálculo da queda de tensão é praticamente igual ao já explanado anteriormente, computando-se, neste caso, as correntes de partida dos respectivos motores, somando-as vetorialmente em função dos fatores de potência correspondentes que atingem valores entre 0,30 e 0,40.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (7.12)

Determinar a queda de tensão na partida dos dois motores de 300 e 475 cv, mostrados na planta da Figura 7.34, cujos dados são:

- tensão nominal primária: 13,80 kV;
- tensão nominal secundária: 440 V;
- potência de curto-circuito no ponto de entrega de energia: 150 MVA;
- todos os condutores são de cobre com isolamento em PVC e capa externa protetora; os dados relativos aos motores (440 V) foram extraídos da Tabela 6.3.

a) Dados de base

- potência base: $P_b = 1.000 \text{ kVA}$;
- tensão base: $V_b = 0,44 \text{ kV}$.

b) Impedância reduzida do sistema de alimentação

- Resistência (R_{un})

$$R_{un} \cong 0 \text{ pu}$$

- Reatância (X_{un})

$$X_{un} = \frac{P_b}{P_{cr}} = \frac{1.000}{150.000} = 0,0066 \text{ pu}$$

- Impedância (Z_{un})

$$\vec{Z}_{un} = 0 + j0,0066 \text{ pu}$$

c) Impedância dos transformadores

- Transformador de 1.000 kVA
- Resistência

$$R_{w1} = \frac{P_{cu}}{10 \times P_{at}} = \frac{11.000}{10 \times 1.000} = 1,10\% = 0,0110 \text{ pu (na base de 1.000 kVA)}$$

$$P_{cu} = 11.000 \text{ W (Tabela 9.11)}$$

- Reatância

$$Z_{p1} = 5,50\% = 0,0550 \text{ pu (na base de 1.000 kVA)}$$

$$X_{w1} = \sqrt{0,0550^2 - 0,0110^2} = 0,0538 \text{ pu}$$

- Impedância

$$\tilde{Z}_{w1} = R_{w1} + jX_{w1} = 0,0110 + j0,0538 \text{ pu}$$

- Transformador de 750 kVA
- Resistência

$$R_{w2} = \frac{P_{cu}}{10 \times P_{at}} = \frac{8.500}{10 \times 750} = 1,13\% = 0,0113 \text{ pu (na base de 750 kVA)}$$

$$R_{w2} = R_{pv} \times \frac{P_b}{P_{at}} \times \left(\frac{V_w}{V_b}\right)^2 = 0,0113 \times \frac{1.000}{750} \times \left(\frac{0,44}{0,44}\right)^2$$

$$R_{w2} = 0,01506 \text{ pu (na base da potência base de 1.000 kVA)}$$

- Reatância

$$X_{w2} = \sqrt{0,0733^2 - 0,01506^2} = 0,07173 \text{ pu}$$

$$Z_{p2} = 5,50\% = 0,0550 \text{ pu (na base de 750 kVA)}$$

$$Z_{w2} = Z_{p2} \times \frac{P_b}{P_{at}} \times \left(\frac{V_w}{V_b}\right)^2 = 0,0550 \times \frac{1.000}{750} \times \left(\frac{0,44}{0,44}\right)^2$$

$$Z_{w2} = 0,0733 \text{ pu (na base da potência base de 1.000 kVA)}$$

- Impedância

$$\tilde{Z}_{w2} = R_{w2} + jX_{w2} = 0,01506 + j0,07173 \text{ pu}$$

Logo, a impedância em paralelo resultante dos dois transformadores vale:

$$\tilde{Z}_{st} = \frac{(R_{w1} + jX_{w1}) \times (R_{w2} + jX_{w2})}{(R_{w1} + jX_{w1}) + (R_{w2} + jX_{w2})}$$

$$\tilde{Z}_{st} = \frac{(0,0110 + j0,0538) \times (0,01506 + j0,07173)}{(0,0110 + j0,0538) + (0,01506 + j0,07173)}$$

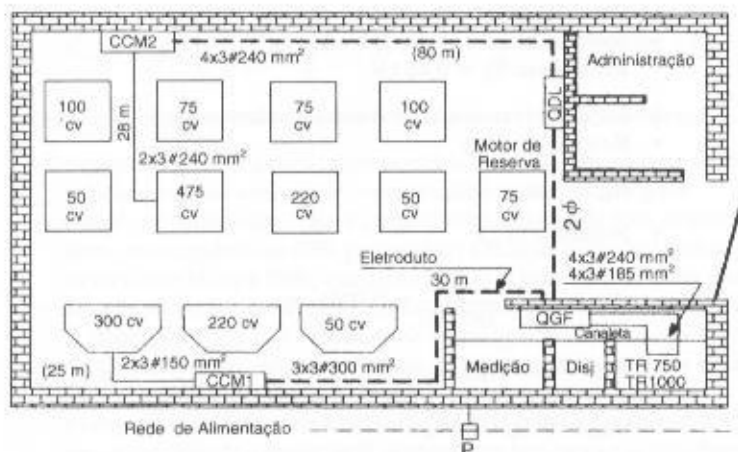


FIGURA 7.34
Layout da indústria

$$\bar{Z}_w = \frac{-0,00369 + j0,00159}{0,02606 + j0,12553} = 0,00629 + j0,03070 \text{ pu}$$

A impedância dos circuitos entre os transformadores e o QGF foi desconsiderada por ser de pequeno valor.

d) Impedância do circuito de alimentação do CCM1

- Resistência ($R_{a\Omega}$)

$$R_{a\Omega} = 0,0781 \text{ m}\Omega/\text{m} \text{ (Tabela 3.22)}$$

$$R_{w1} = \frac{R_{a\Omega} \times L_{cl}}{1.000 \times N_{cl}} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2}$$

$$R_{w1} = \frac{30 \times 0,0781}{3 \times 1.000} \times \frac{1.000}{1.000 \times 0,44^2} = 0,00403 \text{ pu}$$

- Reatância (X_{w1})

$$X_{a\Omega} = 0,1068 \text{ m}\Omega/\text{m} \text{ (Tabela 3.22)}$$

$$X_{w1} = \frac{X_{a\Omega} \times L_{cl}}{1.000 \times N_{cl}} \times \frac{P_b}{1.000 \times V_b^2}$$

$$X_{w1} = \frac{30 \times 0,1068}{3 \times 1.000} \times \frac{1.000}{1.000 \times 0,44^2} = 0,00551 \text{ pu}$$

$$\bar{Z}_{w1} = R_{w1} + jX_{w1} = 0,00403 + j0,00551 \text{ pu}$$

e) Impedância do circuito de alimentação do CCM2

- Resistência (R_{w2})

$$R_{a\Omega} = 0,0958 \text{ m}\Omega/\text{m} \text{ (Tabela 3.22)}$$

$$R_{w2} = \frac{80 \times 0,0958}{4 \times 1.000} \times \frac{1.000}{1.000 \times 0,44^2} = 0,00989 \text{ pu}$$

- Reatância (X_{w2})

$$X_{a\Omega} = 0,1070 \text{ m}\Omega/\text{m} \text{ (Tabela 3.22)}$$

$$X_{w2} = \frac{80 \times 0,1070}{4 \times 1.000} \times \frac{1.000}{1.000 \times 0,44^2} = 0,01105 \text{ pu}$$

$$\bar{Z}_{w2} = R_{w2} + jX_{w2} = 0,00989 + j0,01105 \text{ pu}$$

f) Impedância do circuito de alimentação do motor de 475 cv ($2 \times 3 \# 240 \text{ mm}^2$)

- Resistência (R_{w3})

$$R_{a\Omega} = 0,0958 \text{ m}\Omega/\text{m} \text{ (Tabela 3.22)}$$

$$R_{w3} = \frac{28 \times 0,0958}{2 \times 1.000} \times \frac{1.000}{1.000 \times 0,44^2} = 0,00692 \text{ pu}$$

- Reatância (X_{w3})

$$X_{a\Omega} = 0,1070 \text{ m}\Omega/\text{m} \text{ (Tabela 3.22)}$$

$$X_{w3} = \frac{28 \times 0,1070}{2 \times 1.000} \times \frac{1.000}{1.000 \times 0,44^2} = 0,00773 \text{ pu}$$

$$\bar{Z}_{w3} = R_{w3} + jX_{w3} = 0,00692 + j0,00773 \text{ pu}$$

g) Impedância do circuito de alimentação do motor de 300 cv ($2 \times 3 \# 150 \text{ mm}^2$)

- Resistência (R_{w4})

$$R_{a\Omega} = 0,1502 \text{ m}\Omega/\text{m} \text{ (Tabela 3.22)}$$

$$R_{w4} = \frac{25 \times 0,1502}{2 \times 1.000} \times \frac{1.000}{1.000 \times 0,44^2} = 0,00969 \text{ pu}$$

- Reatância (X_{w4})

$$X_{a\Omega} = 0,1074 \text{ m}\Omega/\text{m} \text{ (Tabela 3.22)}$$

$$X_{w4} = \frac{25 \times 0,1074}{2 \times 1.000} \times \frac{1.000}{1.000 \times 0,44^2} = 0,00693 \text{ pu}$$

$$\vec{Z}_{uc4} = R_{uc4} + jX_{uc4} = 0,00969 + j0,00693 \text{ pu}$$

h) Impedância dos motores

- Motor de 475 cv

$R_{am1} \cong 0$ (valor muito pequeno quando comparado com a impedância)

$$I_p/I_{an} = 7,6$$

$$X_{an} = \frac{I_{an}}{I_p} = \frac{1}{7,6} = 0,131 \text{ pu (na base de 475 cv)}$$

$$P_{an} = \frac{P_{mcv} \times 0,736}{\eta \times F_p} = \frac{475 \times 0,736}{0,96 \times 0,89} = 409,1 \text{ kVA}$$

$$X_{am1} = X_{an} \times \frac{P_b}{P_{an}} \times \left(\frac{V_{an}}{V_b} \right)^2 = 0,131 \times \frac{1.000}{409,1} \times \left(\frac{0,44}{0,44} \right)^2$$

$$X_{am1} = 0,320 \text{ pu}$$

$$\vec{Z}_{am1} = 0 + j0,320 \text{ pu}$$

- Motor de 300 cv

$R_{am2} = 0$ (valor muito pequeno quando comparado com a impedância)

$$I_p/I_{an} = 6,8$$

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

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

$$X_{am2} = X_{an} \times \frac{P_b}{P_{an}} \times \left(\frac{V_{an}}{V_b} \right)^2 = 0,147 \times \frac{1.000}{261,3} \times \left(\frac{0,44}{0,44} \right)^2$$

$$X_{am2} = 0,562 \text{ pu}$$

$$\vec{Z}_{am2} = 0 + j0,562 \text{ pu}$$

i) Corrente de partida

- Motor de 475 cv

$$\vec{I}_{p1} = \frac{1}{\vec{Z}_{ut} + \vec{Z}_{ut} + \vec{Z}_{uc} + \vec{Z}_{ab} + \vec{Z}_{amb}} = \frac{1}{\vec{Z}_{m1}} = \frac{1}{0,37678} = 2,65406 \text{ pu}$$

\vec{Z}_{uc} – impedância dos condutores

$$\vec{Z}_{m1} = j0,0066 + 0,00629 + j0,03070 + 0,00989 + j0,01105 + 0,00692 + j0,00773 + j0,320$$

$$\vec{Z}_{m1} = 0,02310 + j0,37608 \text{ pu}$$

$$Z_{m1} = 0,37678 \text{ pu}$$

- Motor de 300 cv

$$\vec{I}_{p2} = \frac{1}{\vec{Z}_{ut} + \vec{Z}_{ut} + \vec{Z}_{uc} + \vec{Z}_{ab} + \vec{Z}_{amb}} = \frac{1}{\vec{Z}_{m2}} = \frac{1}{0,61206} = 1,63382 \text{ pu}$$

$$\vec{Z}_{m2} = j0,0066 + 0,00629 + j0,03070 + 0,00403 + j0,00551 + 0,00969 + j0,00693 + j0,562$$

$$\vec{Z}_{m2} = 0,02001 + j0,61174 \text{ pu}$$

$$Z_{m2} = 0,61206 \text{ pu}$$

j) Queda de tensão nos terminais dos motores partindo isoladamente

- Motor de 475 cv

$$\Delta \vec{V}_{am1} = (\vec{Z}_{ut} + \vec{Z}_{ut} + \vec{Z}_{uc} + \vec{Z}_{ab}) \times \vec{I}_{p1}$$

$$\Delta \vec{V}_{am1} = (j0,0066 + 0,00629 + j0,03070 + 0,00989 + j0,01105 + 0,00692 + j0,00773) \times 2,65406$$

$$\Delta \vec{V}_{am1} = (0,02310 + j0,05608) \times 2,65406$$

$$\Delta \vec{V}_{am1} = 0,06065 \times 2,65406 = 0,161 \text{ pu} = 16,1\%$$

- Motor de 300 cv

$$\Delta \vec{V}_{am2} = (\vec{Z}_{u1} + \vec{Z}_{u2} + \vec{Z}_{u3} + \vec{Z}_{u4}) \times \vec{I}_{p2}$$

$$\Delta \vec{V}_{am2} = (j0,0066 + 0,00629 + j0,03070 + 0,00403 + j0,00551 + 0,00969 + j0,00693) \times 1,63382$$

$$\Delta \vec{V}_{am2} = (0,02001 + j0,04974) \times 1,63382$$

$$\Delta V_{am2} = 0,0536 \times 1,63382 = 0,087 \text{ pu} = 8,7\%$$

k) Queda de tensão nos terminais dos motores de 300 e 475 cv partindo simultaneamente

O processo de cálculo pode ser entendido facilmente, analisando-se o diagrama de blocos simplificado da Figura 7.35. Determina-se, inicialmente, a queda de tensão no ponto A (barra do QGF) com base na soma das correntes de partida dos dois motores e as quedas de tensão devidas à corrente de partida de cada motor no seu ramal de alimentação correspondente. Em seguida, soma-se a queda de tensão em cada ramal à queda de tensão no ponto A, obtendo-se a queda de tensão no ponto de conexão de cada motor.

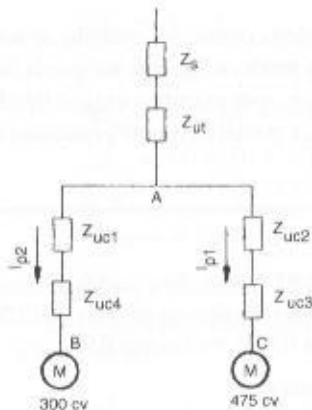


FIGURA 7.35
Diagrama unifilar básico

l) Queda de tensão no ponto A devida à partida simultânea dos dois motores

Considerando-se que os fatores de potência na partida dos motores sejam iguais a 0,40, tem-se:

$$\vec{I}_{p1} = \vec{I}_{p1} + \vec{I}_{p2} = \frac{1}{\vec{Z}_{m1}} + \frac{1}{\vec{Z}_{m2}} = \frac{1}{0,02310 + j0,37608} + \frac{1}{0,02001 + j0,61174}$$

$$\vec{I}_{p1} = \frac{+ 0,02310 + j0,37608 + 0,02001 + j0,61174}{(0,02310 + j0,37608) \times (0,02001 + j0,61174)} = \frac{0,04311 + j0,98782}{+ 0,22960 + j0,02165}$$

$$\vec{I}_{p1} = 0,21600 - j4,28198 \text{ pu}$$

$$I_{p1} = 4,287 \text{ pu}$$

Mais simplificada-se pode-se obter:

$$I_{p1} = I_{p1} + I_{p2}$$

$$\vec{I}_{p1} = 2,65406 + 1,63382 = 4,287 \text{ pu}$$

A queda de tensão até o ponto A da Figura 7.35 vale:

$$\Delta \vec{V}_{am} = (\vec{Z}_{u1} + \vec{Z}_{u2}) \times \vec{I}_{p1} = (j0,0066 + 0,00629 + j0,03070) \times 4,287$$

$$\Delta V_{am} = 0,037 \times 4,287 = 0,158 \text{ pu} = 15,8\%$$

m) Queda de tensão no ramal A-B

$$\Delta \vec{V}_{am} = \vec{Z}_{u1} \times \vec{I}_{p1}$$

$$\Delta \vec{V}_{am} = (0,00403 + j0,00551 + 0,00969 + j0,00693) \times 1,63382$$

$$\Delta V_{am} = 0,0185 \times 1,63382 = 0,030 \text{ pu} = 3,0\%$$

n) Queda de tensão no ramal A-C

$$\Delta \vec{V}_{am} = \vec{Z}_{u2} \times \vec{I}_{p1}$$

$$\Delta \vec{V}_{am} = (0,00989 + j0,01105 + 0,00692 + j0,00773) \times 2,65406$$

$$\Delta V_{am} = 0,02520 \times 2,65406 = 0,066 \text{ pu} = 6,6\%$$

- o) Queda de tensão nos terminais dos motores
- Motor de 475 cv

$$\Delta V_{un} = 0,158 + 0,066 = 0,0224 \text{ pu} = 22,4\%$$

- Motor de 300 cv

$$\Delta V_{un} = 0,158 + 0,030 = 0,188 \text{ pu} = 18,8\%$$

7.8 CONTRIBUIÇÃO DA CARGA NA QUEDA DE TENSÃO DURANTE A PARTIDA DE MOTORES DE INDUÇÃO

Até então, não se deu a importância merecida à contribuição da carga no processo que resulta na queda de tensão durante o acionamento de um motor de indução, isto é, à diferença na queda de tensão entre ligar o motor com toda a carga do projeto ligada ou ligar o mesmo motor antes de ligar a referida carga.

Numa instalação industrial, em plena operação, quando se aciona um motor de grande potência, a carga existente pode contribuir moderadamente na queda de tensão durante a sua partida. Se existe dificuldade na partida do motor com as outras cargas ligadas, é aconselhável acionar inicialmente o motor de grande porte para posteriormente processar a ligação das demais cargas.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (7.13)

Considerar o Exemplo de Aplicação (7.12). Simular a partida do motor de 475 cv com os demais motores do CCM2 em operação. Depois, considerar também os motores do CCM1 em carga plena. Admitir que todos os motores tenham fator de potência 0,86 e rendimento 0,95.

- a) Corrente de carga nominal dos motores

$$P_{50} = \frac{50 \times 0,736}{0,86 \times 0,95} = 45,0 \text{ kVA} \rightarrow I_{50} = \frac{45,0}{\sqrt{3} \times 0,44} = 59,0 \text{ A}$$

$$P_{75} = \frac{75 \times 0,736}{0,86 \times 0,95} = 67,5 \text{ kVA} \rightarrow I_{75} = \frac{67,5}{\sqrt{3} \times 0,44} = 88,5 \text{ A}$$

$$P_{100} = \frac{100 \times 0,736}{0,86 \times 0,95} = 90,0 \text{ kVA} \rightarrow I_{100} = \frac{90,0}{\sqrt{3} \times 0,44} = 118,0 \text{ A}$$

$$P_{220} = \frac{220 \times 0,736}{0,86 \times 0,95} = 198,1 \text{ kV} \rightarrow I_{220} = \frac{198,1}{\sqrt{3} \times 0,44} = 259,9 \text{ A}$$

$$P_{300} = \frac{300 \times 0,736}{0,86 \times 0,95} = 270,2 \text{ kVA} \rightarrow I_{300} = \frac{270,2}{\sqrt{3} \times 0,44} = 354,5 \text{ A}$$

$$P_{475} = \frac{475 \times 0,736}{0,86 \times 0,95} = 427,9 \text{ kVA} \rightarrow I_{475} = \frac{427,9}{\sqrt{3} \times 0,44} = 561,4 \text{ A}$$

- b) Corrente de carga do CCM2, exceto a do motor de 475 cv

Considerando-se os fatores de potência de cada motor, a corrente de carga correspondente vale:

$$I_{a1} = 2 \times 59,0 \times 0,86 + 2 \times 88,5 \times 0,86 + 2 \times 118,0 \times 0,86 + 1 \times 259,9 \times 0,86 = 680,1 \text{ A}$$

$$I_{r1} = 2 \times 59,0 \times 0,51 + 2 \times 88,5 \times 0,51 + 2 \times 118,0 \times 0,51 + 1 \times 259,9 \times 0,51 = 403,3 \text{ A}$$

$$I_m = \sqrt{680,1^2 + 403,3^2} = 790,6 \text{ A}$$

Para as condições de base, as correntes ativa e reativa, em pu, valem:

$$I_b = \frac{P_b}{\sqrt{3} \times V_b} = \frac{1.000}{\sqrt{3} \times 0,44} = 1.312 \text{ A}$$

$$I_{avp} = \frac{680,1}{1.312} = 0,518 \text{ pu}$$

$$I_{rtp} = \frac{403,3}{1.312} = 0,307 \text{ pu}$$

- c) Queda de tensão na partida do motor de 475 cv com toda a carga do CCM2 ligada

Considerando-se um fator de potência de 0,40 durante a partida do motor de 475 cv, obtêm-se as correntes ativa e reativa, respectivas, em *pu*.

- Corrente de partida do motor de 475 cv

$$I_{pl} = 2,65406 \text{ pu (veja o Exemplo de Aplicação 7.12)}$$

$$I_{aip} = 2,65406 \times 0,40 = 1,061 \text{ pu (corrente ativa)}$$

$$I_{rip} = 2,65406 \times 0,91 = 2,415 \text{ pu (corrente reativa)}$$

- Corrente que flui para o CCM2 durante a partida do motor de 475 cv

$$I_{to} = I_{avp} + I_{aip} = 0,518 + 1,061 = 1,579 \text{ pu}$$

$$I_r = I_{rvp} + I_{rip} = j0,307 + j2,415 = j2,722 \text{ pu}$$

$$I_t = \sqrt{1,579^2 + 2,722^2} = 3,0146 \text{ pu}$$

- Queda de tensão nos terminais do motor de 475 cv:

$$\Delta \vec{V}_{u2} = \vec{Z}_c \times \vec{I}_t$$

$$\vec{I}_t = I_{u2} + jI_r = 1,579 + j2,722$$

$$\Delta \vec{V}_{u2} = (j0,0066 + 0,00629 + j0,03070 + 0,00989 + j0,01105 + 0,00692 + j0,00773) \times \vec{I}_t$$

$$\Delta \vec{V}_{u2} = (0,02310 + j0,05608) \times (1,579 + j2,722) = -0,1162 + j0,1514 \text{ pu}$$

$$\Delta V_{u2} = 0,190 \text{ pu} = 19,0\%$$

- A queda de tensão sem a contribuição da carga vale:

$$\Delta V_{u2} = 0,161 \text{ pu} = 16,1\% \text{ (veja o item j da Seção 7.7.2)}$$

Logo, a carga em operação no CCM2 contribui com 18% para a queda de tensão na partida do motor de 475 cv, ou seja:

$$\Delta V_u = 19,0 - 16,1 = 2,9 \rightarrow \Delta_{cl} = \frac{2,9}{16,1} \times 100 = 18\%$$

- d) Queda de tensão nos terminais do motor de 475 cv com toda a carga do sistema ligada

Neste caso, todos os motores do CCM1 e do CCM2 estão em operação.

- Corrente de carga do CCM 1

$$I_{a1} = 1 \times 59,0 \times 0,86 + 1 \times 259,9 \times 0,86 + 1 \times 354,5 \times 0,86 = 579,1 \text{ A}$$

$$I_{r1} = 1 \times 59,0 \times 0,51 + 1 \times 259,9 \times 0,51 + 1 \times 354,5 \times 0,51 = 343,4 \text{ A}$$

$$I_{a1} = \sqrt{579,1^2 + 343,4^2} = 673,2 \text{ A}$$

$$I_{avp} = \frac{579,1}{1,312} = 0,441 \text{ pu}$$

$$I_{rvp} = \frac{343,4}{1,312} = j0,261 \text{ pu}$$

$$\vec{I}_t = 0,441 + j0,261 \text{ pu}$$

$$I_t = \sqrt{0,441^2 + 0,261^2} I_t = 0,512 \text{ pu}$$

- Queda de tensão na barra do QGF devida somente à carga CCM1

$$\Delta \vec{V}_{u1} = (j0,0066 + 0,00629 + j0,03070) \times \vec{I}_t$$

$$\Delta \vec{V}_{u1} = (0,00629 + j0,03730) \times (0,441 + j0,261) = -0,00696 + j0,01809 \text{ pu}$$

$$\Delta V_{u1} = 0,0193 = 1,93\%$$

- Queda de tensão nos terminais do motor de 475 cv

$$\Delta V_{u1} = 0,190 + 0,0193 = 0,209 = 20,9\%$$

Conclui-se que a contribuição da carga da instalação, de uma forma geral, não é muito significativa durante a partida dos motores elétricos.

7.9 ESCOLHA DA TENSÃO NOMINAL DE MOTORES DE POTÊNCIA ELEVADA

Quando se trata de projetos industriais, onde existem motores de potência elevada, superior a 500 cv, é necessário estudar detalhadamente a tensão nominal a ser escolhida, a fim de assegurar as condições de partida adequadas na rede secundária de alimentação. No entanto, a tensão nominal do motor, conseqüentemente a sua corrente nominal, não influencia a queda de tensão no sistema primário, que permanece invariada para qualquer valor de tensão secundária.

Em geral, os motores de até 600 cv são fabricados em baixa tensão, ou seja: 220, 380 e 440 V. Os motores solicitados acima desta potência são fabricados sob encomenda e, geralmente, são de média tensão. Motores abaixo de 600 cv solicitados em média tensão geralmente têm projetos específicos. Estes limites de tensão e potência obedecem, a rigor, a requisitos econômicos.

Quando se projeta a instalação de um motor de potência elevada, é necessário determinar a queda de tensão durante a sua partida, tanto na rede de suprimento da concessionária, como na rede interna da planta. Se a queda de tensão durante a partida estiver acima dos limites permitidos pela concessionária, será necessário estudar um meio de acionamento adequado, se isto for possível, em função dos requisitos operacionais da carga. Caso contrário, faz-se necessário especificar um motor de baixa corrente de partida, por exemplo, de letra código A. Entretanto, se a queda de tensão na rede da concessionária permite o acionamento direto, e o mesmo não acontece com a instalação interna, o que é mais comum de acontecer, pode-se especificar a tensão nominal do referido motor com um valor mais elevado, por exemplo, 2.200, 4.160 ou 6.600 V, dependendo da necessidade de manter a queda de tensão em nível inferior ao máximo exigido para aquela instalação em particular.

Em algumas instalações, como estações de bombeamento de água, onde não existem, em geral, equipamentos com grande sensibilidade às quedas de tensão de curta duração, podem-se permitir acionamentos de motores de grande potência que provoquem quedas de tensão acima dos limites de operação das bobinas dos contadores. Nestes casos, projeta-se um sistema em corrente contínua a partir de uma fonte formada por um banco de baterias ligado a um retificador-flutuador. A tensão do circuito de corrente contínua normalmente empregada é de 24, 48, 125 ou de 220 V, sabendo-se que a mais freqüente é a de 125 V. Os ampêres-horas do banco são função da potência consumida pela carga a ser ligada neste sistema. Desta forma, todas as bobinas dos contadores devem ser especificadas para serem ligadas no circuito de corrente contínua que está isento dos efeitos das quedas de tensão no sistema alimentador, devido ao acionamento dos motores.

Em geral, nas instalações que contêm grandes máquinas, há necessidade da aplicação de um sistema de proteção através da utilização de relés secundários, o que por si só já justifica a aquisição do sistema de corrente contínua, cujo custo é bastante elevado.

A Figura 7.36, que representa um esquema unifilar simplificado, resume as informações anteriores.

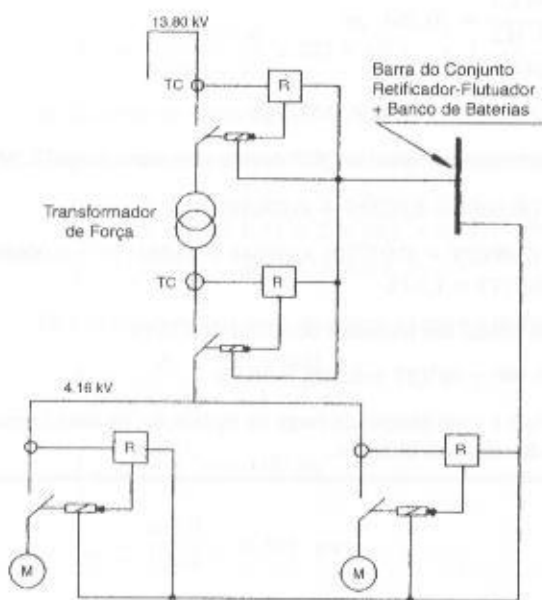


FIGURA 7.36
Esquema básico de partida de
motores com elevada queda de
tensão

7.10 SOBRETENSÕES DE MANOBRA

Os motores de indução com rotor em curto-circuito podem provocar no sistema de alimentação severos níveis de sobretensão quando são desligados da rede durante o processo de partida direta. Também quando os motores, acionados diretamente da rede e sem carga no eixo são desligados, podem ocorrer fortes sobretensões de manobra que devem ser evitadas. Estas sobretensões são mais notadas em unidades superiores a 150 cv e inferiores a 500 cv, nas tensões compreendidas entre 4,16 e 13,80 kV.

O desligamento súbito dos motores assíncronos deve-se principalmente ao rotor travado, à partida para verificação do sentido de rotação, à atuação intempestiva do relé de proteção e até ao acionamento por descuido.

O fator principal da ocorrência de sobretensões deve-se às interrupções de correntes altamente indutivas, como se verifica na partida dos motores elétricos de indução. As sobretensões dependem do valor instantâneo da tensão aplicada aos terminais do motor, quando ocorre a passagem da corrente por zero. Também a configuração do sistema supridor, associada às condições construtivas do disjuntor, contribui fortemente para determinar a amplitude da sobretensão. Um outro fator importante é a corrente de desligamento do motor. Quanto maior for, mais severa é a amplitude das sobretensões.

É interessante observar que os motores de potência muito elevada não provocam sobretensões capazes de prejudicar o sistema.

7.11 CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTORES DE INDUÇÃO

Ao se analisar a Equação (7.57) percebe-se que há dois métodos básicos de variação da velocidade dos motores de indução, isto é, variando-se o número de pólos ou a frequência. No primeiro caso, a variação da velocidade se dá de maneira discreta, como é óbvio, na proporção 1:2. Já no segundo método, a velocidade pode variar de forma contínua com a variação da frequência.

7.11.1 Conexão Dahlander

Este método de partida implica a utilização de um motor de indução de construção apropriada, em que, na maioria dos casos, cada enrolamento de fase é constituído de duas bobinas ligadas em série, com o ponto médio acessível e os mesmos enrolamentos ligados em triângulo, conforme se mostra na Figura 7.37.

O princípio fundamental deste tipo de acionamento se baseia na seguinte expressão básica:

$$W_s = \frac{2 \times F}{P} \quad (7.57)$$

W_s – velocidade angular síncrona do motor, em rps;

F – frequência da rede, em Hz;

P – número de pólos.

Variando-se o número de pólos, obtém-se proporcionalmente uma velocidade variável. Como o grupo de bobinas de fase é conectado de forma a resultar, por exemplo, uma relação de número de pólos de 1:2 (potência constante), pode-se alterar o número de pólos, ligando-se adequadamente os terminais disponíveis, obtendo-se, desta forma, um motor de duas velocidades.

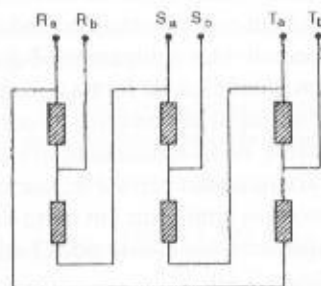


FIGURA 7.37
Conexão Dahlander

Normalmente a partida do motor se dá na velocidade mais baixa, quando as bobinas estão conectadas em Δ , conforme a Figura 7.38, onde o conjugado é elevado. Quando o motor adquire uma velocidade constante, permuta-se para a conexão YY, conforme a Figura 7.39, alterando-se o número de pólos e obtendo-se a velocidade superior, que é a de regime normal.

No caso de motores de oito pólos, a partida realizada na conexão síncrona, em Δ , é de 900 rpm. Alterando-se a conexão da Figura 7.37 para YY, obtém-se $P = 4$ pólos, em que a velocidade síncrona é de 1.800 rpm.

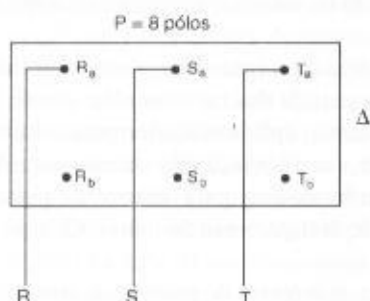


FIGURA 7.38
Ligação delta

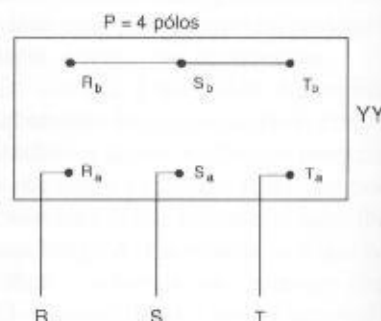


FIGURA 7.39
Ligação YY

Utilizando-se a Equação (7.57), tem-se:

- Em baixa velocidade

$$W_s = \frac{2 \times F}{P} = \frac{2 \times 60}{8} = \frac{120}{8} = 15 \text{ rps}$$

$$W_r = 15 \times 60 = 900 \text{ rpm}$$

- Em alta velocidade

$$W_s = \frac{2 \times F}{P} = \frac{2 \times 60}{4} = \frac{120}{4} = 30 \text{ rps}$$

$$W_r = 30 \times 60 = 1.800 \text{ rpm}$$

Os motores podem ser solicitados com suas conexões internas ligadas, de modo a desenvolver uma potência constante ou um conjugado máximo praticamente constante. No caso apresentado anteriormente, o motor está conectado para desenvolver um conjugado máximo praticamente constante. Assim, se a potência do motor em questão é de 100 cv na velocidade superior, na partida, ou seja, em baixa velocidade, a sua potência é de apenas 63 cv. No entanto, em ambas as conexões o conjugado máximo é basicamente o mesmo.

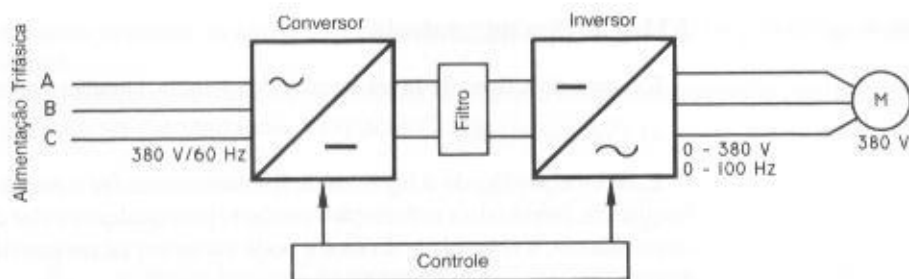
7.11.2 Inversores de Frequência

Nas indústrias de química e petroquímica, cimento, siderurgia, têxtil, bebidas etc. é amplamente utilizado o controle de velocidade dos motores elétricos em função do processo de manufatura. Até poucos anos atrás estas questões vinham sendo resolvidas com a aplicação de motores de corrente contínua quando se desejava um controle de velocidade contínuo. Porém, com o advento da eletrônica de potência foram desenvolvidos equipamentos apropriados, denominados inversores de frequência, associados à microeletrônica, de forma a permitir o uso de motores de indução com rotor em curto-circuito em substituição aos motores de corrente contínua.

Os motores de indução 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.

O controle de velocidade dos motores com rotor em curto-circuito é possível com o uso dos inversores de frequência que são equipamentos constituídos basicamente por um retificador e um inversor, conforme mostrado na Figura 7.40.

RA 7.40
ema básico de um inversor
equência



7.11.2.1 Operação com velocidade inferior à nominal

A maioria dos motores de indução utilizados é do tipo rotor em gaiola de esquilo com autoventilação.

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 angulares 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 da solução da faixa de velocidade em que irá operar o motor. No entanto, como ocorre em muitas aplicações se ao reduzir a velocidade angular a carga também diminuir, como no bombeamento de líquidos através de bombas centrífugas, a corrente decresce e, conseqüentemente, as perdas diminuem, compensando a deficiência de ventilação.

De acordo com a Equação (7.64), o conjugado é diretamente proporcional ao fluxo Φ que, por sua vez, é proporcional à relação V/F . Sendo o motor autoventilado, em velocidade reduzida, mantendo a mesma carga, a temperatura se eleva no interior do motor, necessitando-se reduzir o torque para manter a temperatura dentro dos limites da classe de isolamento, de acordo com a Tabela 7.4.

7.11.2.2 Operação com velocidade superior à nominal

Nestas circunstâncias a tensão é ajustada no seu valor máximo (tensão nominal) enquanto a frequência seria incrementada, devendo ser limitada pelo conjugado máximo do motor e pelos esforços mecânicos a que ficariam submetidas as partes móveis do referido motor, incluindo-se aí o próprio rolamento.

A máxima velocidade a que é possível submeter o motor, limitada pelo aumento da frequência, pode ser dada pela Equação (7.58).

$$W_{\text{máx}} = 0,67 \times W_{\text{nm}} \times \frac{C_{\text{má}}}{C_{\text{nm}}} \quad (7.58)$$

$C_{\text{má}}$ – conjugado máximo do motor;

C_{nm} – conjugado nominal do motor;

W_{nm} – velocidade nominal do motor, em rpm.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (7.14)

Determinar a máxima velocidade que atingiria um motor de 600 cv/IV pólos/380 V, cuja relação do conjugado máximo para o conjugado nominal ($C_{\text{má}}/C_{\text{nm}}$) é de 220%.

$$W_{\text{máx}} = 0,67 \times 1.800 \times 2,20 = 2.653 \text{ rpm}$$

$$\Delta W = \frac{2.653 - 1.800}{1.800} \times 100 = 47,3\%$$

7.11.2.3 Tipo de controle

Existem dois tipos de inversores de frequência, caracterizados pela forma de controle,

a) Controle escalar

É assim classificado o inversor de frequência que faz o motor operar controlando a tensão e a frequência, mantendo a sua relação constante para qualquer valor da velocidade de operação. Nessa circunstância, a velocidade do motor pode variar em faixas estreitas, em função do seu escorregamento.

O inversor de frequência de controle escalar é utilizado em aplicações rotineiras que não necessitam de controle de conjugado do motor e cujo controle de velocidade esteja na faixa de 6 a 60 Hz. É aplicado em motores de indução com rotor em gaiola convencional sem nenhum sistema de realimentação em malha fechada.

O inversor de controle escalar usa a velocidade do motor como sinal para fazer variar a tensão e a frequência e disparar os transistores.

b) Controle vetorial

É assim classificado o inversor de frequência que faz o motor operar com uma elevada precisão de velocidade e uma elevada rapidez na mudança de velocidade e de conjugado sendo, portanto, mais utilizado em máquinas operatrizes que necessitam de um rígido controle na velocidade.

Os inversores de controle vetorial são fabricados em duas versões:

- Inversores de frequência sem sensor (*sensoless*)

Esses inversores são mais simples e não têm regulação de conjugado.

- Inversores de frequência com realimentação controlada pelo campo magnético (*encoder*)

Esses inversores podem controlar a velocidade e o conjugado do motor tomando como referência a corrente do próprio motor, sendo mais empregados no controle fino de velocidade dos motores. Assim, o inversor de controle vetorial determina a corrente do estator, a de magnetização e a corrente requerida para produzir o conjugado necessário para a operação do motor.

7.11.2.4 Tensão nominal

Deve-se utilizar o inversor de frequência com a mesma tensão nominal do motor.

Para que não se danifique o inversor de frequência com a queima dos seus diodos de entrada, deve-se preservar um desbalanceamento de tensão entre as fases inferior a 2%.

Para motores de pequena potência, isto é, não superiores a 3 cv, pode-se alimentá-los através de inversores de frequência trifásicos utilizando-se um sistema monofásico.

7.11.2.5 Corrente nominal

A corrente nominal do inversor de frequência deve ser igual ou superior à corrente nominal do motor aplicado.

A Tabela 9.19 fornece a corrente nominal de inversores de frequência de fabricação WEG. Deve-se considerar no dimensionamento de um inversor de frequência que o mesmo pode possuir diferentes correntes nominais, a depender das características da carga ligada ao motor. No caso de carga do tipo conjugado variável, a capacidade de sobrecarga do inversor de frequência pode variar entre 10 e 15%. Esse tipo de carga pode ser encontrado nos motores que acionam bombas de líquidos, como nos setores de tingimento das indústrias têxteis, estações de bombeamento etc, ou ainda, nos moinhos de trigo que normalmente usam grandes ventiladores centrífugos.

Se o mesmo inversor de frequência for utilizado nos motores que acionam cargas de conjugado constante, deve ser dimensionado para suportar uma sobrecarga de no mínimo 50% de seu valor nominal.

7.11.2.6 Potência nominal

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 em operação, é ne-

cessário verificar se existe capacidade de potência de reserva na percentagem anteriormente citada.

De acordo com o que foi comentado, a potência do motor controlado por inversor de frequência pode ser calculada com a Equação (7.59).

$$P_{nm} = 1,15 \times P_{ei} \times \frac{W_{nm}}{W_m} \quad (7.59)$$

P_{nm} – potência nominal do motor, em cv;

P_{ei} – potência mínima solicitada no eixo do motor, em cv;

W_{nm} – velocidade angular nominal do motor, em rpm;

W_m – velocidade angular mínima do motor correspondente à potência mínima solicitada, em rpm.

Em geral, os inversores estáticos 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 das chaves inversoras se faz sentir notadamente nas seguintes atividades industriais:

- elevação e transporte de cargas;
- bobinamento e desbobinamento de papéis;
- laminação de aço;
- extrusão de materiais plásticos;
- indústrias têxteis.

Para que se possa utilizar um inversor de frequência é necessário que se conheça as suas características técnicas.

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

7.11.2.7 Componentes harmônicos

Os inversores de frequência são equipamentos geradores de correntes harmônicas capazes de prejudicar o desempenho das cargas conectadas ao sistema. Para evitar essa condição e atender a IEEE-519, é necessário tomar uma das seguintes providências:

- a) Determinar a potência total dos inversores de frequência. Se a potência total for igual ou inferior a 20% da carga total instalada, conectar em série com o inversor de frequência uma reatância, normalmente ligada nos seus terminais, de forma a provocar uma queda de tensão igual a 3% em relação à tensão composta, na condição de carregamento nominal do motor.
- b) Se a potência total dos inversores for superior a 20% do total da carga instalada, é necessário realizar um estudo detalhado, envolvendo todas as cargas e a sua sensibilidade quanto ao desempenho operacional na presença de componentes harmônicos.

Não tem sido fácil para os projetistas obter informações sobre a geração de harmônicos dos fabricantes de máquinas que contêm controladores de processo. Assim, a análise anterior fica prejudicada, em grande parte dos casos, pelo desconhecimento dos valores individuais da distorção harmônica das máquinas e que devem ser consideradas juntamente com a distorção harmônica provocada pelos inversores.

7.11.2.8 Limite de velocidade

Os motores elétricos operados por chaves inversoras de frequência 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.

7.11.2.9 Desempenho operacional dos motores

O inversor de frequência libera para o motor uma onda senoidal distorcida em função dos componentes harmônicos, tanto de corrente como de tensão, que afeta significativamente as características dos motores de indução, notadamente o seu rendimento. Para manter a elevação de temperatura do motor dentro de sua classe de isolamento, é necessário reduzir o conjugado por meio de um fator inferior a unidade, conforme Tabela 7.7.

Os motores elétricos operados por inversores devem respeitar algumas condições em serviço que podem influenciar o seu desempenho, que estão intimamente relacionadas ao comportamento da carga e às características técnicas dos inversores, ou seja:

a) Efeito das correntes harmônicas sobre os motores de indução

Quando o motor é operado por um inversor é aplicado aos seus terminais uma tensão com conteúdo harmônico, fazendo gerar correntes harmônicas nas mesmas frequências das tensões aplicadas. Como resultado, tem-se:

- perdas nos enrolamentos;
- elevação da temperatura;
- redução do rendimento.

Para compensar a elevação de temperatura sofrida pelos enrolamentos, deve-se reduzir o valor do torque nominal do motor na proporção dada pela Tabela 7.7. Outra forma de compensar a elevação de temperatura é adotar um motor de maior potência.

TABELA 7.7

Fator de redução de torque por presença de harmônicos

Distorção Harmônica (%)	Fator de Redução de Torque do Motor
3	1,00
4	0,97
5	0,94
6	0,95
7	0,93
8	0,90
9	0,87
10	0,86
11	0,78
12	0,73

O fator de distorção harmônica de tensão pode ser determinado a partir da relação da Equação (7.60).

$$F_{dh} = 100 \times \frac{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}{V_f^2} \quad (7.60)$$

V_f – tensão fundamental em seu valor eficaz;

V_h – tensão harmônica de ordem N ;

N – ordem da harmônica.

Para se obter o rendimento de um motor de indução acionado por um inversor de frequência, pode-se empregar a Equação (7.61).

$$\eta_r = \frac{F_{rh}^2}{\frac{1}{\eta} + F_{rh}^2 - 1} \quad (7.61)$$

η_r – rendimento do motor funcionando com o inversor de frequência;

η – rendimento do motor suprido por onda senoidal perfeita;

F_{rh} – fator de redução de torque por distorção harmônica.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (7.15)

Um motor de 300 cv/IV – pólos/380 V, rendimento 0,96, deverá ser utilizado por um inversor de frequência que produz uma distorção harmônica no sistema de alimentação de 10%. Determinar o rendimento desse motor quando acionado pelo inversor de frequência.

$$\eta_r = \frac{F_{rh}^2}{\frac{1}{\eta} + F_{rh}^2 - 1} = \frac{0,86^2}{\frac{1}{0,96} + 0,86^2 - 1} = 0,94$$

$F_{rh} = 0,86$ (obtida da Tabela 7.7)

Se o motor utilizado com o inversor de frequência tem ventilação independente, o aquecimento do motor será pouco afetado. No entanto, se o motor é do tipo autoventilado, a operação com variação de velocidade faz elevar a temperatura do motor, em virtude da deficiência de ventilação em baixas velocidades. A Tabela 7.8 fornece a redução de conjugado percentual dos motores em função da redução da ventilação como consequência da diminuição da rotação do motor e a redução de conjugado em função da simultaneidade da presença de harmônicos de tensão e da redução

TABELA 7.8

Fator de redução de torque por presença de harmônicos

Variação de Velocidade (%)	Fator de Redução de Torque Devido à Rotação	Fator de Redução de Torque Devido à Rotação e à Harmônica
10	0,64	0,60
20	0,72	0,70
30	0,83	0,77
40	0,85	0,81
50	0,88	0,85
60	0,92	0,87
70	0,96	0,90
80	1,00	0,94
90	–	0,95
100	–	0,95
110	–	0,85
120	–	0,80
130	–	0,74
140	–	0,68
150	–	0,64
160	–	0,64

da rotação do motor. Para velocidades superiores à nominal, observa-se uma redução de conjugado do motor motivado pelo enfraquecimento do campo magnético.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (7.16)

Dimensionar a potência nominal de um motor de indução com rotor bobinado, 440 V/IV pólos, cujo eixo está acoplado a uma bomba d'água centrífuga com capacidade de 235.000 litros por hora, recalçando água de uma altura de 20 m e elevando para uma caixa d'água a uma altura de 50 m. O motor é acionado por uma chave inversora de frequência que controla, em certas horas, a quantidade de água bombeada, variando a rotação entre 100% e 60% do valor nominal. Foi realizada uma medida nos terminais do motor e registrada a presença de componentes harmônico de 3°, 5° e 9° ordens, com valores, respectivamente, iguais a 55 V, 44 V e 39 V.

- Cálculo da potência nominal do motor sem inversor de frequência

De acordo com a Equação (6.2), tem-se:

$$P_b = \frac{9,8 \times Q \times \gamma \times H}{\eta} = \frac{9,8 \times 235 \times 70}{0,82} = 196,6 = 196,6 \text{ kW} \rightarrow P_n = 200 \text{ cv}$$

$$H = 20 + 50 = 70 \text{ m}$$

$$Q = 235.000 \frac{l}{h} = 235 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\gamma = 1$$

$$\eta = 0,82 \text{ (rendimento da bomba)}$$

- Cálculo do fator de distorção harmônica devido às harmônicas de tensão

De acordo com a Equação (7.60), tem-se:

$$F_{dh} = 100 \times \frac{\sqrt{\sum_{N=2}^{\infty} V_h^2}}{V_f} = 100 \times \frac{\sqrt{55^2 + 44^2 + 39^2}}{440} = 100 \times \frac{80,5}{440} = 100 \times 0,18 = 18\%$$

- Cálculo da potência nominal do motor acionado por inversor de frequência

Através da Tabela 7.8 determina-se o fator de redução de potência do motor combinados os efeitos da rotação e dos harmônicos, cujo valor é de 0,87, relativo à velocidade de 60% da nominal que é a menor rotação de operação. Logo, a potência nominal do motor deve ser de 250 cv, ou seja:

$$P_{an} = \frac{200}{0,87} = 229,8 \text{ cv} \rightarrow P_{nn} = 250 \text{ cv}$$

7.11.2.10 Partida do motor

Deve-se verificar se o motor durante a partida pode provocar quedas de tensão superiores a 10%, conforme já estudado anteriormente. Além disso, deve-se verificar se o conjugado do motor é suficiente para vencer o conjugado da carga. O emprego da técnica de controle de velocidade, materializada na chave inversora de frequência, possibilita satisfazer estas condições desde que se mantenha constante a relação entre a tensão e a frequência, o que resulta a manutenção do torque nominal do motor e possibilita ter-se correntes de partida muito baixas, acarretando, consequentemente, quedas de tensão modestas. Não é economicamente viável a aplicação de chaves conversoras de frequência com finalidade específica de reduzir a queda de tensão durante a partida de um motor em situações normais. No entanto, utilizando-as para a finalidade de controle de velocidade podem ser ajustadas para permitir um acionamento com quedas de tensão reduzidas.

Em geral, os motores acionados por inversores partem com frequências muito baixas, chegando-se às vezes, a valores inferiores a 10 Hz.

A manutenção constante do torque implica que:

$$\frac{V_m}{F_m} = \text{constante} \quad (7.62)$$

$$\Phi = \frac{V_m}{K \times F_m \times N} \quad (7.63)$$

V_m – tensão aplicada nos terminais do motor, em valor eficaz, em V;

K – constante que vale 4,44;

F_m – frequência absorvida pelo motor, em Hz;

N – número de espiras do enrolamento.

É necessário que o valor de Φ seja constante para que o torque resultante também se mantenha constante em toda a faixa de variação da velocidade, já que é dado pela Equação (7.64),

$$C = K \times \Phi \times I_r \times \cos \psi \quad (7.64)$$

K – constante de torque;

$I_r \times \cos \psi$ – componente da corrente do rotor.

Como a potência do motor é dada pela Equação (7.65) e sendo W a velocidade angular dada na Equação (7.66), logo, reduzindo-se F_m diminui-se W , que, conseqüentemente, reduz P , já que C mantém-se constante.

$$P = C \times W \quad (7.65)$$

$$W = 2 \times \pi \times F_m \quad (7.66)$$

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (7.17)

Considerar, numa instalação industrial, uma bomba que trabalha com carga variável e é acionada frequentemente. Calcular a potência nominal do motor, sabendo-se que a bomba necessita uma potência no eixo de 148 cv quando está operando na sua vazão mínima, o que pode ocorrer a uma velocidade de 700 rpm. O motor especificado deve ser de indução com rotor em curto-circuito, IV pólos, 380 V/60 Hz, 1.800 rpm.

- Cálculo da potência nominal do motor

De acordo com a Equação (7.59), tem-se:

$$P_{\text{nom}} = 1,15 \times 148 \times \frac{1.800}{700} = 437 \text{ cv}$$

Logo, o motor adotado será de 475 cv.

- Cálculo da frequência e tensão no motor em operação em baixa velocidade

$$\frac{V_w}{W_m} = \frac{380}{1.800} = \frac{V_m}{700}$$

- Frequência a que deverá ficar submetido o motor é de:

$$F_m = \frac{4 \times W}{120} = \frac{4 \times 700}{120} = 23,3 \text{ Hz}$$

- Tensão a que deverá ficar submetido o motor é de:

$$\frac{V_m}{F_m} = \frac{380}{60} = \frac{V_m}{23,3} \rightarrow V_m = 147,7 \text{ V}$$

- Cálculo da corrente de partida com o inversor

$$K_r = \frac{147,7}{380} = 0,388$$

$$I_{\text{pm}} = K \times I_{\text{nm}} \times K_r = 7,6 \times 610,5 \times 0,388 = 1.800 \text{ A}$$

$$I_p/I_{\text{nm}} = K = 7,6 \text{ (Tabela 6.3)}$$

$$I_{\text{nm}} = 610,5 \text{ A (Tabela 6.3)}$$

- Cálculo da tensão e da frequência para a corrente de partida igual à nominal

Como o inversor de frequência permite reduzir a velocidade angular a valores bem inferiores, pode-se regular o potenciômetro a um nível tal que reduza a corrente de partida ao mesmo valor da nominal, a fim de não acarretar perturbação no sistema, ou seja:

$$K_r = \frac{1}{7,6} = 0,1315$$

$$\frac{V_m}{380} = K_r \rightarrow V_m = 380 \times 0,1315 = 49,97 \approx 50 \text{ V}$$

$$I_{pv} = 7,6 \times 0,1315 \times 610,5 = 610,13 \text{ A}$$

A frequência a que fica submetido o motor é de:

$$\frac{50}{380} = \frac{F}{1.800} \rightarrow F = 236,8 \text{ rpm}$$

$$F_s = \frac{4 \times W}{120} = \frac{4 \times 236,8}{120} = 7,89 \text{ Hz}$$

Os inversores de frequência permitem que, nas operações de frenagem dos motores a eles acoplados, seja regenerada a energia resultante, devolvendo-a à rede de suprimento.

7.11.2.11 Regime de funcionamento

Deve-se observar se o regime de funcionamento do motor permite manter a elevação de temperatura dentro dos limites normativos previstos para cada classe de isolamento.

7.11.2.12 Influência sobre os capacitores

Como os capacitores são afetados quando percorridos por correntes de frequência elevada, deve-se tomar cuidado para evitar que o motor seja submetido à sobreexcitação ou que surjam sobretensões no sistema.

7.11.2.13 Sobretensões no isolamento

A comutação efetuada em alta frequência provoca elevados picos de tensão que afetam a integridade do isolamento, notadamente entre fases e entre fase e terra. Como a taxa de crescimento da tensão em relação ao tempo (dv/dt) é muito elevada e representa a subida rápida da tensão no processo de comutação, o isolamento entre espiras também é afetado, sendo que a primeira espira é a mais solicitada e representa o ponto de rompimento da isolação.

A forma de garantir a integridade da isolação é utilizar um motor da classe de tensão de 600 V com tensão suportável de pico de pelo menos 1.000 V, ou seja:

$$V_{pico} = 1,15 \times \sqrt{2} \times V_n = 1,15 \times \sqrt{2} \times 600 \approx 976 \text{ V} \approx 1.000 \text{ V}$$

O valor 1,15 representa o fator de sobretensão. Também deve-se especificar um motor com tempo de subida da tensão (*rise time*) igual ou superior a 2 μs . Com isto, tem-se o valor máximo da derivada ($dv/dt = 1.000/2 \mu\text{s} = 500 \text{ V}/\mu\text{s}$).

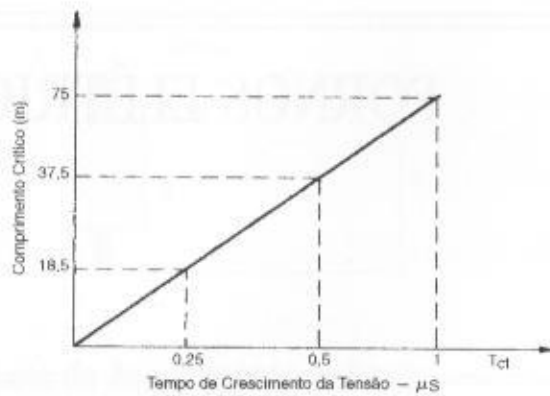
7.11.2.14 Limite do comprimento do circuito do motor

Uma onda de tensão injetada no terminal de fonte do circuito do motor e que tem uma determinada impedância característica atinge o terminal de carga onde estão ligadas as bobinas do mesmo cuja impedância característica é significativamente superior à primeira, resultando o fenômeno de reflexão e refração da onda de tensão. Em função desse fenômeno, estudado no livro *Manual de Equipamentos Elétricos*, do autor, o motor é submetido à elevação da tensão nos seus bornes.

A Equação (7.67) fornece o comprimento crítico do cabo além do qual poderão surgir fenômenos perigosos para a isolação do motor.

$$L_{cr} = \frac{V_{pv} \times T_a}{2} \quad (7.67)$$

FIGURA 7.41
Comprimento crítico do circuito
do motor



V_{po} – velocidade de propagação da onda de tensão, em geral, igual a $150 \text{ m}/\mu s$;

T_{ct} – tempo de crescimento do pulso de tensão (*rise time*).

A Figura 7.41 fornece o comprimento crítico do circuito do motor em função do tempo de crescimento da tensão.

De forma geral, o comprimento do circuito do motor não deve ser superior a 25 m.