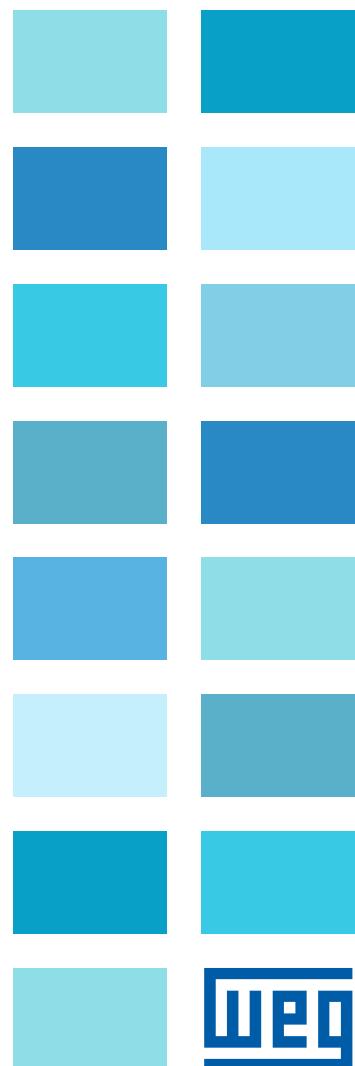


Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM

Guia Técnico



Índice

1	Introdução.....	4
2	Aspectos Normativos.....	5
2.1	NEMA MG1 - <i>Motors and generators / "Estados Unidos"</i>	5
2.2	NEMA - <i>Application Guide for AC Adjustable Speed Drive Systems</i>	5
2.3	IEC 60034 - <i>Rotating Electrical Machines / "Internacional"</i>	5
2.4	Outros documentos técnicos de referência.....	5
3	Variação de velocidade de motores de indução.....	5
4	Características dos inversores de frequência PWM.....	7
4.1	Geral.....	7
4.2	Modos de controle.....	8
5	Interação entre rede e inversor.....	8
5.1	Harmônicas.....	8
5.1.1	Considerações normativas sobre as harmônicas.....	9
5.2	Reatância de rede / indutor no link DC.....	9
6	Interação entre inversor e motor.....	10
6.1	Harmônicas que afetam o desempenho do motor.....	10
6.1.1	Considerações normativas sobre as harmônicas na saída do inversor.....	10
6.2	Considerações em relação ao rendimento.....	11
6.2.1	A Influência da variação de velocidade no rendimento do motor.....	12
6.2.2	Considerações normativas sobre o rendimento de motores alimentados por inversores de frequência.....	12
6.3	Influência do inversor na elevação de temperatura do motor.....	13
6.4	Critérios, quanto a elevação de temperatura, para motores WEG alimentados por inversores de frequência.....	13
6.4.1	Redução do torque (<i>Derating Torque</i>).....	13
6.4.2	Torque de Partida.....	14
6.4.3	Torque Máximo.....	15
6.5	Influência do inversor no sistema isolante do motor.....	15
6.5.1	<i>Rise Time</i>	15
6.5.2	Comprimento do cabo.....	16
6.5.3	Mínimo tempo entre pulsos consecutivos.....	17
6.5.4	Frequência de chaveamento.....	18
6.5.5	Aplicações com múltiplos motores.....	18
6.6	Critérios de isolamento para motores WEG alimentados por inversor de frequência.....	18
6.7	Considerações normativas sobre o isolamento de motores acionados por inversores de frequência.....	18
6.8	Recomendações para os cabos de conexão entre motor e inversor WEG.....	19
6.8.1	Tipos de cabos e orientações de instalação.....	20
6.9	Influência do inversor na corrente que circula pelos mancais do motor (tensão induzida no eixo).....	20
6.9.1	Tensões modo comum.....	21
6.9.2	Círculo equivalente do motor para as correntes capacitivas de alta frequência.....	21
6.9.3	Métodos para evitar ou minimizar a circulação de corrente elétrica pelos mancais do motor alimentado por inversor.....	22
6.10	Critérios, quanto a corrente pelos mancais (tensão no eixo), para motores de indução WEG alimentados por inversores.....	23
6.11	Considerações normativas sobre as correntes que circulam pelos mancais dos motores acionados por inversores.....	23

6.12	Influência do inversor no ruído acústico emitido pelo motor.....	23
6.13	Critérios de ruído para motores WEG acionados por inversores.....	24
6.14	Considerações normativas sobre o ruído de motores acionados por inversores.....	24
6.15	Influência do inversor na vibração mecânica do motor.....	24
6.16	Critérios de vibração para motores WEG acionados por inversores.....	24
6.17	Considerações normativas sobre vibração, para motores acionados por inversores.....	24
7	Interação entre e motor e carga acionada.....	25
7.1	Tipos de carga.....	25
7.1.1	Cargas de torque variável.....	25
7.1.2	Cargas de torque constante.....	25
7.1.3	Cargas de potência constante.....	26
7.2	Regimes de operação.....	26
7.2.1	Regime de velocidade variável.....	26
7.2.2	Regime de velocidade constante.....	26
8	Dimensionamento e análise de acionamentos elétricos com velocidade variável – Exemplos práticos.....	26
8.1	Aplicação com compressor (torque constante).....	26
8.1.1	Exemplo.....	26
8.1.2	Resolução.....	26
8.2	Aplicação com bomba centrífuga - torque quadrático.....	27
8.2.1	Exemplo.....	27
8.2.2	Resolução.....	27
8.3	Aplicação especial – cabo longo.....	29
8.3.1	Exemplo.....	29
8.3.2	Resolução.....	29
8.4	Aplicação para indústria têxtil (torque variável / velocidade variável).....	30
8.4.1	Exemplo.....	30
8.4.2	Resolução.....	31
8.5	Exemplo considerando a utilização da Solução Fluxo Ótimo WEG.....	32
8.5.1	Exemplo.....	32
8.5.2	Resolução.....	32
9	Recomendações para a realização de medições de formas de onda do tipo PWM.....	32
9.1	Advertência.....	32
9.2	Instrumentação.....	32
9.3	Medição de parâmetros.....	33
9.4	Considerações em relação ao aterramento.....	33
9.4.1	Aterramento do inversor.....	33
9.4.2	Aterramento do motor.....	33
9.5	Procedimentos de medição.....	33
9.5.1	Visualização da forma de onda.....	33
9.5.2	Ajuste do fundo de escala do osciloscópio.....	33
9.5.3	Trigger.....	34
10	Conclusão.....	34
11	Bibliografia.....	35

1 Introdução



O acionamento de motores elétricos de indução por inversores estáticos de frequência (comercialmente denominados também simplesmente inversores de frequência) é uma solução relativamente nova, porém, já amplamente utilizada na indústria. Assim sendo, muito ainda há por ser feito/estudado/compreendido em tais aplicações e percebe-se, com o avanço na área, a necessidade de provisão de orientação técnica específica concernente ao assunto por parte dos fabricantes de motores e inversores, para que tais aplicações sejam efetivamente vantajosas em termos de eficiência energética e atrativas em termos de custo.

Este guia técnico foi elaborado visando o esclarecimento dos principais aspectos relacionados com as aplicações de motores de indução de baixa tensão (até 690 V e até carcaças IEC 355 / NEMA 587) com inversores eletrônicos de frequência, de maneira didática e concisa.

Inicialmente são citadas as principais normas internacionais que abordam o assunto (não existe ainda uma norma brasileira que oriente o uso de inversores eletrônicos para acionamento de máquinas CA).

A seguir são apresentados os fundamentos teóricos da variação de velocidade de motores de indução através dos inversores estáticos indiretos e as características essenciais desses inversores.



Uma vez conhecidas as bases dos acionamentos eletrônicos de velocidade variável, é analisado o comportamento do sistema de potência como um todo, por meio da compreensão das interações entre as várias partes que o compõem (rede – inverSOR – motor – carga), decorrentes da variação eletrônica da velocidade do motor de indução.

Finalmente, exemplos de dimensionamentos são apresentados, para uma melhor compreensão das questões expostas.

Ao longo do documento, buscando sempre a elucidação técnica mais completa, são enfatizadas e discutidas questões polêmicas, com a exposição de divergências existentes entre os diferentes organismos internacionais de normalização, bem como a posição da WEG diante de tais situações.

2 Aspectos normativos

2.1 NEMA MG1 - Motors and generators / “Estados Unidos”

- **Parte 30** - Application considerations for constant speed motors used on a sinusoidal bus with harmonic content and general purpose motors used with adjustable-frequency controls or both (2006)
- **Parte 31** - Definite-purpose inverter-fed polyphase motor (2006)

2.2 NEMA - Application Guide for AC Adjustable Speed Drive Systems (2001)

2.3 IEC 60034 - Rotating Electrical Machines / “Internacional”

- **Parte 17** - Cage induction motors when fed from converters – application guide (2006)
- **Parte 25** - Guide for the design and performance of cage induction motors specifically designed for converter supply (2007)

2.4 Outros documentos técnicos de referência

- GAMBICA/REMA Technical Guides for Variable Speed Drives and Motors
- GAMBICA/REMA Technical Reports for Variable Speed Drives and Motors
- CSA C22.2 No.100-2004 Item 12 (Canadá) “Motors and Generators – Industrial Products”
- JEM-TR 148-1986 (Japão)
“Application guide for inverter drive (general-purpose inverter)”
- IEC 60034-18-41 – Qualification and design tests for Type I electrical insulation systems used in rotating electrical machines fed from voltage converters
- Artigos técnicos e livros relacionados com o assunto

3 Variação de velocidade de motores de indução

A relação entre a rotação, a frequência de alimentação, o número de polos e o escorregamento de um motor de indução obedece à seguinte equação:

$$n = \frac{120 f_1 (1-s)}{p}$$

onde:

n : velocidade de rotação mecânica (rpm);

f_1 : frequência fundamental da tensão de alimentação (Hz);

p : número de polos;

s : escorregamento.

A análise da fórmula mostra que se pode atuar em três parâmetros, no intuito de variar a velocidade de um motor desse tipo, conforme mostra a tabela abaixo. A tabela apresenta também as características de cada opção.

Variação de velocidade	
Parâmetro de variação de velocidade	Característica de aplicação
Número de polos	Variação discreta Sobredimensionamento da carcaça
Escorregamento	Variação contínua Perdas rotóricas Faixa de variação pequena
Frequência da tensão estatótica	Variação contínua Uso de INVERSORES DE FREQUÊNCIA!



A utilização de inversores estáticos de frequência atualmente comprehende o método mais eficiente para controlar a velocidade dos motores de indução. Os inversores transformam a tensão da rede, de amplitude e frequência constantes, em uma tensão de amplitude e frequência variáveis. Variando-se a frequência da tensão de alimentação, varia-se também a velocidade do campo girante e consequentemente a velocidade mecânica de rotação da máquina.

O torque desenvolvido pelo motor de indução segue a equação:

$$T = k_1 \cdot f_m \cdot I_2$$

E o seu fluxo magnetizante, desprezando-se a queda de tensão ocasionada pela resistência e pela reatância dos enrolamentos estatóricos, vale:

$$f_m = k_2 \cdot \frac{V_1}{f_1}$$

onde:

T : torque ou conjugado disponível na ponta de eixo (N.m)

f_m : fluxo de magnetização (Wb)

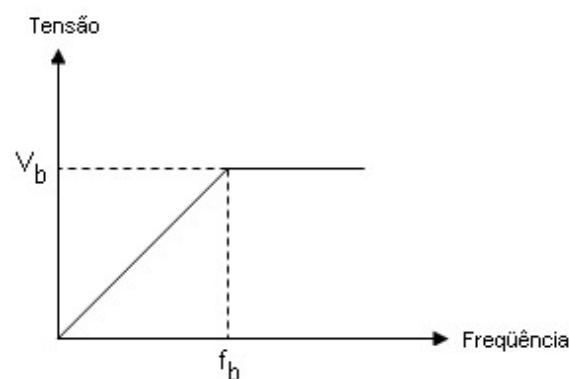
I_2 : corrente rotórica (A) à depende da carga!

V_1 : tensão estatórica (V)

k_1 e k_2 : constantes à dependem do material e do projeto da máquina!

Admitindo-se, que a corrente depende da carga e que essa é constante (portanto, corrente praticamente constante), percebe-se, que variando proporcionalmente a amplitude e a frequência da tensão de alimentação, o fluxo e, consequentemente, o torque permanecem constantes. O motor fornece assim um ajuste contínuo de velocidade e conjugado com relação à carga mecânica. As perdas podem ser minimizadas de acordo com as condições de carga, mantendo-se constante o escorregamento da máquina em qualquer velocidade, para a mesma carga.

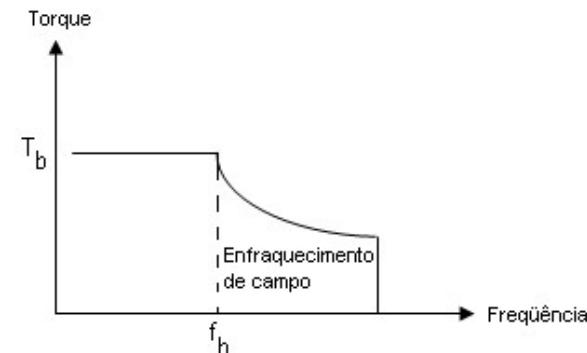
A partir das equações acima, obtém-se os gráficos abaixo.



A variação da relação V_1/f_1 é feita linearmente até a freqüência base (nominal) do motor. Acima dessa, a tensão é máxima (igual à nominal) e permanece constante, havendo então apenas a variação da freqüência aplicada ao enrolamento estatórico do motor, conforme representado na

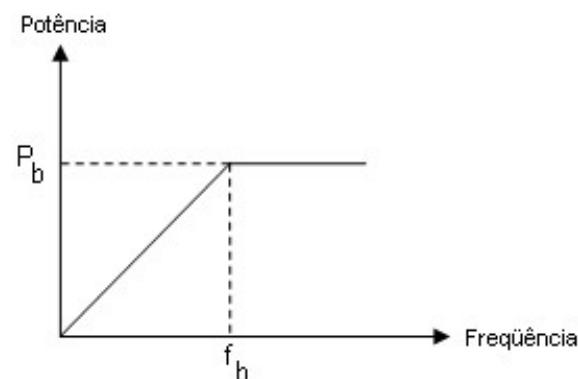
figura anterior.

Assim, acima da freqüência base caracteriza-se a chamada região de enfraquecimento de campo, pois ali o fluxo decresce com o aumento da freqüência, provocando também a diminuição de torque. A curva característica torque x velocidade do motor acionado por inversor de freqüência está representada a seguir.



Nota-se, portanto, que o torque permanece constante até a freqüência base e decresce gradativamente acima desta.

Como Potência = Torque X Rotação, a potência útil do motor cresce linearmente até a freqüência base e permanece constante acima desta, conforme pode ser observado abaixo.



Não por acaso tem crescido significativamente o número de aplicações em que a variação de velocidade de motores de indução é feita por meio de inversores eletrônicos estáticos de freqüência, haja vista os muitos benefícios propiciados por essas aplicações:

- Controle a distância – nos sistemas eletrônicos de variação de velocidade, o equipamento de controle pode situar-se em uma área conveniente, ficando apenas o motor acionado na área de processamento - ao contrário dos sistemas hidráulicos e mecânicos de variação de velocidade.
- Redução de custos – partidas diretas ocasionam picos de corrente, que causam danos não apenas ao motor, mas também a outros equipamentos ligados ao sistema elétrico. Inversores estáticos proporcionam partidas mais suaves, reduzindo custos com manutenção.
- Aumento de produtividade – sistemas de processamento industrial geralmente são sobre dimensionados na



perspectiva de um aumento futuro de produtividade. Inversores estáticos possibilitam o ajuste da velocidade operacional mais adequada ao processo, de acordo com os equipamentos disponíveis e a necessidade de produção a cada momento.

- Eficiência energética – o rendimento global do sistema de potência depende não apenas do motor, mas também do controle. Os inversores estáticos de frequência apresentam rendimento elevado, da ordem de 97% ou mais. Motores elétricos também apresentam alto rendimento, chegando a 95% ou mais em máquinas maiores operando sob condições nominais. Na variação eletrônica de velocidade a potência fornecida pelo motor varia de maneira otimizada, influenciando diretamente a potência consumida e conduzindo a elevados índices de rendimento do sistema (motor + inversor).
- Versatilidade – inversores estáticos de frequência são adequados para aplicações com qualquer tipo de carga. Com cargas de torque variável (pequena demanda de torque

em baixas rotações), o controle reduz a tensão do motor compensando a queda de rendimento que normalmente resultaria da diminuição de carga. Com cargas de torque (ou potência) constante a melhoria de rendimento do sistema provém da capacidade de variar continuamente a velocidade, sem necessidade de utilizar múltiplos motores ou sistemas mecânicos de variação de velocidade (como polias e engrenagens), que introduzem perdas adicionais.

- Maior qualidade – o controle preciso de velocidade obtido com inversores resulta na otimização dos processos. O controle otimizado do processo proporciona um produto final de melhor qualidade.

4 Características dos inversores de frequência PWM

4.1 Geral

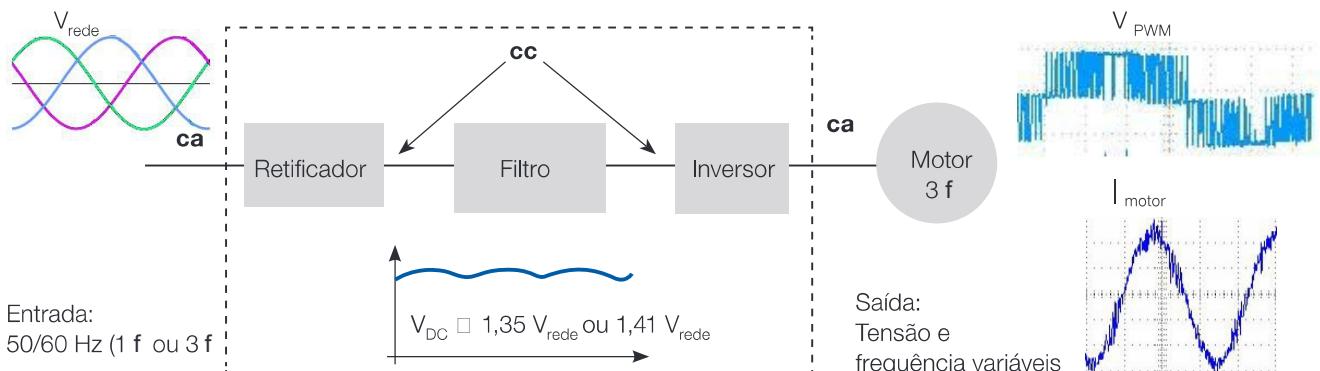
Inversores estáticos indiretos de frequência com tensão imposta PWM são atualmente os equipamentos mais empregados para a alimentação de motores de baixa tensão nas aplicações industriais que requerem variação de velocidade. Eles operam como uma interface entre a fonte de energia (rede) e o motor de indução.

O processo de obtenção da tensão e frequência desejadas por meio de tais equipamentos passa por três estágios:

- **Ponte de diodos** - Retificação do sinal alternado - de tensão e frequência constantes - proveniente da rede de alimentação;

- **Filtro ou Link DC** - Alisamento/regulação da tensão retificada com armazenamento de energia por meio de um banco de capacitores;
- **Transistores IGBT** - Inversão da tensão contínua proveniente do link DC num sinal alternado, com tensão e frequência variáveis.

O diagrama a seguir ilustra as etapas descritas acima.



Observações:

- Quando o motor está em vazio ou com cargas leves, a tensão no link DC tende a estabilizar no valor igual a $\sqrt{2} V_{\text{rede}} @ 1,41 V_{\text{rede}}$. Quando, porém, o motor está com cargas mais elevadas (por exemplo, plena carga), a tensão no link DC tende ao valor $(3/P) \sqrt{2} V_{\text{rede}} @ 1,35 V_{\text{rede}}$
- Os critérios definidos para os sistemas de isolamento dos motores WEG alimentados por inversores, apresentados adiante, consideram o valor V_f por ser o mais elevado e, portanto, o mais crítico para o motor. Assim, os critérios WEG atendem a ambas as situações.

4.2 Modos de controle

Basicamente existem dois tipos de controle dos inversores eletrônicos: o escalar e o vetorial.

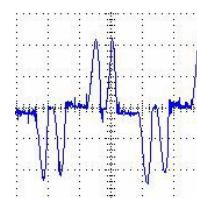
O controle escalar baseia-se no conceito original do inversor de frequência: impõe no motor uma determinada tensão/frequência, visando manter a relação V/f constante, ou seja, o motor trabalha com fluxo aproximadamente constante. É aplicado quando não há necessidade de respostas rápidas a comandos de torque e velocidade e é particularmente interessante quando há conexão de múltiplos motores a um único inversor. O controle é realizado em malha aberta e a precisão da velocidade é função do escorregamento do motor, que varia em função da carga, já que a frequência no estator é imposta. Para melhorar o desempenho do motor nas baixas velocidades, alguns inversores possuem funções especiais como a compensação de escorregamento (que atenua a variação da velocidade em função da carga) e o boost de tensão (aumento da relação V/f para compensar o efeito da queda de tensão na resistência estatórica), de maneira que a

capacidade de torque do motor seja mantida. O controle escalar é o mais utilizado devido à sua simplicidade e devido ao fato de que a grande maioria das aplicações não requer alta precisão e/ou rapidez no controle da velocidade.

O controle vetorial possibilita atingir um elevado grau de precisão e rapidez no controle do torque e da velocidade do motor. O controle decompõe a corrente do motor em dois vetores: um que produz o fluxo magnetizante e outro que produz torque, regulando separadamente o torque e o fluxo. O controle vetorial pode ser realizado em malha aberta ("sensorless") ou em malha fechada (com realimentação).

- Com sensor de velocidade – requer a instalação de um sensor de velocidade (por exemplo, um encoder incremental) no motor. Este tipo de controle permite a maior precisão possível no controle da velocidade e do torque, inclusive em rotação zero.
- Sensorless – mais simples que o controle com sensor, porém, apresenta limitações de torque principalmente em baixíssimas rotações. Em velocidades maiores é praticamente tão bom quanto o controle vetorial com realimentação.

As principais diferenças entre os dois tipos de controle são que o controle escalar só considera as amplitudes das grandezas elétricas instantâneas (fluxos, correntes e tensões), referindo-as ao estator, e seu equacionamento baseia-se no circuito equivalente do motor, ou seja, são equações de regime permanente. Já o controle vetorial admite a representação das grandezas elétricas instantâneas por vetores, baseando-se nas equações espaciais dinâmicas da máquina, com as grandezas referidas ao fluxo enlaçado pelo rotor, ou seja, o motor de indução é visto pelo controle vetorial como um motor de corrente contínua, havendo regulação independente para torque e fluxo.



O parâmetro que mostra o quanto as harmônicas distorcem a rede é o THD (Distorção Harmônica Total), fornecido pelo fabricante do inversor e definido como:

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{A_h}{A_1} \right)^2}$$

onde:

A_h são os valores eficazes das componentes harmônicas
 A_1 é o valor eficaz da componente fundamental

A forma de onda acima é a corrente medida na entrada de um inversor PWM de 6 pulsos, para uma rede de baixa impedância.

5.1.1 Considerações normativas sobre as harmônicas

O NEMA Application Guide for AC ASD Systems faz referência à IEEE Std.519 (1992), que recomenda limites de THD para sistemas com tensão £ 69 kV conforme apresentados nas tabelas que seguem. Essa norma define valores para instalação final, sendo necessária a análise de cada caso. Dados como impedância de curto circuito da rede, pontos de conexão comum (PCC) do inversor e outras cargas, dentre outros, influem nos valores recomendados.

Harmônicas de tensão	
Todas pares	3,0%
Todas ímpares	3,0%
THD _{tensão}	5,0%

A máxima distorção em corrente recomendada pela IEEE-519 é dada em termos do TDD (Distorção Total de Demanda) e depende da relação (I_{SC} / I_L), onde I_{SC} é a máxima corrente de curto circuito no PCC e I_L é a máxima corrente de demanda da instalação (componente de frequência fundamental) no PCC.

Harmônicas de corrente ímpares (As correntes harmônicas pares estão limitadas em 25% das ímpares)						
Máxima distorção harmônica de corrente (percentualmente em relação a IL)						
ISC / IL	< 11	11 ≤ h ≤ 17	17 ≤ h ≤ 23	23 ≤ h ≤ 35	35 ≤ h ≤ 50	TDD
< 20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

* Todo equipamento de geração de potência está limitado a estes valores de distorção de corrente, independentemente do valor real da relação I_{SC} / I_L .

Os documentos IEC citados, por outro lado, não abordam este aspecto.

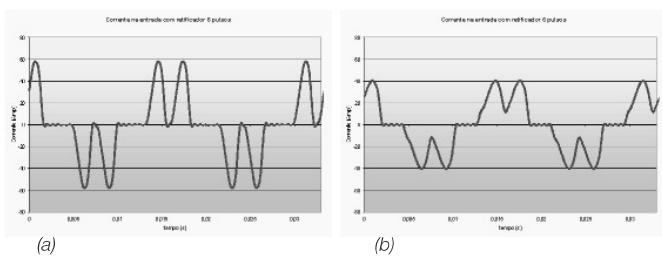
5.2 Reatância de rede / indutor no link DC

As correntes harmônicas, que circulam pelas impedâncias da rede de alimentação e dependem dos valores das impedâncias presentes no circuito de entrada/saída do retificador, provocam quedas de tensão harmônicas, distorcendo a tensão de alimentação do próprio inversor ou de outros equipamentos ligados à rede. Essas distorções harmônicas de corrente e tensão podem ocasionar um baixo fator de potência, além de aumentar as perdas elétricas nas instalações com sobreaquecimento de componentes tais como cabos, transformadores, motores, bancos de capacitores, etc.

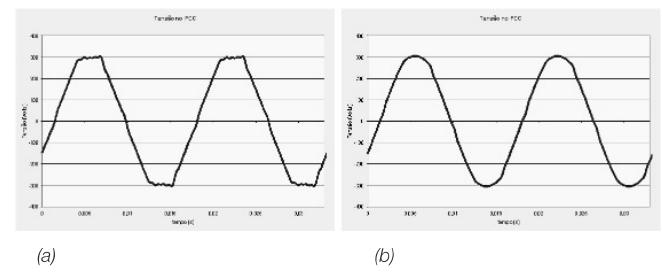
Para reduzir o conteúdo harmônico da corrente e aumentar o

fator de potência pode ser instalada uma indutância na entrada e/ou no link DC do inversor. O indutor no link DC tem a vantagem de não introduzir queda de tensão, porém, dependendo da combinação do seu valor com os valores de impedância da rede e capacitação do link DC, pode resultar em ressonâncias indesejadas com o sistema. A reatância de rede, por outro lado, diminui a tensão média do circuito intermediário (comparada àquela obtida sem reatância), mas é mais eficaz na redução de eventuais transientes de sobretensão da rede, além de reduzir a corrente eficaz nos diodos do retificador e o ripple de corrente nos capacitores do circuito intermediário, aumentando a vida útil dos semicondutores e do banco de capacitores constituintes do link DC.

Corrente na entrada do conversor



Tensão na entrada do conversor



Formas de onda de tensão e corrente na entrada do inversor sem (a) e com (b) reatância de rede. Percebe-se, que a reatância de rede suaviza os picos (reduz, portanto, o conteúdo harmônico) e diminui o valor eficaz da corrente na entrada, acarretando também diminuição da distorção da tensão na entrada do inversor.

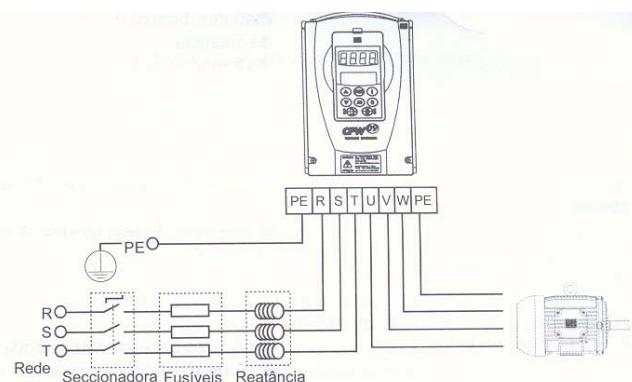
Para evitar danos ao inversor deve-se ter uma impedância mínima de rede que proporcione uma queda de tensão percentual de 1 a 2%, dependendo do tamanho do inversor de frequência, para a corrente nominal do inversor.

Como critério de uso considera-se que uma reatância de rede que apresenta uma queda de tensão percentual de 2 a 4% (para a corrente nominal do inversor de frequência) resulta num bom compromisso entre a queda de tensão no motor, a melhoria do fator de potência e a redução da distorção harmônica da corrente.

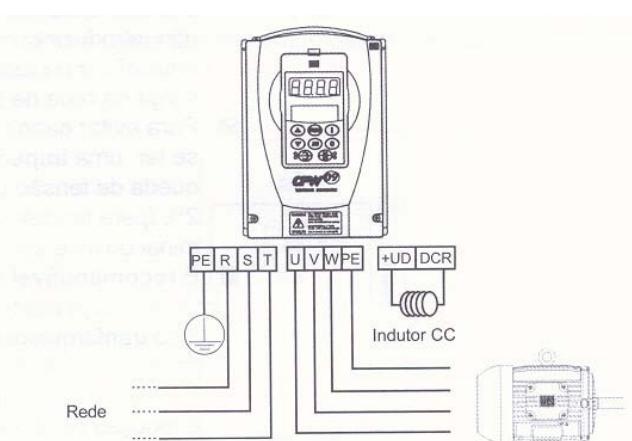
O valor da reatância de rede necessária para que se obtenha a queda de tensão percentual desejada pode ser calculado da seguinte forma:

$$L = \frac{(\text{queda de tensão})\%, V_{rede}}{\sqrt{3.2.p.f_{rede} I_{nominal}}} [H]$$

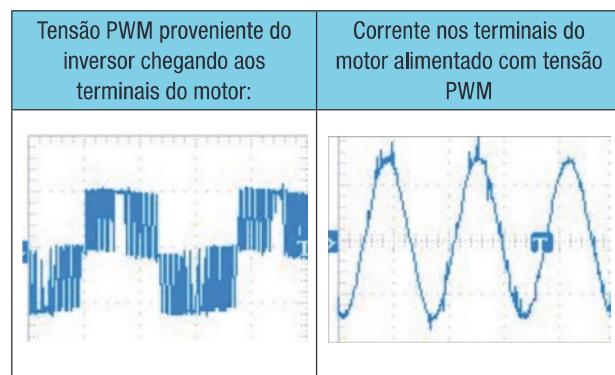
A seguir estão ilustradas as conexões de potência (a) com reatância de rede e (b) com indutor no link DC.



(a) Conexões de potência com reatância de rede na entrada



(b) Conexões de potência com indutor no link DC



Percebe-se, que o motor “enxerga” uma tensão pulsada (PWM) e uma corrente praticamente senoidal, portanto, as harmônicas de maior amplitude no motor são de tensão.

Basicamente, para reduzir as harmônicas geradas por um inversor de frequência PWM, existem as seguintes soluções:

Método de redução das harmônicas	Características da solução
Instalação de filtros passivos de saída (L, LC (senoidal), dV/dt)	Aumento do custo da instalação
	Restrições para operação nos modos vetoriais
	Queda de tensão (redução da potência do motor)
Utilização de inversor com mais níveis	Aumento de custos
	Redução de confiabilidade do inversor
	Aumento da complexidade do controle
Melhoria na qualidade da modulação PWM (aprimoramento do padrão de pulsos)	Space Vector Modulation (SVM)*
	Não aumenta custos
	Melhoria no controle de tensão
Aumento da frequência de chaveamento	Maior rendimento do conjunto (motor + inversor)
	Redução do rendimento do inversor (aumento das perdas por chaveamento)
	Aumento das correntes de fuga para a terra

* Todos os inversores de frequência fabricados pela WEG empregam a modulação SVM.

6 Interação entre inversor e motor

6.1 Harmônicas que afetam o desempenho do motor

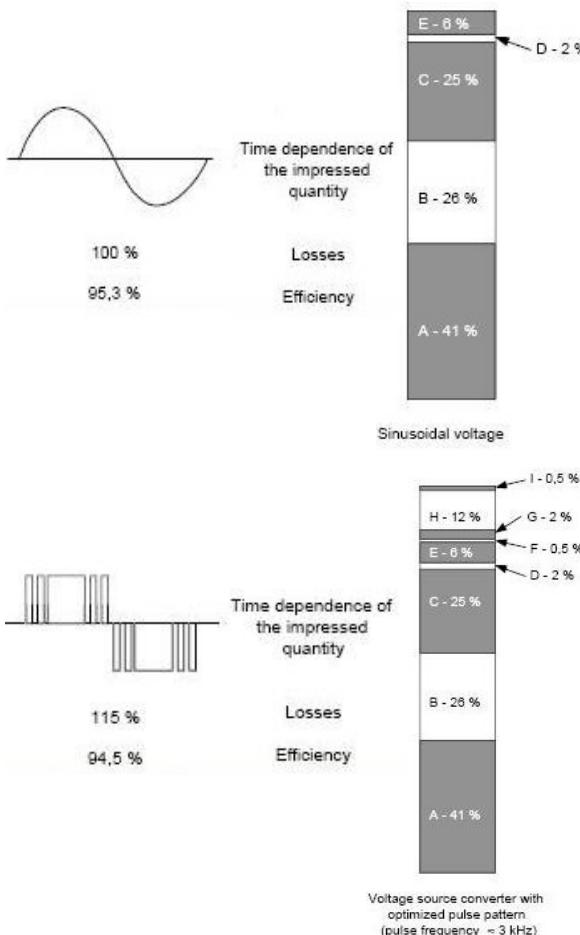
O motor de indução submetido a uma tensão PWM, proveniente de um inversor de frequência, estará sujeito a tensões harmônicas (componentes de frequência acima da frequência fundamental). Dependendo da modulação PWM empregada, da frequência de chaveamento e de outras particularidades do controle, o motor poderá apresentar aumento de perdas e temperatura, aumento dos níveis de vibração e ruído e perda de rendimento.

Além disso, podem aparecer outros efeitos quando da alimentação do motor por inversores, como “stress” do sistema de isolamento e correntes pelos mancais, que, embora relevantes, não se devem especificamente às harmônicas, mas a outros fatores que serão abordados a seguir. As figuras abaixo ilustram as formas de onda de tensão e corrente nos terminais do motor, quando sob alimentação PWM.

6.1.1 Considerações normativas sobre as harmônicas na saída do inversor

Não existe normalização quanto aos valores limites de distorção harmônica de tensão e corrente. No entanto, as normas consideram o aumento das perdas do motor devido ao uso de inversor.

A IEC 60034-17 exemplifica o aumento das perdas do motor devido ao uso de inversor com o caso prático de um motor carcaça 315, com valores nominais de torque e velocidade:



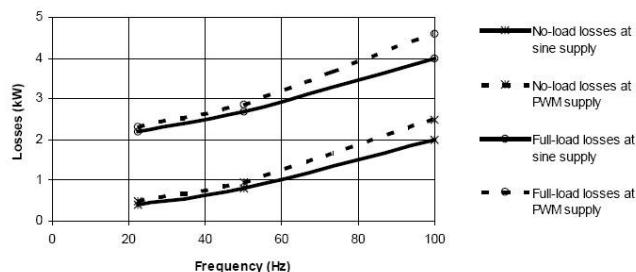
Perdas causadas pela frequência fundamental

- A - perdas Joule no estator
- B - perdas Joule no rotor
- C - perdas no ferro
- D - perdas suplementares
- E - perdas por atrito

Perdas causadas pelas harmônicas

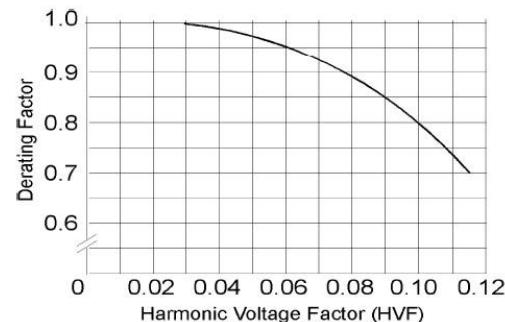
- F - perdas Joule no estator
- G - perdas Joule no rotor
- H - perdas no ferro
- I - perdas suplementares
- J - perdas de comutação

A IEC 60034-25 ilustra o aumento das perdas do motor devido à alimentação PWM com a figura abaixo:



A NEMA MG1 – Parte 30 considera uma redução percentual de torque para evitar o sobreaquecimento excessivo de um motor normal alimentado por inversor, que estará sujeito a

correntes harmônicas decorrentes do conteúdo harmônico da tensão PWM:



$$HVF = \sqrt{\frac{V_n}{n} \sum_{n=5}^{\infty} \left(\frac{V_n}{n} \right)^2}$$

Onde:

n: ordem da harmônica ímpar, não incluindo as divisíveis por 3
 V_n : amplitude da n-ésima harmônica de tensão (por unidade)

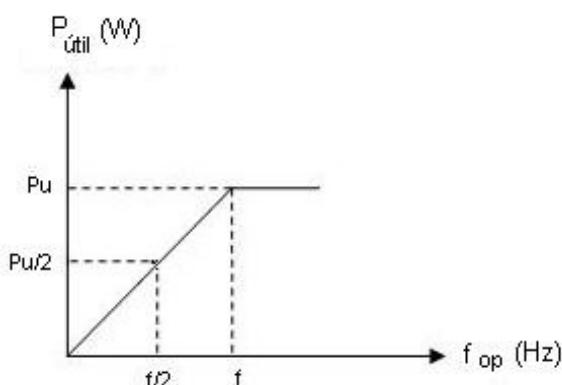
6.2 Considerações em relação ao rendimento

A falta de uma norma que especifique o procedimento de ensaio para avaliação do rendimento do sistema (inversor + motor) permite que o ensaio seja realizado de diferentes maneiras. Portanto, os resultados obtidos não devem influenciar na aceitação ou não do motor, exceto mediante acordo entre fabricante e comprador. A experiência adquirida até o momento, contudo, permite que se valha das seguintes considerações:

- O motor de indução, quando alimentado por um inversor de frequência PWM, tem seu rendimento diminuído, em relação a um motor alimentado por tensão puramente senoidal, devido ao aumento nas perdas ocasionado pelas harmônicas;
- Em aplicações de motores de indução de gaiola com inversores de frequência, porém, deve ser avaliado o rendimento do sistema (conjunto inversor + motor) e não apenas do motor;
- Cada caso deve ser analisado. Devem ser consideradas as características do inversor e do motor, tais como: frequência de operação, frequência de chaveamento, condição de carga e potência do motor, taxa de distorção harmônica do inversor;
- A instrumentação utilizada nas medições é de extrema importância. Devem ser utilizados instrumentos que meçam o valor eficaz verdadeiro (true RMS) das grandezas elétricas, de modo que seja possível a leitura dos valores corretos de potência absorvida na entrada e na saída do inversor;
- O aumento da frequência de chaveamento diminui o rendimento do inversor e aumenta o rendimento do motor.
- Motores de alto rendimento alimentados por inversores de frequência mantêm seu rendimento superior, em comparação com motores Standard alimentados por inversores.

6.2.1 A Influência da variação de velocidade no rendimento do motor

O efeito da variação de velocidade sobre o rendimento do motor pode ser entendido a partir da análise do gráfico da potência útil do motor alimentado por inversor em função da sua frequência de operação, já apresentado.



Se a frequência base é 60 Hz, por exemplo, tem-se para as situações acima:

$$P_{60\text{Hz}} = P_u$$

$$P_{30\text{Hz}} = \frac{P_u}{\frac{60}{30}} = 0,5 P_u$$

Considerando que as perdas do motor sejam compostas fundamentalmente por perdas Joule (P_j) e perdas no ferro (P_{fe}) e assumindo que as perdas Joule compreendam a maior componente de perdas, então o rendimento do motor deve cair nas baixas freqüências, nas quais a potência útil do motor é diminuída e, embora as perdas no ferro (dependem da frequência) diminuam um pouco, as perdas Joule (dependem da corrente ao quadrado) praticamente se mantêm para uma carga de torque constante, de modo a não haver significativa variação global das perdas.

As equações a seguir explicam isso. Definindo-se rendimento como:

$$\eta \% = \frac{P_u}{P_{\text{abs}}} = \frac{P_u}{P_u + \text{Perdas}}$$

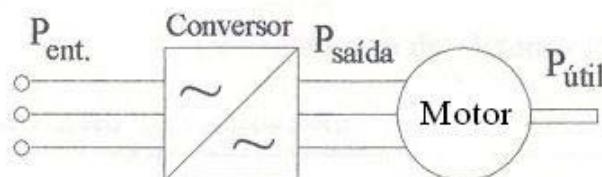
e, pelas considerações acima,

$$\text{à Perdas} @ P_{fe} + P_i \quad (P_i > P_{fe})$$

a seguinte situação decorre da redução de velocidade:

$$- P_{fe} + P_i @ \text{cte} (P_f > P_{fe}) \quad P_f \text{ à Perdas} @ \text{cte} \quad \left. \begin{array}{l} - h \% \\ - P_u \end{array} \right\}$$

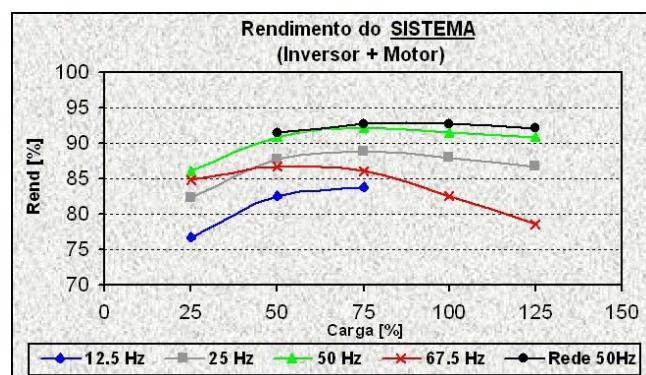
6.2.1.1 Exemplo numérico:



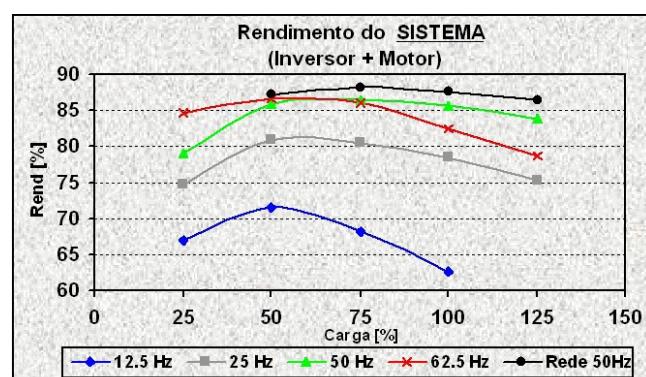
$$\left. \begin{array}{l} \square_{\text{conv}} = P_{\text{saída}} / P_{\text{ent.}} \\ \square_{\text{conv}} = P_{\text{util}} / P_{\text{saída}} \end{array} \right\} \square_{\text{sist.}} = P_{\text{util}} / P_{\text{abs}} = P_{\text{util}} / P_{\text{ent.}} = \square_{\text{conv}} \cdot \square_{\text{mot}}$$

Alguns exemplos de valores experimentais obtidos pelo método direto (medição de potência na entrada e na saída) com motores normais:

Motor 75 cv (55 kW) – 6 polos – 400 V – 50 Hz



Motor 15 cv (11 kW) – 4 polos – 400 V – 50 Hz



6.2.2 Considerações normativas sobre o rendimento de motores alimentados por inversores de frequência

NEMA MG1 Part 30 – O rendimento do motor cairá, quando operado em um controle. Os harmônicos presentes elevarão as perdas elétricas, que reduzirão o rendimento e acarretarão aumento também da temperatura do motor, reduzindo ainda mais o rendimento do motor.

- ⑨ NEMA MG1 Part 31 - Testes de desempenho, quando solicitados, deverão ser realizados com tensão senoidal. No entanto, o motor alimentado por inversor de frequência poderá ser ensaiado, desde que exista um acordo mútuo entre fabricante e usuário.
- ⑨ NEMA Application Guide for AC ASD Systems – O rendimento global do sistema baseia-se nas perdas totais do motor, do controle e de qualquer equipamento auxiliar. O uso de inversores freqüentemente aumenta o rendimento do sistema, se comparado com os métodos tradicionais de variação de velocidade (como engrenagens e correias) e de ajuste de carga (como válvulas e amortecedores).
- ⑨ IEC 60034-17 – As características de desempenho das aplicações com motores de indução alimentados por inversores de frequência são influenciadas por todo o sistema, compreendendo a fonte de alimentação, o inversor, o motor, a carga mecânica e o equipamento de controle. Devido à complexidade das interações técnicas entre o sistema e as várias condições de operação, está fora do escopo da especificação técnica a quantificação de valores numéricos relacionados com tais aplicações. Não existe método simples para calcular as perdas adicionais e não pode ser feita qualquer afirmação genérica sobre o seu valor.
- ⑨ IEC 60034-25 – Os métodos recomendados para a determinação do rendimento do motor estão dados na IEC 60034-2 (método de separação de perdas para motores > 150 kW e medição de entrada-saída para motores ≤ 150 kW). As perdas em vazio (incluindo as perdas suplementares) devem ser medidas se possível com o mesmo método de modulação e frequência de chaveamento que o inversor produzirá com plena carga. A determinação do rendimento global do sistema (motor + inversor) por medição entrada-saída é também aplicável, sob acordo entre fabricante e usuário. Nesse caso, o rendimento do motor não poderá ser determinado separadamente.

6.3 Influência do inversor na elevação de temperatura do motor

Motores de indução podem apresentar uma elevação de temperatura maior quando alimentados por inversores do que quando alimentados com tensão senoidal. Essa sobrelevação de temperatura é decorrente do aumento das perdas do motor, em função das componentes de alta frequência do sinal PWM, aliada à freqüentemente reduzida transferência de calor decorrente da variação de velocidade.

As distorções harmônicas da forma de onda de tensão do motor alimentado por inversor contribuem para o incremento das perdas, uma vez que criam no aço magnético laços menores de histerese, aumentando a saturação efetiva do núcleo, além de gerarem correntes harmônicas de alta frequência, que acarretam aumento das perdas Joule nos condutores. No entanto, essas componentes de alta frequência não contribuem para a produção de torque do motor em regime, uma vez que não aumentam o fluxo fundamental no entreferro, que gira à velocidade síncrona. **A operação do motor em baixas**

rotações provoca redução na ventilação e consequente perda de resfriamento (em motores autoventilados), acarretando também a elevação de temperatura de estabilização térmica.

Portanto, quando da operação com inversores, a influência conjunta de ambos os fatores citados acima deve ser considerada. Basicamente existem as seguintes soluções para evitar o sobreaquecimento do motor:

- ⑨ Redução do torque nominal (sobredimensionamento do motor);
- ⑨ Utilização de sistema de ventilação independente;
- ⑨ Utilização do “fluxo ótimo” (solução exclusiva WEG).

6.4 Critérios, quanto a elevação de temperatura, para motores WEG alimentados por inversores de frequência

O efeito da variação de velocidade sobre o rendimento do motor pode ser entendido a partir da análise do gráfico da potência útil do motor alimentado por inversor em função da sua frequência de operação, já apresentado.

6.4.1 Redução do torque (Derating Torque)

Para manter a temperatura dos motores de indução WEG dentro de níveis aceitáveis, quando alimentados por inversor de frequência, devem ser obedecidos os limites de carga apresentados nos critérios que seguem (observar a **linha do motor e a condição de fluxo magnético**).

NOTA: Motores para áreas classificadas devem ser avaliados caso a caso e a WEG deve ser consultada.

6.4.1.1 Para motores do mercado NEMA

MOTORES TEFC W21 E W22 ("High Efficiency")					
Tamanho de carcaça	Torque Constante	Torque Variável	Potência Constante	Inversor	Condição de fluxo
143 – 587(***)	12:1	1000:1	60 – 120 Hz	Qualquer	Fluxo constante
	100:1(*)	-	60 – 120 Hz	WEG(**)	Fluxo ótimo
587(****)	4:1	1000:1	60 – 120 Hz	Qualquer	Fluxo constante
	10:1	-	60 – 120 Hz	WEG(**)	Fluxo ótimo
MOTORES TEFC NEMA Premium Efficiency					
Tamanho de carcaça	Torque Constante	Torque Variável	Potência Constante	Inversor	Condição de fluxo
143 – 587(***)	20:1	1000:1	60 – 120 Hz	Qualquer	Fluxo constante
	1000:1(*)	-	60 – 120 Hz	WEG(**)	Fluxo ótimo
587(****)	6:1	1000:1	60 – 120 Hz	Qualquer	Fluxo constante
	12:1	-	60 – 120 Hz	WEG(**)	Fluxo ótimo

(*)O bom desempenho do motor depende da correta parametrização do drive – a WEG deve ser contactada

(**)Inversor CFW-09 versão 2.40 ou acima, quando operando em modo vetorial sensorless (loop aberto)

(***)Motores com potência nominal ≤ 250 hp. Critérios válidos também para motores da carcaça 447/9

(****)Motores com potência nominal > 250 hp. Critérios válidos também para motores da carcaça 447/9

As faixas de velocidades estabelecidas na tabela acima estão relacionadas unicamente com a capacidade térmica do motor. A regulação da velocidade depende do modo de operação do inversor e do seu ajuste correto. Sob solicitação, motores W21 e NEMA Premium Efficiency de todas as carcaças também podem possuir ventilação forçada. Nesses casos o motor estará apto às aplicações 1000:1 com cargas de torque constante e variável, qualquer que seja o inversor. Os motores WEG High Efficiency e NEMA Premium Efficiency atendem às recomendações da NEMA MG1 Partes 30 e 31.

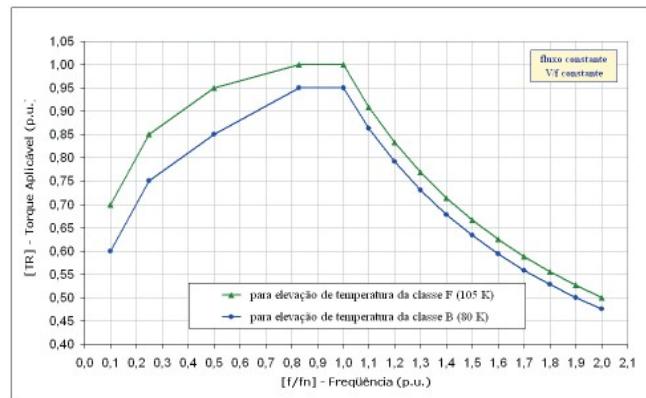
As relações constantes na tabela acima descrevem a faixa de frequências de operação da máquina. Considerando-se 60 Hz como frequência-base, por exemplo, tem-se a seguinte equivalência:

Relação	Faixa de operação
4:1	15 – 60 Hz
10:1	6 – 60 Hz
12:1	5 – 60 Hz
20:1	3 – 60 Hz
100:1	0,6 – 60 Hz
1000:1	0,06 – 60 Hz

6.4.1.2 Para motores dos mercados IEC e ABNT

Condição de fluxo constante:

Abrangência: Motores fechados fabricados em série atendendo níveis de rendimento de linhas-padrão (conforme NBR 17094-1) ou IE1 (conforme IEC 60034-30) ou acima.



Condição de Fluxo Ótimo®:

Abrangência: Motores fechados fabricados em série atendendo níveis de rendimento de linhas de alto rendimento (conforme NBR 17094-1) ou IE2 (conforme IEC 60034-30) ou acima.

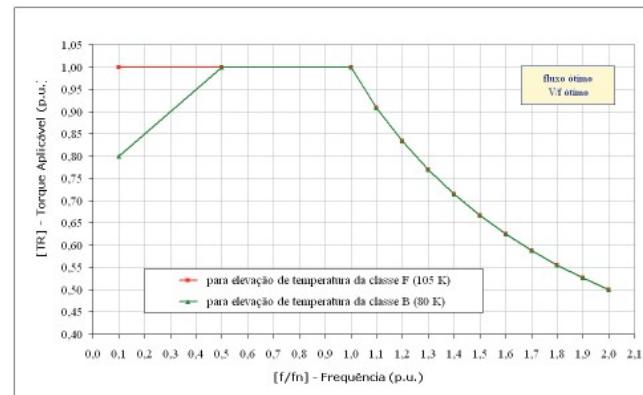
A solução Fluxo Ótimo®, patenteada pela WEG, foi desenvolvida com o objetivo de tornar os motores WEG aptos a operarem em baixas frequências com torque constante, mantendo sua temperatura dentro dos limites da classe térmica, sem ventilação forçada ou sobredimensionamento da carcaça.

Ela baseia-se na minimização das perdas, fontes geradoras de calor, através da otimização do fluxo magnético do motor, parâmetro controlado pelo CFW-09 (inversor de frequência WEG). A partir do estudo da composição de todas as perdas dos motores elétricos e da sua relação com a frequência, o fluxo e a corrente, bem como da influência da ventilação sobre a elevação de temperatura do motor, encontrou-se um valor ótimo de fluxo para cada rotação, permitindo a contínua minimização das perdas globais do motor ao longo da faixa de operação. A solução obtida foi incorporada ao CFW-09, de modo que a condição ótima de fluxo magnético do motor é ajustada automaticamente pelo inversor, tornando mínimas as perdas totais do motor em cada frequência de operação, bastando para isso uma parametrização adequada – e simples – do inversor.

As perdas no ferro variam sensivelmente com a frequência de operação. Conforme a frequência cai, as perdas no ferro também são reduzidas. Então em baixas frequências de operação é interessante aumentar a indução (densidade de fluxo magnético), pois o torque pode ser mantido constante com uma corrente reduzida, ou seja, menores perdas Joule. Assim, conforme a rotação cai, é possível reduzir a tensão proporcionalmente menos do que a frequência, para que se obtenha uma relação V/f ótima (maior do que a nominal do motor), que minimiza as perdas totais. Considera-se para tanto que a maior parcela de perdas do motor ocorre por efeito Joule nos condutores.

Essa solução foi especialmente concebida para aplicações em baixas freqüências com cargas de torque constante – não devendo, portanto, ser utilizada com cargas de torque variável ou acima da frequência base – e é possível somente quando:

- O motor é alimentado por inversor WEG (CFW-09) versão 2.40 ou acima;
- É utilizado controle vetorial sensorless (loop aberto).



6.4.2 Torque de Partida

Com base na NEMA MG1 Partes 30 e 31, o motor deve ser capaz de produzir um torque de partida no mínimo igual a 140% do torque nominal, absorvendo no máximo 150% da corrente nominal, quando alimentado por inversor de frequência. Os motores WEG satisfazem tais exigências.

6.4.3 Torque Máximo

Acima da velocidade base, para operação em potência constante, uma tensão igual à nominal do motor deverá ser mantida, conforme mostrado anteriormente. A NEMA MG1 Parte 31 prescreve que o torque máximo em qualquer frequência dentro da faixa de freqüências definida não deve ser menor do que 150% do torque relativo àquela freqüência, quando tensão nominal para aquela freqüência é aplicada. Os motores WEG, quando alimentados por inversores de freqüência, satisfazem tais exigências até a freqüência de operação de 90 Hz.

A máxima capacidade de torque (torque máximo) do motor limitará a velocidade máxima na qual a operação em potência constante é possível. Uma forma aproximada de verificar o limite máximo de velocidade respeitando os critérios da norma NEMA citados acima é aplicando a equação a seguir:

$$\text{RPM}_{\max} = \text{RPM}_{\text{base}} \times [(C_{\max} / C_{\text{nom}}) / 1,5]$$

6.5 Influência do inversor no sistema isolante do motor

A evolução dos semicondutores de potência tem levado à criação de chaves mais eficientes, porém, mais rápidas. As elevadas freqüências de chaveamento das chaves eletrônicas empregadas nos inversores atuais (comumente transistores IGBT) acarretam algumas consequências indesejáveis, tais como o aumento de emissão eletromagnética e a provável incidência de picos de tensão, bem como elevados valores de dV/dt (taxa de variação da tensão no tempo), nos terminais dos motores alimentados por inversores. Dependendo das características de controle (resistores de gate, capacitores, tensões de comando, etc.) e da modulação PWM adotada, quando esses inversores são utilizados em conjunto com um motor de indução de gaiola, os pulsos, em combinação com as impedâncias do cabo e do motor, podem gerar, de maneira repetitiva, sobretensões nos terminais do motor. Esses trens de pulsos podem reduzir a vida do motor pela degradação do seu sistema de isolamento.

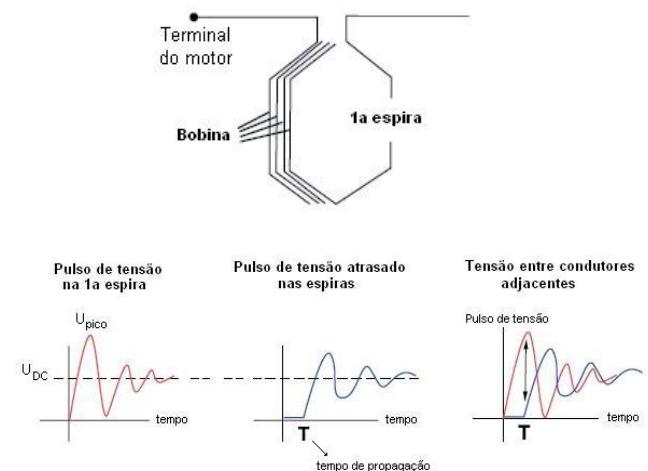
O cabo e o motor podem ser considerados um circuito ressonante excitado pelos pulsos retangulares do inversor. Quando os valores de R, L e C são tais, que a tensão de pico atinge valores acima da tensão da fonte ($V_{DC} \square 1,35V_{nom}$), a resposta do circuito a essa excitação é considerada um overshoot. Os overshoots afetam especialmente o isolamento entre espiras de enrolamentos randômicos e seu valor é determinado, basicamente, pelos seguintes fatores: "rise time" do pulso de tensão, comprimento do cabo, mínimo tempo entre pulsos, freqüência de chaveamento e o uso de motores múltiplos.

6.5.1 Rise Time

Para transitar do seu valor mínimo até o seu valor máximo, a tensão PWM requer certo tempo, denominado *rise time* (tempo de subida). Devido à grande velocidade de chaveamento dos IGBTs dos inversores, o crescimento da

fronte de onda de tensão acontece muito rapidamente e, com o avanço da eletrônica de potência, esses tempos de transição tendem a diminuir ainda mais.

Com a grande rapidez do crescimento do pulso de tensão (dV/dt) emitido pelo inversor ao motor, a(s) primeira(s) espira(s) da primeira bobina de uma dada fase fica(m) submetida(s) a um alto valor de tensão. Devido às características indutivas e capacitivas do enrolamento do motor, ocorre amortecimento do pulso nas bobinas subsequentes.

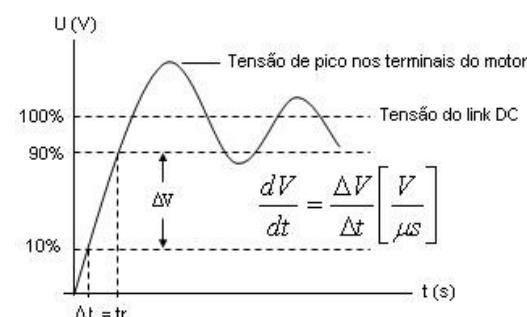


Com isso, o *rise time* (tr) influencia diretamente o tempo de vida útil do isolamento, pois quanto menor for o tempo de crescimento do pulso, maior será a taxa de variação da tensão no tempo (dV/dt), originando maior diferença de potencial entre espiras e degradando mais rapidamente o sistema isolante do motor. Devido aos altos gradientes de tensão a que o isolamento é submetido quando da operação com inversores, ele deve possuir características dielétricas superiores para essas aplicações.

6.5.1.1 Considerações normativas sobre o rise time

As definições de *rise time* (tr) dadas pela NEMA e pela IEC diferem, conforme mostrado a seguir, dando margem a divergências de interpretação e conflitos entre fabricantes e consumidores de motores e inversores de freqüência.

NEMA MG1 Part 30



tr : tempo que a tensão leva para subir de 10 a 90% da tensão do link DC ($\square 1,41V_{nom}$)

Cálculo do dV/dt pelo critério NEMA

Supondo a tensão do motor $V_{nom} = 460 \text{ V}$

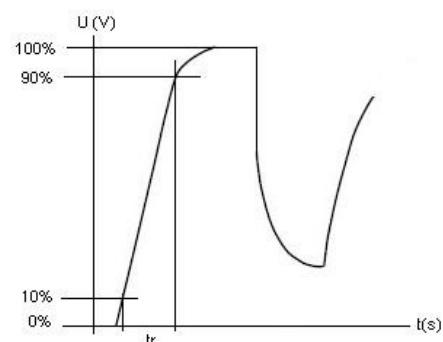
$$\text{Vlink DC} \square 1,41 \times 460 = 648,6 \text{ V}$$

$$\square V = 0,8 \times 648,6 = 518,9 \text{ V}$$

Assumindo um *rise time* de $0,1 \square s$
 $\square t = 0,1 \square s$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\square V}{\square t} = \frac{518,9}{0,1} = 5189 \left[\frac{\text{V}}{\square s} \right]$$

IEC 60034-25



tr : tempo que a tensão leva para subir de 10 a 90% da tensão do link DC ($\square 1,41V_{nom}$)

Cálculo do dV/dt pelo critério IEC

Supondo a tensão do motor $V_{nom} = 460 \text{ V}$
 (com incidência de picos de 1200 V)

$$\square V = 0,8 \times 1200 = 960 \text{ V}$$

Assumindo $tr = 0,25 \square s$:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\square V}{\square t} = \frac{960}{0,25} = 3840 \left[\frac{\text{V}}{\square s} \right]$$

NOTA: Por efeito do cabo, o *rise time* é maior nos terminais do motor do que nos terminais do inversor. Um erro bastante comum é considerar, no cálculo do dV/dt, o *rise time* nos terminais do inversor e a tensão de pico nos terminais do motor, gerando um valor de dV/dt absurdo. Por exemplo, considerando no caso acima $tr = 0,1 \square s$ (valor tipicamente encontrado no inversor), o dV/dt resultaria $9600 \text{ V}/\square s$!

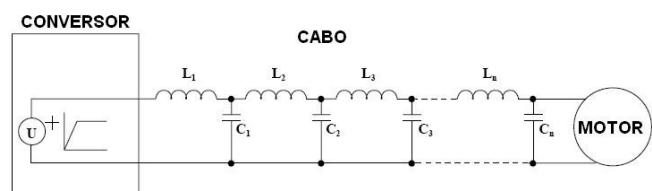
Devido às diferenças existentes entre as definições de *rise time* da NEMA e da IEC, ocorrem frequentemente confusões

no cálculo do dV/dt. Pelo critério NEMA deve-se tomar o valor da tensão do link DC ($\square 1,41 V_{rede}$) como referência de 100% de tensão para a determinação do *rise time* (informado pelo fabricante do inversor) e o cálculo do dV/dt. Já pelo critério IEC, o valor de pico da tensão nos terminais do motor é que deve ser usado como referência. Por efeito do cabo, o *rise time* a ser considerado no critério IEC será normalmente maior do que o considerado no critério NEMA (que é o valor informado pelo fabricante do inversor). Assim, percebe-se, que dependendo do critério utilizado no cálculo, podem ser considerados valores de dV/dt bastante distintos para uma mesma situação.

Os critérios de isolamento dos motores WEG são definidos com base na NEMA, para que independam das instalações do consumidor final. O critério NEMA parece adequado por considerar apenas a região linear da curva na aproximação da derivada ($dV/dt \square \square V/\square t$). O critério IEC considera a tensão de pico nos terminais do motor, algo extremamente difícil de ser previsto ou estimado a priori. O *rise time* nos terminais do motor é aumentado pela impedância distribuída do cabo. O valor do dV/dt nos terminais do motor (mais ameno do que nos terminais do inversor) pode também ser calculado, mas requer a medição do pulso de tensão na entrada do motor e na maioria das vezes essa medição é difícil de ser executada, necessitando de um técnico que conheça o assunto e de um osciloscópio de boa qualidade.

6.5.2 Comprimento do cabo

Os fatores predominantes para a incidência de picos de tensão nos terminais do motor alimentado por inversor são o *rise time* e o comprimento do cabo. O cabo pode ser considerado uma linha de transmissão, ou seja, impedâncias distribuídas em seções de indutâncias/capacitâncias conectadas em série/paralelo. A cada pulso, o inversor entrega energia ao cabo carregando essas indutâncias e capacitâncias.

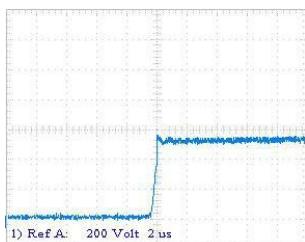


O cabo é como uma linha de transmissão composta por impedâncias distribuídas.

O sinal chega ao motor através do cabo e é parcialmente refletido, ocasionando sobretenção, pois a impedância de alta frequência na entrada do motor é maior do que a impedância do cabo. Comprimentos de cabo elevados geralmente aumentam o valor do overshoot nos terminais do motor. De acordo com o *NEMA Application Guide for AC ASD Systems*, com os modernos IGBTs os overshoots começam a aparecer a partir de aproximadamente 3 m de cabo, podendo chegar a 2 vezes o valor da tensão da fonte para comprimentos de cabo de 15 m e a valores superiores a esse, para comprimentos de cabo acima de 120 m, por exemplo, além de o overshoot permanecer existindo por

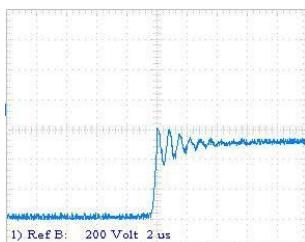
mais tempo nessas situações. Esse comportamento varia em função do padrão de pulsos PWM, do *rise time* e do próprio tipo de cabo. As figuras abaixo mostram as tensões medidas na saída do inversor (sem cabo) e nos terminais do motor ($V_{nom} = 400$ V) com diferentes comprimentos de cabo. São exemplos apenas, pois os níveis dos *overshoots* dependem do tipo de cabo.

Terminais inversor



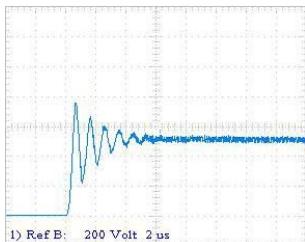
$$V_{pico} = 560 \text{ V}$$

20 metros de cabo



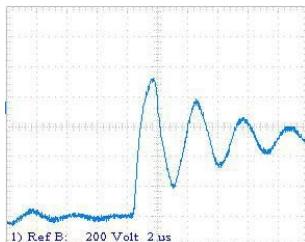
$$V_{pico} = 630 \text{ V}$$

30 metros de cabo

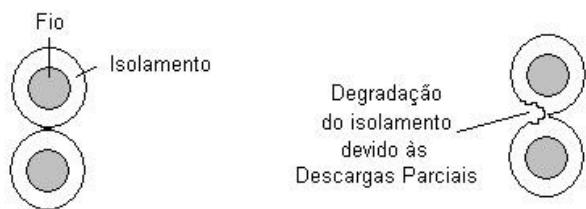


$$V_{pico} = 750 \text{ V}$$

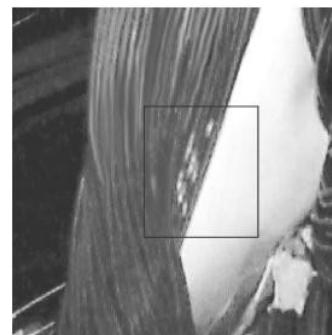
100 metros de cabo



$$V_{pico} = 990 \text{ V}$$



Efeito das Descargas Parciais no sistema isolante do motor



Isolamento desgastado pela ação de descargas parciais

Portanto, as descargas parciais são descargas de baixa energia que, se atuam continuamente, degradam prematuramente o isolamento do motor. A erosão resulta na diminuição da espessura do material isolante, acarretando progressivas perdas de propriedades dielétricas, até que a tensão de ruptura atinja um nível abaixo do nível de pico da tensão aplicada, ocasionando então a falha do isolamento.

6.5.2.1 Efeito Corona

Dependendo da qualidade/homogeneidade do sistema de impregnação, o material impregnante pode conter bolhas de ar (vazios), nas quais se desenvolve o mecanismo de falha do isolamento entre espiras. A deterioração do isolamento do motor devido aos *overshoots* de tensão ocorre por meio das Descargas Parciais, fenômeno complexo decorrente do efeito Corona.

Entre condutores energizados adjacentes existe uma diferença de potencial relativa, que resulta em um campo elétrico. Se for estabelecido um campo elétrico suficientemente alto (mas abaixo da tensão de ruptura do material isolante), a rigidez dielétrica do ar pode ser rompida, ou seja, se houver energia suficiente, o oxigênio (O_2) é ionizado em ozônio (O_3). O ozônio é altamente agressivo e ataca os componentes orgânicos do sistema isolante, deteriorando-os. Para que isso ocorra, o potencial nos condutores precisa exceder um valor limiar denominado CIV (Corona Inception Voltage), que é a rigidez dielétrica do ar "local" (dentro da bolha). O CIV depende do projeto do enrolamento, tipo de isolamento, temperatura, características superficiais e umidade.

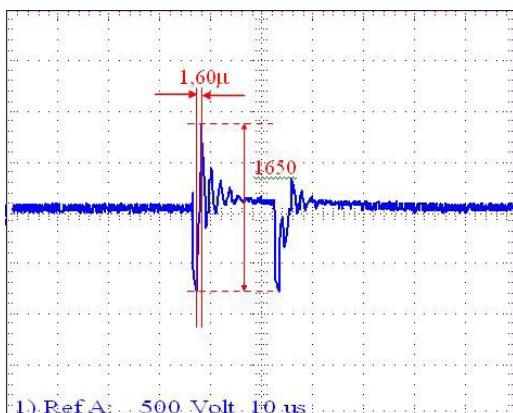
6.5.3 Mínimo tempo entre pulsos consecutivos

Há uma sucessão de picos na forma de onda da tensão entregue pelo inversor ao motor. Este sinal viaja através do cabo até atingir o motor com determinada velocidade de propagação. Assim, a tensão que aparece entre espiras pode variar sobremaneira, dependendo das características do enrolamento do motor e do tempo entre pulsos consecutivos na forma de onda da tensão.

A tensão média aplicada sobre o motor é controlada pela largura dos pulsos e pelo tempo entre eles. O *overshoot* torna-se pior quando o tempo entre os pulsos é mínimo. Essa condição ocorre quando são necessárias elevadas tensões na saída e durante regimes transitórios, como aceleração e desaceleração do motor. Se o tempo entre pulsos é menor do que 3 vezes o período ressonante do cabo (tipicamente 0,2 a 2 μ s para cabos industriais), ocorrerá acréscimo no *overshoot*. A única forma de saber se essa condição existe é medindo os pulsos diretamente ou contactando o fabricante do inversor.

Quando o tempo entre pulsos consecutivos for menor do que 6 μ s, pode-se assumir que a diferença de potencial entre espiras, principalmente quando a 1a e a última espira de um enrolamento randômico estiverem lado a lado, é o valor pico a pico entre pulsos. O fato ocorre devido à rapidez de propagação do pulso, pois enquanto na 1a espira o valor de tensão é o valor pico a pico, na última espira a tensão é muito baixa, provavelmente, zero.

Acima é mostrado um exemplo de tempo entre pulsos consecutivos menor do que 6 μ s, em que efetivamente ocorreram queimas de motores por curto entre espiras.



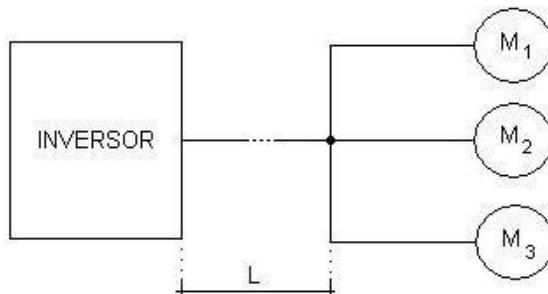
6.5.4 Frequência de chaveamento

Associada aos efeitos originados do *rise time* e do mínimo tempo entre pulsos consecutivos, está a frequência com que os mesmos são produzidos. Ao contrário dos eventuais impulsos provenientes de manobras de rede, neste caso trata-se de um trem de pulsos mantido numa determinada frequência. Em função da rápida evolução da eletrônica de potência, essa frequência atualmente atinge valores da ordem de 20 kHz e, quanto maior for a frequência de chaveamento (pulsação) do inversor, mais rápida será a degradação do sistema isolante. Estudos indicam que a dependência do tempo de vida útil do isolamento em função da frequência de chaveamento não é uma relação simples, porém, experiências realizadas nesse sentido mostram dados interessantes: **para frequências de chaveamento ≤ 5 kHz** a probabilidade de falha do isolamento é diretamente proporcional à frequência de chaveamento, ao passo que **para frequências de chaveamento > 5 kHz** a probabilidade de falha do isolamento é diretamente proporcional ao quadrado da frequência de chaveamento. O aumento da frequência de chaveamento pode também ocasionar danos aos rolamentos. Por outro lado, o aumento da frequência de chaveamento melhora a série de Fourier da tensão injetada no motor, tendendo, dessa forma, a melhorar o desempenho do motor em termos de temperatura e ruído.

6.5.5 Aplicações com múltiplos motores

Se mais de um motor é conectado ao mesmo inversor, pode ocorrer *overshoot* devido à reflexão entre motores. Essa situação é tão pior quanto maior for o comprimento do cabo

entre o inversor e o ponto comum de conexão dos motores. O cabo atua como um desacoplador entre inversor e motor. Como resultado, reflexões que seriam absorvidas pela baixa impedância de saída do inversor podem ser carregadas para um outro motor, amplificando assim o *overshoot* incidente nos seus terminais.



Na operação com múltiplos motores, o comprimento "L" deve ser o menor possível.

6.6 Critérios de isolamento para motores WEG alimentados por inversor de frequência

Na utilização de motores de indução trifásicos de baixa tensão WEG com inversores, para proteger o sistema de isolamento do motor, devem ser obedecidos os critérios definidos a seguir. Se alguma das condições apresentadas na tabela não for satisfeita, deve ser instalado filtro entre o inversor e o motor.

NOTA: Motores para áreas classificadas devem ser avaliados caso a caso e a WEG deve ser consultada.

Tensão nominal do motor	Tensão de pico nos terminais do motor	dV/dt na saída do inversor	Rise Time do inversor*	Tempo entre pulsos*
VNOM \leq 460 V	\leq 1600 V	\leq 5200 V/ μ s		
460 V \square VNOM \leq 575 V	\leq 1800 V	\leq 6500 V/ μ s	\leq 0,1 μ s	\leq 6 μ s
575 V \square VNOM \leq 690 V	\leq 2200 V	\leq 7800 V/ μ s		

* Informações fornecidas pelos fabricantes de inversores.

Para o inversor, a máxima frequência de chaveamento recomendada é 5 kHz.

A umidade é um agente agressivo e deve ser evitada para garantir maior tempo de vida ao motor. Para manter os enrolamentos sem umidade, recomenda-se o uso de resistências de aquecimento.

O sistema isolante utilizado depende da faixa de tensão de alimentação do motor e do tamanho da carcaça.

6.7 Considerações normativas sobre o isolamento de motores acionados por inversores de frequência

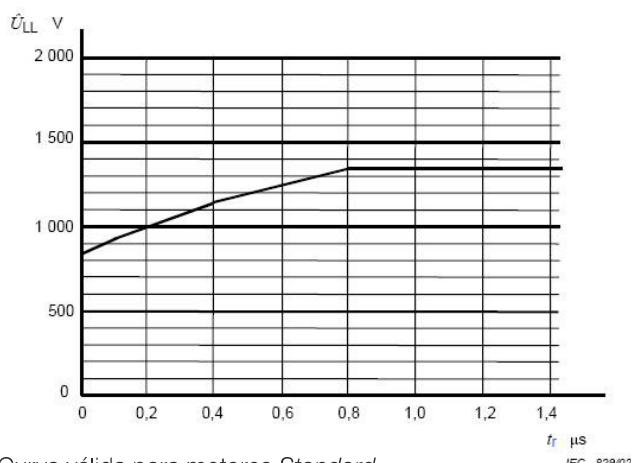
- NEMA MG1 – se a tensão de entrada do inversor não exceder a tensão nominal do motor e nos terminais do motor forem observados valores de tensão dentro dos limites estipulados abaixo, assume-se que não haverá significativa redução na vida útil do isolamento por stress de tensão.

Nema MG1 - Parte 30 Motores de uso geral	Nema MG1 - Parte 31 Motores de uso específico
Para tensão \leq 600 V : Vpico \leq 1kV <i>Rise time</i> \leq 2 μ s	Para tensão $>$ 600 V : Vpico \leq 3,1 Vnom <i>Rise time</i> \leq 0,1 μ s
Para tensão \leq 600 V : Vpico \leq 2,04 Vnom <i>Rise time</i> \leq 1 μ s	Para tensão \leq 600 V : Vpico \leq 2,04 Vnom <i>Rise time</i> \leq 1 μ s

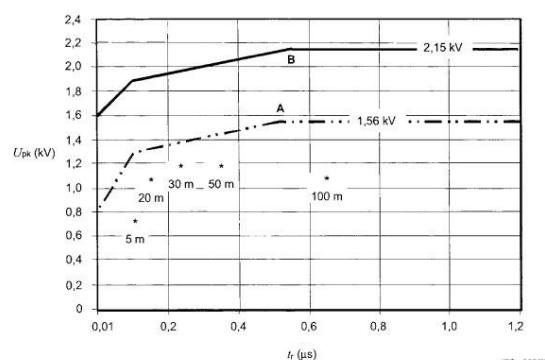
NOTA: O isolamento dos motores WEG atende à norma NEMA MG1 – Partes 30 e 31.

- IEC 60034 – para motores até 500 V o sistema de isolamento deve suportar os níveis de Vpico mostrados na tabela abaixo. Acima de 500 V, o sistema isolante deve ser reforçado ou filtros devem ser instalados na saída do inversor, para aumentar o *rise time*/limitar as tensões de pico.

IEC 60034-17 Motores de uso geral

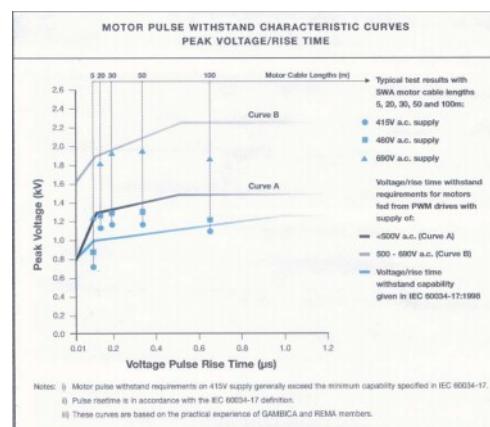


IEC 60034-25 Motores de uso específico



Curva A: Válida para motores até 500 Vca (sem filtros)
Curva B: Válida para motores até 690 Vca (sem filtros)
* Valores medidos com diferentes comprimentos de cabo e alimentação de 415 Vca

- GAMBICA/REMA – a associação européia de fabricantes de motores (REMA) e inversores (GAMBICA) estabelece os critérios abaixo com base na experiência prática dos seus membros.



Percebe-se a similaridade dos critérios definidos pela IEC e pela GAMBICA e a disparidade de ambas em relação aos critérios NEMA, fato decorrente das diferentes definições de *rise time* e dV/dt de acordo com cada organismo. Vale observar que tanto a IEC quanto a GAMBICA levam em consideração o comprimento do cabo entre inversor e motor, informação que a WEG também considera relevante.

6.8 Recomendações para os cabos de conexão entre motor e inversor WEG

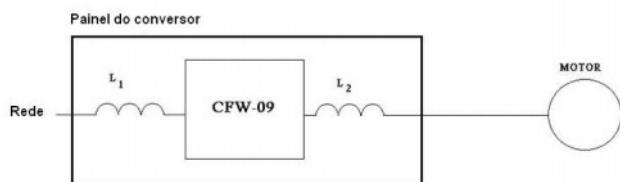
Conforme já citado, o máximo pico de tensão incidindo nos terminais do motor alimentado por inversor de frequência depende de vários fatores, dentre os quais o mais importante é o comprimento do cabo. Quando da utilização de motores com inversores de frequência WEG, as seguintes regras práticas são sugeridas para a avaliação da necessidade de utilização de filtros entre o motor e o inversor:

Comprimento de cabo L	Filtros de Saída
L \leq 100 m	Não são necessários
100 m < L \leq 300 m	Necessária reatância de saída (2% de queda de tensão mínima)
L > 300 m	Necessários filtros especiais (consultar a WEG)

A reatância de saída é necessária para limitar a corrente de fuga, que flui da saída do inversor para a terra. A reatância de rede evita o bloqueio do inversor por atuação da sua proteção de falta à terra.

A reatância de saída deverá ser projetada para suportar perdas adicionais ocasionadas pelas oscilações de corrente do motor e pelas correntes de fuga para a terra. Estas últimas aumentam à medida que o comprimento do cabo do motor aumenta. Para cabos longos e reatâncias projetadas para pequenas correntes haverá uma grande influência das correntes de fuga nas perdas (e no aquecimento) das reatâncias. As perdas adicionais das reatâncias deverão ser consideradas na refrigeração dos painéis, de forma a garantir operação em temperatura ambiente segura.

A reatância de saída deverá ser posicionada próxima ao inversor, como mostra a figura abaixo.



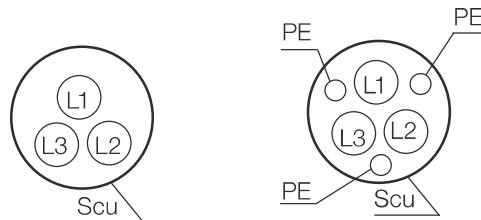
L1 = Reatância de entrada (reatância de rede) – critério de seleção conforme item 5.2

L2 = Reatância de saída – deverá ser montada próxima ao inversor.

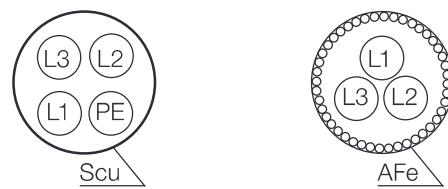
As recomendações básicas estão resumidas na tabela abaixo, mas sugere-se consultar a norma para mais detalhes e eventuais modificações resultantes de revisões.

O sistema de aterramento deve apresentar uma boa interligação entre os diversos locais da instalação, como por exemplo, entre os pontos de aterramento do motor e do inversor. Diferenças de potencial ou impedância entre diferentes pontos da malha de aterramento pode provocar circulação de correntes parasitas entre os equipamentos conectados à terra, levando a problemas de interferência eletromagnética.

Tipos de cabos para conexão do motor recomendados pela IEC 60034-25



Alternativas para condutores de até 10 mm²



Afe = aço ou ferro galvanizado

PE = condutor de terra

SCU = blindagem externa (cobre ou alumínio)

Cabos blindados simétricos: três condutores concêntricos (com ou sem condutores de terra) construídos de forma simétrica + blindagem externa de cobre ou alumínio.

A blindagem dos cabos deve ser aterrada em ambos os lados, inversor e motor. Devem ser feitas conexões de 360°, para que se obtenha baixa impedância para altas frequências.

Para que a blindagem atue também como terra de proteção, ela deve possuir pelo menos 50% da condutibilidade dos condutores de fase. Caso contrário, condutor de terra adicional deve ser usado externamente ao cabo blindado, ficando a blindagem como proteção de EMC.

A condutibilidade da blindagem para altas frequências deve ser pelo menos 10% daquela dos condutores de fase.

6.9 Influência do inversor na corrente que circula pelos mancais do motor (tensão induzida no eixo)

O fenômeno de tensão/corrente induzida no eixo agravou-se com o advento dos inversores de frequência PWM, pois os motores passaram a ser alimentados por formas de ondas desequilibradas e com componentes de alta frequência. Portanto, as causas de tensão induzida no eixo devido aos

Separação entre os cabos do motor (blindados ou não) e os demais cabos presentes na instalação

Comprimento da fiação	Distância mínima de separação
≤ 30 m	□ 10 cm
> 30 m	□ 25 cm

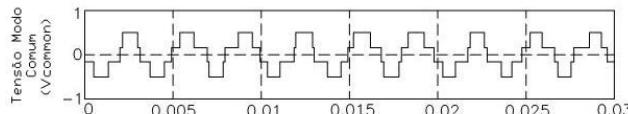
6.8.1.3 Recomendações de instalação

A IEC 60034-25 apresenta tipos e pormenores de instalação.

inversores de frequência somam-se àquelas intrínsecas ao motor (por exemplo, desbalanceamento eletromagnético causado por assimetria) e que também provocam a circulação de corrente pelos mancais. A principal causa de correntes circulantes pelos mancais do motor acionado por inversor estático são as tensões modo comum. As impedâncias capacitivas tornam-se baixas diante das altas frequências produzidas pelo inversor, ocasionando circulação de corrente pelo caminho formado pelo rotor, eixo e mancal para a terra.

6.9.1 Tensões modo comum

A tensão PWM trifásica de saída de um inversor eletrônico de frequência, diferentemente da tensão trifásica senoidal, não é equilibrada, ou seja, em função da topologia do estágio inversor, a soma vetorial instantânea das tensões nas três fases não é igual a zero, mas igual a um potencial elétrico de alta frequência relativo a um ponto comum de referência, usualmente o terra ou o barramento negativo do link DC, daí a denominação modo comum.



Tensão modo comum: o somatório das tensões na saída do inversor não é zero

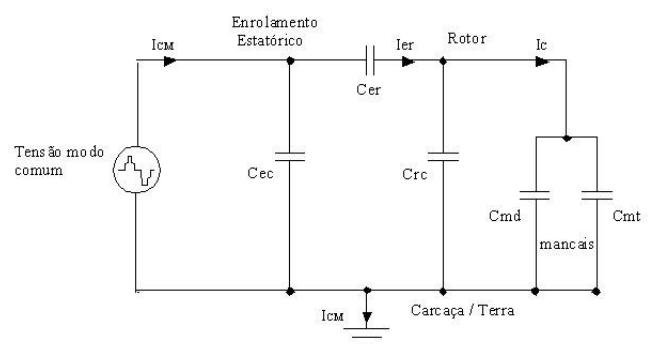
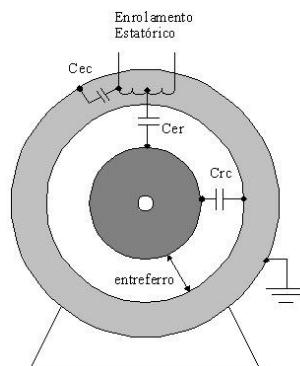
Correntes de modo comum indesejadas podem resultar dessa tensão modo comum de alta frequência e, havendo capacitâncias parasitas do motor para a terra, a corrente tenderá a fluir para a terra através dessas capacitâncias parasitas, atravessando rotor, eixo e mancal para a tampa aterrada.

Experiências práticas mostram, que as tensões e correntes modo comum tendem a aumentar com frequências de chaveamento mais elevadas.

6.9.2 Circuito equivalente do motor para as correntes capacitivas de alta frequência

Os caminhos percorridos pelas correntes de modo comum podem ser observados no modelo do circuito equivalente do motor para altas frequências, no qual os mancais são representados por capacitâncias.

O rotor é suportado pelos mancais, que possuem um filme de graxa não-condutivo. Em altas velocidades não há contato entre o rotor e a pista externa do rolamento (aterrada), devido à distribuição plana do filme de graxa. O potencial do rotor pode então aumentar com relação à terra até atingir um nível capaz de romper o filme de graxa, então ocorre faiscamento e a corrente de descarga flui através dos rolamentos. Essa corrente circula quando o filme de graxa é momentaneamente rompido e é denominada “componente de descarga capacitiva”. Outra componente de corrente circula permanentemente pela espira característica formada por eixo, mancais e carcaça e é denominada “componente de condução”.



C_{er} : capacitor formado entre o enrolamento estatórico e as chapas do rotor.
(Dielétrico = entreferro+isolante de ranhura+isolamento dos fios)

C_{rc} : capacitor formado entre as chapas do rotor e do estator.
(Dielétrico = entreferro)

C_{ec} : capacitor formado entre enrolamento estatórico e carcaça.
(Dielétrico = isolamento de ranhura + o isolamento dos fios)

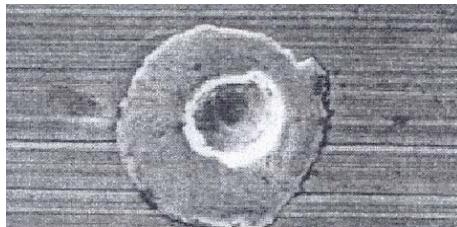
C_{md} e C_{mt} : capacitâncias dos mancais dianteiro e traseiro, formadas pelas pistas de rolagem dos anéis internos e externos, tendo as esferas (ou rolos) metálicas no interior.
(Dielétrico = espaços entre as pistas de rolagem e as esferas + graxa do rolamento)

I_{cm} : corrente total de modo comum

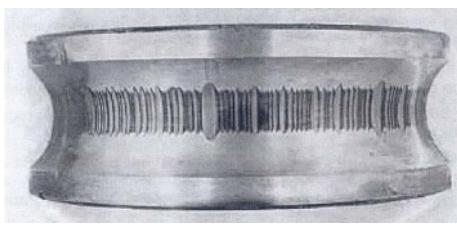
I_{er} : corrente de descarga capacitiva do estator para o rotor

I_c : corrente de descarga capacitiva pelos mancais.

Essas descargas desgastam as esferas e a pista do rolamento, dando origem a pequenos furos, que começam a se sobrepor e, caso haja correntes de descarga por longo tempo, sulcos (crateras) serão formados. A erosão acarreta redução da vida útil dos rolamentos e pode provocar falha da máquina.



Cratera ocasionada por eletroerosão na pista interna do rolamento.



Pista de rolamento danificada devido à circulação de corrente elétrica pelo mancal.

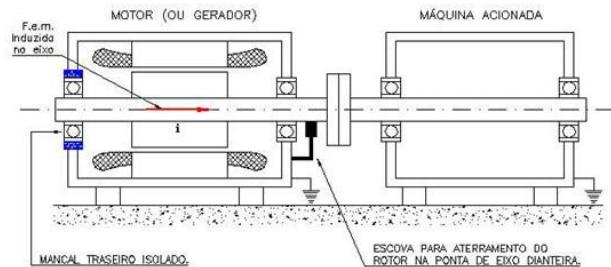


Estriamento (fluting) causado pela corrente elétrica no mancal

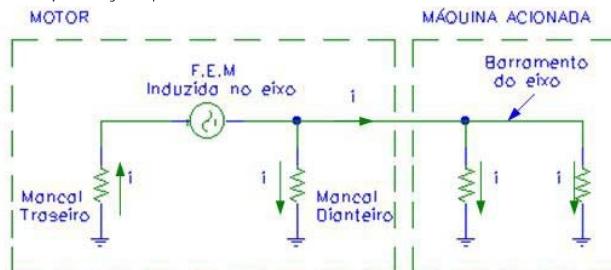
6.9.3 Métodos para evitar ou minimizar a circulação de corrente elétrica pelos mancais do motor alimentado por inversor

Deve-se impedir a circulação de corrente através dos mancais levando-se em conta as componentes de condução (induzidas no eixo) e as componentes de descarga capacitiva (resultantes da tensão modo comum). Para eliminar as correntes circulantes na espira característica basta isolar os mancais do motor. Para eliminar as componentes de origem capacitativa, porém, seria necessário isolar também os mancais da máquina acionada, para evitar a migração de cargas elétricas do motor para o rotor da máquina acionada através dos eixos eletricamente ligados nos casos de acoplamentos não-isolados. Outro meio de eliminar a componente de origem capacitativa consiste em curto-circuitar o rotor e a carcaça do motor com escova deslizante de grafite. Assim a circulação da componente indutiva na espira característica é eliminada isolando-se apenas um dos mancais do motor, enquanto a componente capacitativa e a transferência das cargas capacitivas do motor para a máquina acionada são eliminadas pelo curto-circuitamento através da escova.

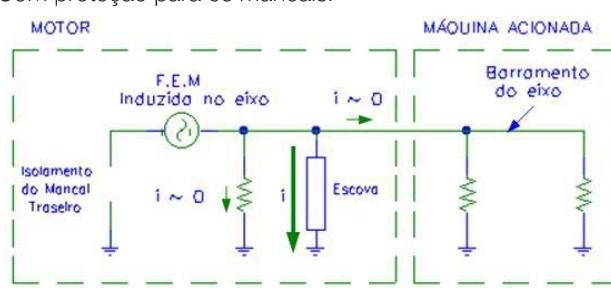
Motor com uma ponta de eixo acionante



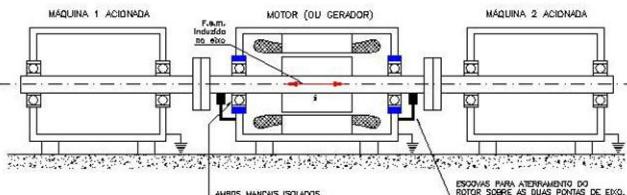
Sem proteção para os mancais:



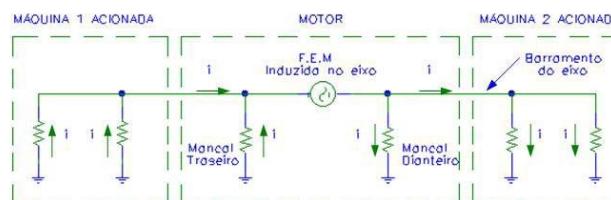
Com proteção para os mancais:



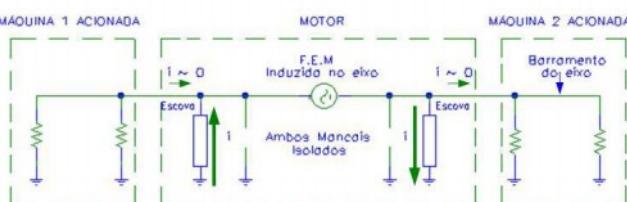
Motor com duas pontas de eixo acionantes



Sem proteção para os mancais:



Com proteção para os mancais:



6.10 Critérios, quanto a corrente pelos mancais (tensão no eixo), para motores de indução WEG alimentados por inversores

Plataforma	Tamanho de carcaça (ABNT)	Padrão	Opcional
W21 W22	mod < 315	Sem proteção	Consultar a WEG
W21 W22	315 e 355	Sem proteção*	Um mancal isolado Ambos os mancais isolados Aterramento entre eixo e carcaça por meio de escova (kit de aterramento do eixo)
HGF	315 ≤ mod ≤ 630	Mancal traseiro isolado Aterramento entre eixo e carcaça por meio de escova (kit de aterramento do eixo na dianteira)	Ambos os mancais isolados
M	280 ≤ mod ≤ 1800	Mancal traseiro isolado Aterramento entre eixo e carcaça por meio de escova (kit de aterramento do eixo na dianteira)	Ambos os mancais isolados

* Para motores da linha "Inverter Duty", o kit de aterramento do eixo é item padrão da linha

NOTA: Motores para áreas classificadas devem ser avaliados caso a caso – consultar a WEG.

6.11 Considerações normativas sobre as correntes que circulam pelos mancais dos motores acionados por inversores

- NEMA MG1 Part 31 – com alimentação senoidal (rede), a presença de tensão no eixo / corrente nos mancais ocorre geralmente em motores da carcaça 500 e maiores. No entanto, em aplicações com inversores de frequência as correntes pelos mancais têm ocorrido ocasionalmente em motores de carcaças menores. A interrupção dessas correntes requer o isolamento de ambos os rolamentos. Alternativamente, escovas de aterramento no eixo podem ser usadas para desviar a corrente sobre os rolamentos. Deve ser observado que o isolamento dos rolamentos não irá prevenir danos do equipamento conectado ao eixo do motor.
- NEMA Application Guide for AC ASD Systems – as componentes de corrente pelos mancais devido à tensão de modo comum (alimentação com inversor) podem causar problemas em motores com tamanhos de carcaça menores que a carcaça 500 (provavelmente nas carcaças 400 e maiores). A solução para o problema é mancal isolado e/ou escova de aterramento no eixo.
- IEC 60034-17 – para carcaças acima da 315 recomenda-se usar na saída do inversor filtro para redução da

componente de sequência zero das tensões de modo comum de fase, reduzir o dV/dt ou isolar o(s) rolamento(s). A necessidade de isolamento de ambos os rolamentos é rara. No caso da análise de todo o sistema de acionamento (inversor + motor + máquina acionada), isolar o acoplamento entre o motor e a máquina acionada. O sistema de aterramento normalmente utiliza escovas de aterramento.

- IEC 60034-25 – não especifica uma carcaça a partir da qual seria necessário proteger os mancais. No item que aborda os efeitos de assimetria magnética dos motores, como causa de tensão no eixo e corrente pelos mancais, é citado que as correntes pelos mancais ocorrem mais comumente em motores maiores que 400 kW. Para as outras causas, não são citados os tamanhos de carcaça. O tipo de solução para evitar as correntes pelos mancais, apresentado neste documento, depende da componente de corrente que se quer evitar. As soluções alternam-se entre mancais isolados e/ou escova de aterramento no eixo.
- CSA 22.2 N°100 Item 12 – escovas de aterramento no eixo deverão ser utilizadas em motores com carcaças maiores do que a IEC 280 (NEMA 440).
- Gambica/REMA Technical Guide – para motores de carcaças menores do que a IEC 280 os efeitos da corrente pelos mancais são mínimos. Nesses casos, nenhum tipo de proteção é necessário. Para motores com carcaças maiores do que a IEC 280, os efeitos das correntes pelos mancais já são significativos e certas proteções são necessárias: motor com mancal traseiro isolado e aterramento do eixo, evitando curto-circuitar o lado do mancal/rolamento isolado.

6.12 Influência do inversor no ruído acústico emitido pelo motor

As máquinas elétricas girantes possuem basicamente três fontes de ruído:

- O sistema de ventilação;
- Os rolamentos;
- Origem eletromagnética.

Quando os rolamentos estão em bom estado, o ruído gerado por eles é praticamente desprezível, comparado com o ruído gerado pelas outras fontes.

Motores alimentados com tensão senoidal, principalmente aqueles de polaridades mais baixas (rotações mais elevadas), têm no sistema de ventilação a sua principal fonte de ruído. Já nos motores de polaridades maiores e rotações menores freqüentemente sobressai o ruído de origem eletromagnética.

Por outro lado, em acionamentos de velocidade variável - especialmente nas baixas frequências de operação, nas quais o ruído devido à ventilação diminui - o ruído eletromagnético pode ser a maior fonte de ruído para motores de quaisquer polaridades, devido ao conteúdo harmônico da tensão. O aumento da frequência de chaveamento tende a reduzir o ruído de origem eletromagnética dos motores.

6.13 Critérios de ruído para motores WEG acionados por inversores

Resultados de ensaios laboratoriais (medidas de 4 pontos efetuadas em câmara acústica semi-anecóica com o inversor colocado fora da câmara) realizados com vários motores e inversores utilizando diversas frequências de chaveamento têm mostrado que os motores de indução trifásicos WEG, quando alimentados por inversores de frequência PWM e operando na rotação nominal (tipicamente 50 ou 60 Hz), apresentam no máximo 11 dB(A) de acréscimo no seu nível de pressão sonora global.

6.14 Considerações normativas sobre o ruído de motores acionados por inversores

- NEMA MG1 Part 30 – O nível de ruído depende da construção do motor, do número de polos, da frequência de chaveamento e do padrão de pulsos do inversor, da frequência fundamental e da velocidade de operação do motor. A resposta em frequência do equipamento acionado também deve ser considerada. Assim, os níveis de ruído produzidos serão maiores do que os valores anunciados pelo fabricante, quando da operação acima da rotação nominal. Em certas frequências, a ressonância mecânica ou o ruído magnético podem aumentar sensivelmente os níveis de ruído, embora uma alteração na frequência e/ou tensão possa reduzir esse ruído. A experiência tem mostrado que, tipicamente na frequência nominal, um aumento de 5 a 15 dB(A) no nível de ruído podem ocorrer, quando motores são alimentados com tensão PWM. Para outras frequências os níveis de ruído podem ser ainda mais elevados.
- IEC 60034-17 – devido às harmônicas o mecanismo de excitação para o ruído magnético torna-se mais complexo do que com regime senoidal e ressonâncias podem ocorrer em frequências particulares dentro da faixa de operação. Experiências mostram, que com tensão e frequência nominais, provavelmente haverá incremento no ruído de 1 a 15 dB(A).
- IEC 60034-25 – a operação com inversor afeta diretamente o ruído emitido pelo motor por três fatores: variações na velocidade de rotação, que influenciam o desempenho dos rolamentos e sistema de ventilação do motor (além de outras características sensíveis a variações de temperatura); conteúdo harmônico do sinal, que afetam em grande escala ruído magnético excitado no núcleo do estator e, em menor escala, o ruído produzido nos mancais; e oscilações de torque, devido à interação de ondas de diferentes frequências do campo magnético no entreferro do motor. O aumento do ruído emitido pelo motor devido à operação com inversor (em relação à alimentação senoidal) será relativamente pequeno para frequências de chaveamento acima de 3 kHz, mas poderá chegar a 15 dB(A) para chaveamentos mais lentos, conforme experiência.

6.15 Influência do inversor na vibração mecânica do motor

Interações entre as harmônicas de corrente e de fluxo

podem resultar em forças parasitas atuando sobre o motor e ocasionando vibrações mecânicas, além de contribuir para o aumento global dos níveis de ruído. Esse mecanismo ganha importância especialmente quando amplificado por ressonâncias mecânicas no motor ou na máquina acionada. Se alguma das harmônicas “não-fundamentais” estiver próxima das frequências naturais do motor, as forças produzidas podem excitar modos de vibração.

Tais efeitos podem ser atenuados se cuidados forem tomados no projeto do motor, com relação às ranhuras estatóricas e rotóricas, chapas e carcaça, buscando sempre simplificar o sistema mecânico e reduzir a possibilidade de excitar frequências naturais e desenvolver modos de vibração.

Os inversores atuais também possuem ferramentas para contornar tais problemas, assim frequências específicas dentro da faixa de operação podem ser evitadas (skip frequency) e as rampas de aceleração e desaceleração são ajustáveis.

6.16 Critérios de vibração para motores WEG acionados por inversores

Ensaio realizados com motores e inversores diversos, seguindo os procedimentos recomendados pela IEC 60034-14 (medição em três direções perpendiculares, com o motor funcionando em vazio apoiado sobre uma base elástica devidamente dimensionada), confirmaram que a vibração dos motores de indução aumenta quando estes são acionados por inversores de frequência.

De um modo geral, o acréscimo de velocidade de vibração foi menor para a maior frequência de chaveamento do inversor. Ou seja, maiores frequências de chaveamento tendem a reduzir a vibração mecânica do motor de indução acionado por inversor.

Em todos os casos, mesmo naqueles acima da frequência base, os motores WEG apresentaram valores de velocidade de vibração RMS (mm/s) abaixo dos limites estabelecidos pelas normas IEC 60034-14 e NEMA MG1 – Parte 7, atendendo, portanto, aos critérios exigidos.

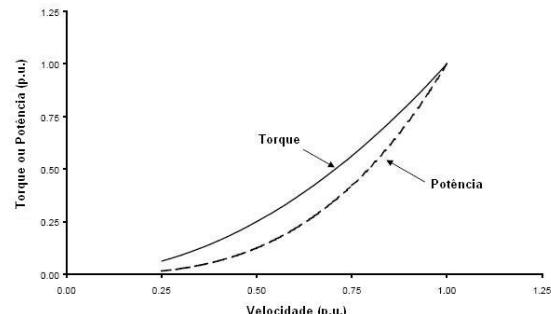
6.17 Considerações normativas sobre vibração, para motores acionados por inversores

- NEMA MG1 Part 30 – É possível, que algumas frequências dentro da faixa de operação correspondam a frequências mecânicas naturais do motor ou da estrutura. Nessas situações a operação mais do que momentânea nas velocidades críticas deve ser evitada, pois causaria danos ao motor ou a carga.
- NEMA MG1 Part 31 – A vibração e o ruído da máquina são influenciados pelos seguintes parâmetros: projeto eletromagnético; tipo de inversor; ressonância da estrutura e do invólucro da carcaça; rigidez, massa e configuração do suporte; reflexões de ruído e vibração pela carga ou acoplamento do eixo; ventilação.

IEC 60034-17 – As oscilações de torque causadas pelas harmônicas ocasionam vibrações torsionais no sistema mecânico, ao contrário dos torques assíncronos, que pouco afetam a operação do acionamento de velocidade variável. Em acionamentos com inversores PWM as frequências dominantes do torque oscilante são determinadas pela frequência dos pulsos, enquanto suas amplitudes dependem da largura do pulso. Torques oscilantes em duas vezes a frequência de chaveamento são gerados, porém, normalmente não chegam a prejudicar o sistema, pois sua frequência está muito acima das frequências mecânicas críticas. Chaveamentos elevados (da ordem de 21 vezes a frequência fundamental) tendem a melhorar o torque / reduzir a oscilação.

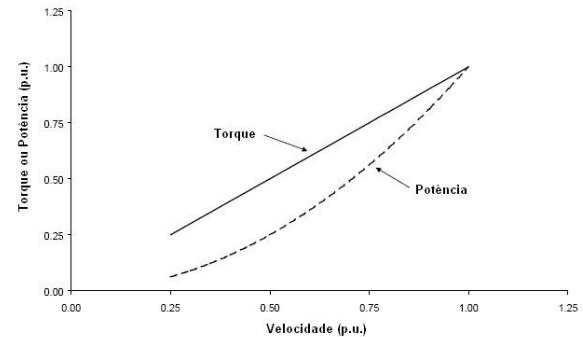
IEC 60034-25 – se o inversor possuir características de saída apropriadas e se forem tomados os devidos cuidados com as características mecânicas e a montagem do motor, serão produzidos níveis de vibração similares àqueles obtidos com regime senoidal, não havendo, portanto, a necessidade de estabelecer critérios de vibração diferentes daqueles já definidos pela IEC 60034-14 para alimentação senoidal. Níveis de vibração obtidos com o motor desacoplado servem como indicativos de qualidade do motor, mas quando o motor é instalado finalmente e acoplado ao equipamento acionado, o nível de vibração poderá ser bastante alterado.

Variação quadrática do torque



- Torque varia com o quadrado da velocidade
- Potência varia com o cubo da velocidade
- Potência e torque nominais na velocidade-base

Variação linear do torque



- Torque varia linearmente com a velocidade
- Potência varia com o quadrado da velocidade
- Potência e torque nominais na velocidade-base

7 Interação entre o motor e carga acionada

7.1 Tipos de carga

O correto dimensionamento do sistema de velocidade variável depende do conhecimento do comportamento da carga, ou seja, da demanda de torque na ponta de eixo do motor. As cargas podem ser classificadas em três tipos: torque variável, torque constante e potência constante.

7.1.1 Cargas de torque variável

Exemplos típicos:

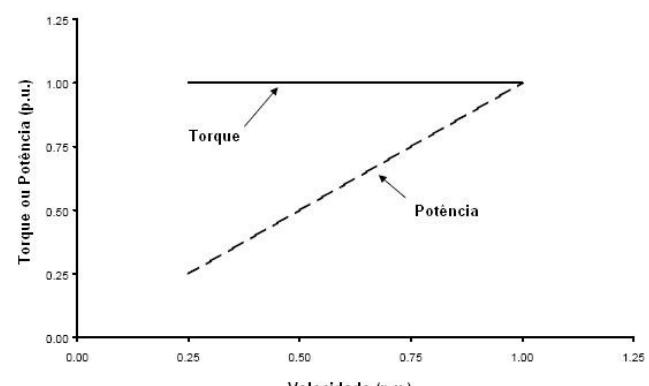
- Bombas centrífugas
- Exaustores centrífugos
- Ventiladores
- Compressores centrífugos

A variação da velocidade por meio de acionamento eletrônico permite grandes economias de energia com esse tipo de carga, uma vez que a potência mecânica disponibilizada na saída do motor não será constante, mas variará convenientemente de acordo com a exigência da carga, conforme apresentado no item 3 deste guia técnico.

7.1.2 Cargas de torque constante

Exemplos típicos:

- Compressores alternados
- Compressores helicoidais
- Elevadores de caneca
- Esteiras transportadoras
- Bombas de deslocamento positivo
- Extrusoras
- Trituradores

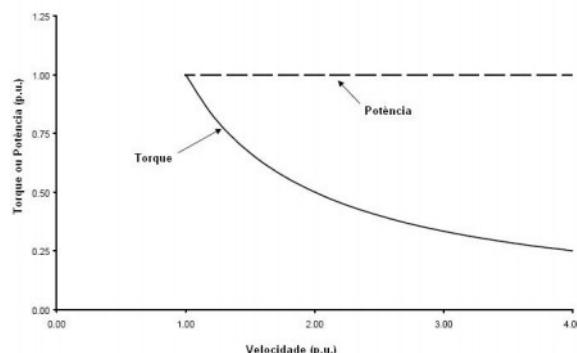


- Torque da carga é constante durante toda a faixa de velocidade
- Potência varia linearmente com a velocidade de operação
- Potência e torque nominais na velocidade-base

7.1.3 Cargas de potência constante

Exemplos típicos:

- Ferramentas de usinagem
- Bobinadeiras



- Torque da carga cai proporcionalmente à frequência com o aumento de velocidade
- Potência resulta constante durante toda a faixa de operação
- Potência e torque nominais na velocidade-base

7.2 Regimes de operação

7.2.1 Regime de velocidade variável

Motores designados para operação em regime de velocidade variável trabalham sobre uma faixa contínua de frequências de operação. Assim, do ponto de vista de projeto, o motor tem a vantagem de operar mais frio em algumas velocidades ao longo da faixa de operação.

7.2.2 Regime de velocidade constante

Motores designados para operação em regime de velocidade constante podem operar continuamente em qualquer velocidade dentro da faixa de operação. No projeto, considera-se que ele trabalhará por um período de tempo indefinido com carga nominal (igual à da frequência-base) na velocidade que resultar na maior elevação de temperatura.

8 Dimensionamento e análise de acionamentos elétricos com velocidade variável – Exemplos práticos

8.1 Aplicação com compressor (torque constante)

8.1.1 Exemplo

Dimensionar o motor de indução de gaiola WEG Standard autoventilado para operar com qualquer inversor de frequência WEG do tipo PWM na faixa de rotação de 180 a 1800 rpm, acionando um compressor com torque resistente de 3,5 kgfm. Deseja-se elevação de temperatura de 80 K nos enrolamentos do motor.

Dados gerais:

- Rede: 380 V / 60 Hz / Trifásica
- Ambiente: temperatura máxima 40°C; 1000 m altitude;

atmosfera normal

▫ Inversor CFW-09: $tr = 0,1 \mu s$; $f_{chav} = 5 \text{ kHz}$

8.1.2 Resolução

8.1.2.1 Quanto à elevação de temperatura (derating)

Os compressores caracterizam-se por possuírem torque constante em toda a faixa de variação da rotação. O dimensionamento do motor deve ser realizado para a pior situação de funcionamento, neste exemplo, o ponto de menor rotação, pois a ventilação do motor é mínima e a demanda de torque continua constante.

Considerando que a rotação varia de 180 rpm a 1800 rpm e que a frequência base de operação é 60 Hz, então o motor escolhido deve ter 4 polos.

Desprezando o escorregamento, a potência exigida pela carga no ponto base de operação será:

$$T_L (\text{kgfm}) = \frac{716 \cdot P(\text{cv})}{n(\text{rpm})} \quad P = \frac{3,5 \cdot 1800}{716} = 8,8 \text{ cv}$$

No entanto, a pior situação de funcionamento deste motor autoventilado quanto à elevação de temperatura ocorre na rotação de 180 rpm, na qual a frequência é de apenas 6 Hz (a menor dentro da faixa de operação) e a ventilação é mínima. Portanto, deve-se calcular a redução de torque para esta rotação.

De acordo com os critérios WEG de redução de torque (item 6.4.1.2), para que se obtenha elevação de temperatura da classe B na frequência de operação de 6 Hz, deve-se reduzir o torque do motor em 60%. Considera-se neste caso condição de V/f constante, pois a solicitação está para qualquer inversor de frequência WEG e a solução fluxo ótimo só é possível com motores de Alto Rendimento WEG alimentados por inversores WEG versão 2.40 ou posterior.

$$f = 6 \text{ Hz} \quad f/f_n = 6/60 = 0,10 \text{ p.u.}$$

$$f/f_n = 0,10 \text{ p.u.} \quad Tr = 0,6 \text{ p.u.}$$

Ou seja, na rotação de 180 rpm o motor poderá fornecer apenas 60% do seu torque nominal. No entanto, como a exigência da carga é de torque constante e igual ao torque nominal (torque na frequência base) em toda a faixa de variação da rotação, sobredimensiona-se o torque do motor conforme o derating calculado.

$$T = \frac{T_L}{Tr} = \frac{3,5}{0,6} = 5,83 \text{ kgfm}$$

Logo, a potência nominal do motor será:

$$P = \frac{5,83 \cdot 1800}{716} = 14,66 \text{ cv}$$

Consultando o Catálogo Geral de Motores Trifásicos WEG para 1800 rpm e 60 Hz, o motor ideal para essa aplicação é de 15 cv - 4 polos - 60 Hz - carcaça IEC 132M.

Uma solução alternativa seria utilizar ventilação independente. Nesse caso não haveria necessidade de

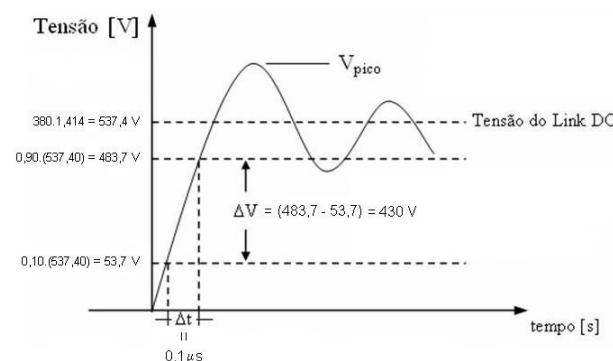
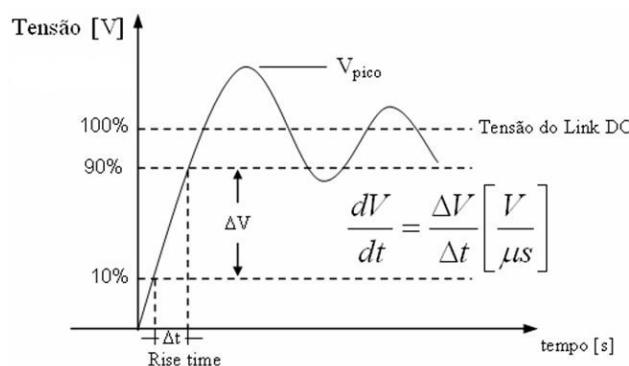
sobredimensionamento e um motor de 10 cv – 4 polos (carcaça IEC 132S) atenderia satisfatoriamente às exigências da aplicação.

Com isso, garante-se que a elevação de temperatura do motor, para qualquer ponto de operação da carga, será menor ou igual a 80 K.

8.1.2.2 Quanto ao sistema de isolamento

Pelo critério NEMA tem-se a seguinte situação:

Tensão nos terminais do motor:



motores com tensão nominal igual a 380 V suportam:

- dV/dt até 5200 V/ μ s nos terminais do inversor. Portanto, satisfazem às exigências da aplicação deste exemplo.
- $tr \geq 0,1 \mu$ s nos terminais do inversor. Portanto, satisfazem às exigências da aplicação deste exemplo.
- $V_{pico} \leq 1430$ V nos terminais do motor. Se essa condição não for respeitada após a instalação do conjunto, deverão ser utilizados filtros na saída do inversor.

A frequência de chaveamento de 5 kHz do exemplo também está conforme recomendação da WEG. Portanto, o motor projetado atende às exigências da aplicação.

Pelo critério IEC, porém, não será possível avaliar a questão, uma vez que requer a medição da tensão nos terminais do motor e, como o motor ainda está sendo dimensionado para a aplicação, supõe-se que a instalação não está pronta, inviabilizando, portanto, a realização de medições na entrada do motor e o conhecimento dos valores de tensão de pico e

rise time nos seus terminais. Esses valores dependerão do tipo e do comprimento do cabo utilizado na instalação.

8.1.2.3 Quanto à proteção para os mancais

De acordo com os critérios WEG de proteção contra correntes circulando nos mancais, a proteção para os mancais de motores normais é opcional a partir da carcaça 315 IEC. O motor selecionado é da carcaça 132 IEC e, portanto, não necessita sistema de aterramento entre eixo e carcaça e nem rolamentos isolados.

8.1.2.4 Quanto ao ruído

O ruído produzido pelo motor, quando alimentado por inversor, poderá aumentar em até 11 dB(A), considerando que será utilizado o modo escalar de controle do inversor.

8.2 Aplicação com bomba centrífuga - torque quadrático

8.2.1 Exemplo

Dimensionar um motor de indução de gaiola WEG TEFC NEMA Premium Efficiency para operar com inversor de frequência WEG do tipo PWM com controle vetorial, acionando uma bomba centrífuga de 10 cv e rotação máxima de 2700 rpm.

Dados gerais:

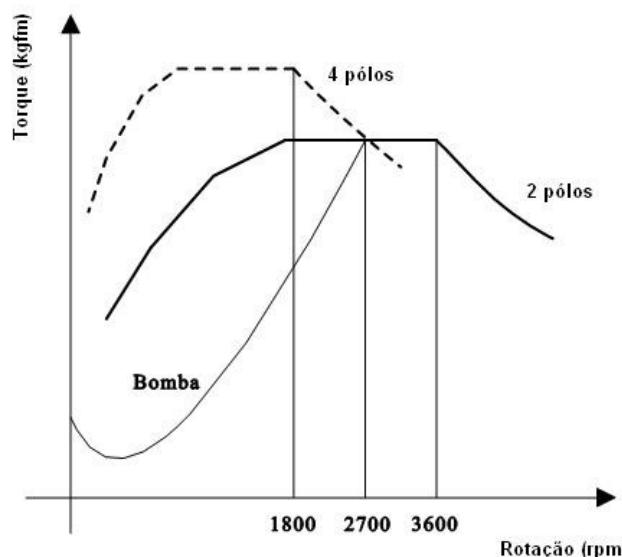
- Rede: 460 V / 60 Hz / Trifásica
- Ambiente: temperatura máxima 40°C; 1000 m altitude; atmosfera normal
- Inversor CFW-09: $tr = 0,1 \mu$ s; $f_{chav} = 2,5$ kHz

8.2.2 Resolução

8.2.2.1 Quanto à elevação de temperatura (derating)

As bombas caracterizam-se por possuírem um torque que varia quadraticamente com a rotação e, consequentemente, uma potência que varia com o cubo da rotação. Neste caso, o dimensionamento do motor deve ser realizado para a rotação máxima de funcionamento da bomba, pois neste ponto é que ocorre a maior exigência de torque para o motor.

Conforme pode ser visto na figura a seguir, existem duas alternativas de dimensionamento: um motor 2 polos ou um motor 4 polos. O motor de 2 polos operaria na região de torque constante, abaixo da sua rotação nominal. O motor de 4 polos, por outro lado, operaria na sua região de enfraquecimento de campo, isto é, acima da sua rotação nominal.



O torque resistente da bomba na rotação máxima é dado por:

$$T_b = \frac{10.716}{2700} = 2,65 \text{ kgfm}$$

Motor 2 polos

2700 rpm = 0.75 p.u. à 45 Hz

Segundo os critérios de torque para motores TEFC NEMA Premium Efficiency WEG (item 6.4.1.1), em aplicações com cargas de torque variável, qualquer motor NPE está apto à operação 1000:1, ou seja, pode trabalhar sem derating em toda a faixa de operação. Dessa forma, o fator de derating vale 1.0.

$$T_{2p} = \left| \frac{\frac{\partial T_b}{\partial f}}{\frac{\partial f}{\partial s}} \right| = 2,65 \text{ kgfm} = 25.99 \text{ Nm} = 19.17 \text{ lbft}$$

Consultando o WEG NEMA Motor Catalog, o motor trifásico IP55 NEMA Premium Efficiency mais adequado é o 15 hp (11 kW) – 2 polos – 60 Hz – carcaça NEMA 254 T.

Motor 4 polos

2700 rpm = 1.50 p.u. à 90 Hz

Segundo os critérios de torque para motores TEFC NEMA Premium Efficiency WEG (item 6.4.1.1), em aplicações com cargas de torque variável, qualquer motor NPE está apto à operação com potência constante de 60 até 90 Hz. Para 90 Hz, o fator de derating de torque vale então (1.5)⁻¹.

$$T_{4p} = \left| \frac{\frac{\partial T_b}{\partial f}}{\frac{\partial f}{\partial s}} \right| = \frac{2,65 \text{ kgfm}}{\frac{1}{1.5}} = 3.98 \text{ kgfm} = 39.06 \text{ Nm} = 28.79 \text{ lbft}$$

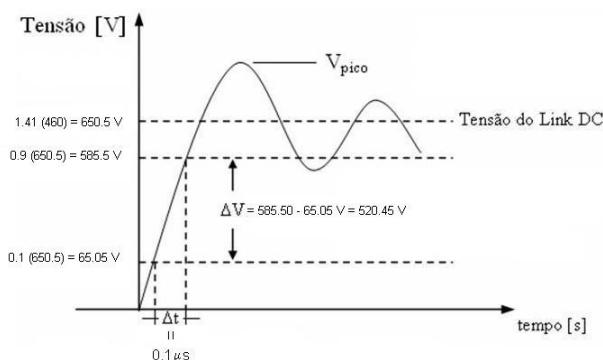
Também pelos critérios de torque máximo WEG (item 6.4.3), verifica-se que o motor estará apto a atender às exigências da operação.

Consultando o WEG NEMA Motor Catalog, o motor trifásico IP55 NEMA Premium Efficiency mais adequado é o 10 hp (7.5 kW) – 4 polos – 60 Hz – carcaça NEMA 215 T.

Portanto, avaliando-se técnica e economicamente, o melhor motor para esta aplicação será o de 7.5 kW (10 hp) / 4 polos / 60 Hz / 460 V / Carcaça 215T.

8.2.2.2 Quanto ao sistema de isolamento

Pelo critério NEMA tem-se a seguinte situação nos terminais do inversor:



$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{520.45 \text{ V}}{0.1 \text{ ms}} @ 5200 \text{ V/ms}$$

De acordo com os critérios de isolamento WEG (item 6.6), os motores com tensão nominal igual a 460 V suportam:

- dV/dt até 5200 V/μs nos terminais do inversor. Portanto, satisfazem às exigências da aplicação deste exemplo.
- $t_r \geq 0.1 \mu\text{s}$ nos terminais do inversor. Portanto, satisfazem às exigências da aplicação deste exemplo.
- $V_{pico} \leq 1430 \text{ V}$ nos terminais do motor. Se essa condição não for respeitada após a instalação do conjunto, deverão ser utilizados filtros na saída do inversor.

A frequência de chaveamento recomendada pela WEG é de até 5 kHz. Portanto, atende à necessidade desta aplicação.

Portanto, em relação ao sistema de isolamento, o motor escolhido atende às exigências da aplicação.

Pelo critério IEC, porém, não será possível avaliar a questão, uma vez que requer a medição da tensão nos terminais do motor e, como o motor ainda está sendo dimensionado para a aplicação, supõe-se que a instalação não está pronta, inviabilizando, portanto, a realização de medições na entrada do motor e o conhecimento dos valores de tensão de pico e *rise time* nos seus terminais. Esses valores dependerão do tipo e do comprimento do cabo utilizado na instalação.

8.2.2.3 Quanto à proteção para os mancais

De acordo com os critérios WEG de proteção contra correntes circulando nos mancais, a proteção para os mancais de motores normais é opcional a partir da carcaça 504 NEMA. O motor selecionado é da carcaça 215 NEMA e, portanto, não necessita sistema de aterramento entre eixo e carcaça e nem rolamentos isolados.

8.3 Aplicação especial – cabo longo

8.3.1 Exemplo

Avaliar os picos de tensão nos terminais de um motor especial WEG, com os seguintes dados de placa: 9 kW – 2115 rpm – 500 V – 72 Hz. Por questões intrínsecas à aplicação, o motor precisa ser alimentado por um inversor PWM através de um cabo com 100 metros de comprimento.

8.3.2 Resolução

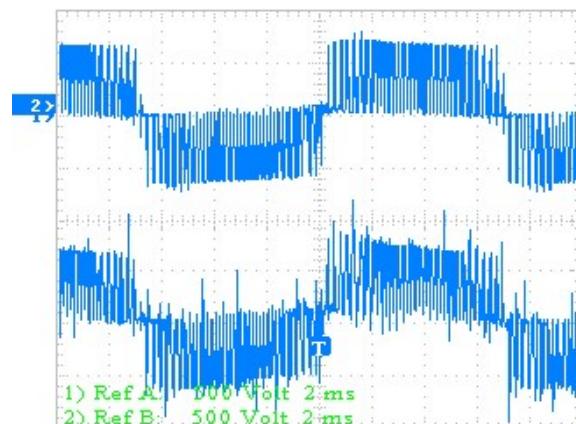
Supondo-se que os critérios de elevação de temperatura, proteção para os mancais e ruído já tenham sido verificados e sejam atendidos pelo motor projetado, resta verificar se o isolamento do mesmo suportará as condições da aplicação. Em função do grande comprimento do cabo, existe a possibilidade de ocorrerem picos de tensão (*overshoots*) excessivos nos terminais do motor e por isso especial atenção deve ser dada à questão do isolamento. Para avaliar a questão, deve-se considerar a mais elevada rotação do motor dentro da faixa de frequências de operação, para que os níveis de tensão chegando a seus terminais sejam máximos e assim os pulsos de tensão produzidos também sejam os maiores possíveis.

De acordo com os critérios de isolamento dos motores WEG (item 6.6), para alimentação 500 V, os motores devem suportar picos de até 1780 V nos seus terminais e um $dV/dt \leq 6500 \text{ V}/\mu\text{s}$.

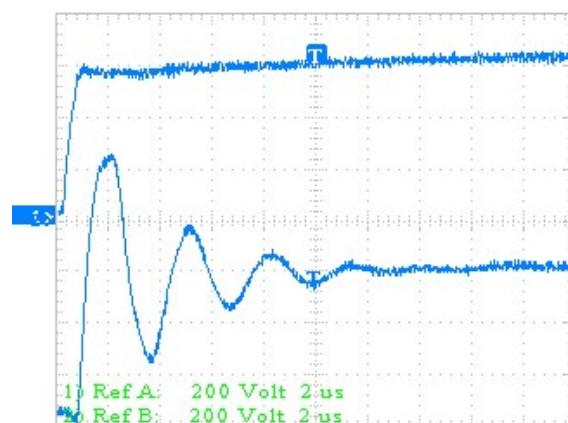
Nesse caso é possível analisar os picos de tensão nos terminais do motor, conforme requer o critério IEC, pois a instalação já existe, ou seja, os fatores determinantes da incidência e da gravidade dos *overshoots* estão definidos.

A seguir estão a formas de onda medidas nos terminais de saída do inversor (curvas superiores - sinal PWM antes do cabo) e na entrada do motor (curvas inferiores - sinal PWM após o cabo). É importante ressaltar, que as formas de onda nos terminais do motor seriam outras se outro cabo fosse utilizado. Foram utilizados cabos não-blindados com 4 condutores (3 fases + terra) assimetricamente distribuídos.

O inversor foi alimentado com sinal senoidal de 500 V / 50 Hz e possuía controle escalar e frequência de chaveamento 4 kHz.

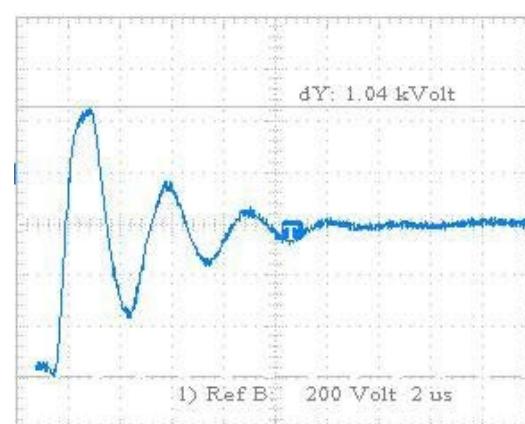


- curva superior: tensão que sai do inversor
- curva inferior: tensão que chega ao motor



Zoom em um pulso de tensão do sinal mostrado ao lado, para análise de tr e Vpico.

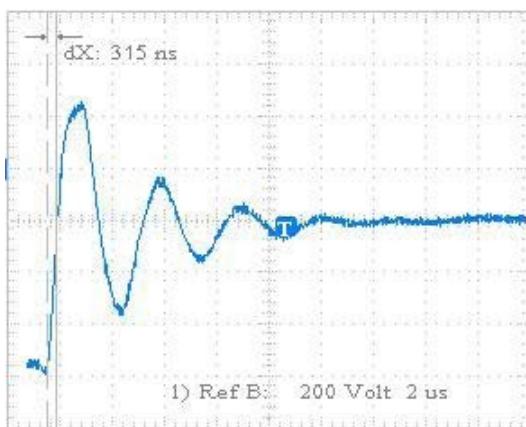
Intensidade do pico nos terminais do motor



$$V_{\text{pico}} \square 1040 \text{ V}$$

Critério WEG ↗ 1780 V (>1040 V) ↗ Ok!
 Critério NEMA ↗ 3,1500 = 1550 V (< 1780 V) ↗ Ok!
 Critério IEC ↗ 1300 V (< 1780 V) ↗ Ok!

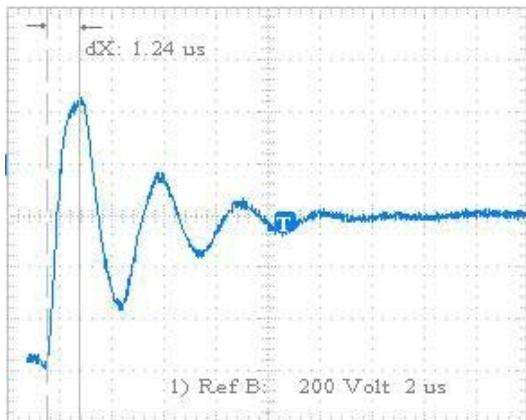
Rise time



$$t_r = 0,8 \cdot 0,315 = 0,25 \mu s = t$$

Critério WEG $t_r > 0,1 \mu s$ (mínimo) nos terminais do inversor \rightarrow OK!

Critério NEMA $t_r > 0,1 \mu s$ (mínimo) nos terminais do inversor \rightarrow OK!



$$t_r = 0,8 \cdot 1,24 = 0,99 \mu s = t$$

Critério IEC t_r nos terminais do motor (não estabelece valor mínimo)

dV/dt

Terminais inversor:

$$\Delta V = 0,8, V_{link DC} = 0,8 (500 \cdot 1,414) = 565,6 V$$

$$\Delta t = 0,25 \mu s$$

$$dV/dt = \Delta V/\Delta t = 2262,7 V/\mu s$$

Terminais motor:

$$\Delta V = 0,8, V_{pico} = 0,8 \cdot 1040 = 832 V$$

$$\Delta t = 0,99 \mu s$$

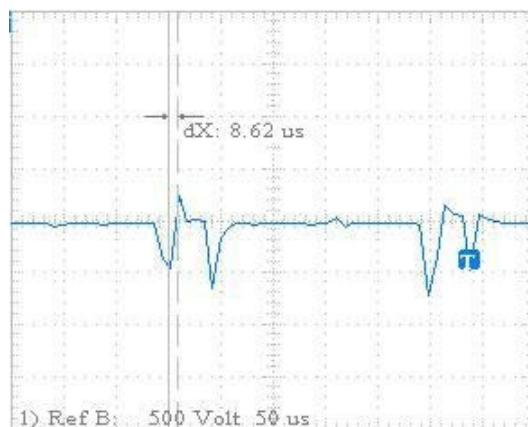
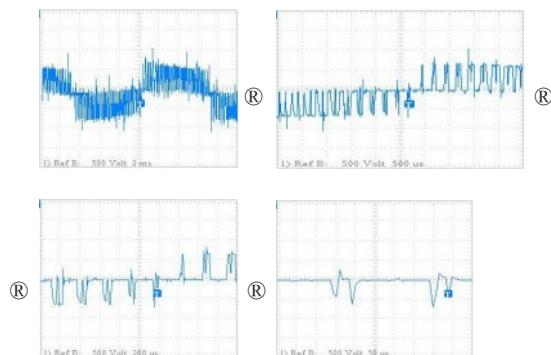
$$dV/dt = \Delta V/\Delta t = 840,4 V/\mu s$$

Critério WEG $dV/dt > 2262,7 V/\mu s$ \rightarrow OK!

Critério NEMA $dV/dt > 2262,7 V/\mu s$ \rightarrow OK!

Critério IEC $dV/dt < 6500 V/\mu s$ ($< 2262,7 V/\mu s$) \rightarrow OK!

Mínimo tempo entre pulsos



$$MTBP = 8,6 \mu s$$

(a forma de onda ao lado é exatamente a mesma das demais figuras deste exemplo, porém, com um zoom conveniente para a observação no mínimo tempo entre pulsos consecutivos).

Critério WEG = $6 \mu s$ (mínimo) \rightarrow OK!

Portanto, neste exemplo, todos os critérios de isolamento WEG são atendidos e a utilização de filtros não é necessária. No entanto, essas conclusões valem estritamente para o conjunto (inversor + motor + cabo) investigado. Como citado anteriormente, a utilização de outro cabo ou outro inversor alteraria os picos de tensão nos terminais do motor.

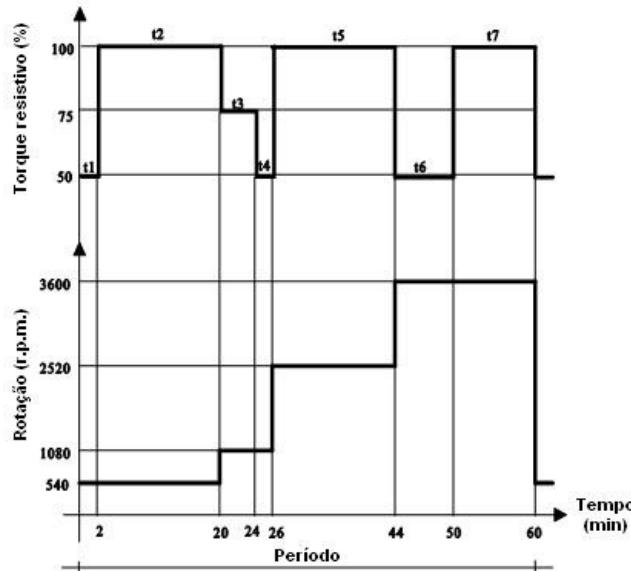
8.4 Aplicação para indústria têxtil (torque variável / velocidade variável)

8.4.1 Exemplo

Dimensionar o motor de indução de gaiola normal WEG autoventilado, acionado por qualquer inversor de frequência WEG do tipo PWM para uso na indústria têxtil, conforme as informações a seguir: Torque resistivo de 5 kgfm a plena carga; faixa de operação de 540 rpm a 3600 rpm; acoplamento direto; ciclo de funcionamento conforme abaixo. Deseja-se elevação de temperatura da classe B (80 K) nos enrolamentos.

Dados gerais:

- Rede: 380 V / 60 Hz / Trifásica
- Ambiente: temperatura máxima 40 °C, altitude 1000 m, atmosfera normal



8.4.2 Resolução

Considerando que a faixa de variação da rotação é de 540 rpm a 3600 rpm e que a frequência base de operação é de 60 Hz, então o motor escolhido deve possuir 2 polos, pois polaridades maiores conduziriam a frequências elevadas de operação e a problemas crescentes de perda de torque a partir de 60 Hz.

Na frequência base, a potência demandada pela carga desconsiderando o escorregamento, será:

$$P_{(CV)} = \frac{Tr (\text{kgfm}) \cdot n (\text{rpm})}{716} = \frac{5.3600}{716} = 25,14 \text{ cv}$$

De acordo com os critérios WEG de redução de torque para motores normais na condição de fluxo constante - V/f constante (item 6.4.1.2) em 60 Hz (1 p.u.) o torque deve ser reduzido para 0,95 p.u. para manter a temperatura do motor dentro dos limites da classe B. Como não é possível, contudo, reduzir o torque nominal da carga em 5%, pois ela exige torque constante, e não se deseja usar ventilação independente, opta-se pelo sobredimensionamento do motor. Assim, a potência nominal do motor deverá ser 5% maior do que a considerada inicialmente:

$$P = \frac{25,14}{0,95} = 26,46 \text{ cv}$$

Consultando o Catálogo Geral de Motores Elétricos WEG, o motor que melhor se aplica à situação possui 30 cv e 2 polos. Se o regime de funcionamento da máquina acionada fosse contínuo, com carga nominal e sem variação de rotação, o dimensionamento estaria bem feito e concluído aqui. O ciclo de funcionamento efetivo, entretanto, envolve

diferentes percentuais de carga e variação de rotação. Dessa forma, para um dimensionamento térmico adequado, deve-se analisar a demanda da carga em cada condição de operação e, posteriormente, calcular o torque equivalente do motor para todo o ciclo de funcionamento. Uma vez obtido o torque equivalente, deve-se assegurar que o motor selecionado será capaz de fornecer a máxima potência solicitada no regime. Assumindo-se que a elevação de temperatura seja diretamente proporcional às perdas e que as perdas Joule sejam preponderantes, então as perdas variam com o quadrado da corrente e vale a equação abaixo:

$$T_{eq} = \sqrt{\sum_{i=1}^7 \left[\frac{T_i}{df_i} \right] \frac{s^2}{\sum_{i=1}^7 t_i}}$$

onde,

T_{eq} : torque equivalente do motor

T_i : torque exigido pela carga em cada rotação do ciclo de funcionamento

df_i : fatores de derating a serem aplicados em cada rotação do ciclo de funcionamento, considerando o aumento na elevação de temperatura do motor devido às harmônicas e à redução na ventilação;

t_i : período ou tempo de funcionamento em cada trecho do ciclo, considerado como abaixo.

$$t_i = t_{if} + t_{ip}/k_v$$

t_{if} : intervalos de tempo em que o motor está operando (em carga ou vazio)

t_{ip} : soma dos intervalos de tempo em que o motor está parado

k_v : constante que depende do resfriamento do motor.

Quando a ventilação independe da operação do motor (por exemplo, motores TENV), então $k_v=1$. Quando a ventilação está vinculada ao funcionamento do motor (por exemplo, motores TEFC), então $k_v=3$.

Portanto, é necessário calcular o fator de derating (df) para cada trecho do ciclo de funcionamento:

Trecho (i)	1	2	3	4	5	6	7
Período [min]	2	18	4	2	18	6	10
Torque p.u.	0,50	1,00	0,75	0,50	1,00	0,50	1,00
Torque [kgfm]	2,50	5,00	3,75	2,50	5,00	2,50	5,00
Rotação [rpm]	540	540	1080	1080	2520	3600	3600
Frequência [Hz]	9	9	18	18	42	60	60
Frequência p.u.	0,15	0,15	0,30	0,30	0,70	1,00	1,00
Fator Derating* (df)	0,65	0,65	0,77	0,77	0,91	0,95	0,95

* Conforme os critérios WEG de redução de torque para motores normais na condição de fluxo constante (item 6.4.1.2)

Assim,

$$T_{eq} = \sqrt{\left(\frac{2,50}{0,65}\right)^2 + \left(\frac{5,00}{0,65}\right)^2 + \left(\frac{7,50}{0,77}\right)^2 + \left(\frac{10,00}{0,91}\right)^2 + \left(\frac{12,50}{0,95}\right)^2 + \left(\frac{15,00}{0,95}\right)^2 + \left(\frac{17,50}{0,95}\right)^2 + \left(\frac{20,00}{0,95}\right)^2 + \left(\frac{22,50}{0,95}\right)^2 + \left(\frac{25,00}{0,95}\right)^2 + \left(\frac{27,50}{0,95}\right)^2 + \left(\frac{30,00}{0,95}\right)^2} \cdot 10$$

$$T_{eq} = \sqrt{\left(\frac{2,50}{0,65}\right)^2 + \left(\frac{5,00}{0,65}\right)^2 + \left(\frac{7,50}{0,77}\right)^2 + \left(\frac{10,00}{0,91}\right)^2 + \left(\frac{12,50}{0,95}\right)^2 + \left(\frac{15,00}{0,95}\right)^2 + \left(\frac{17,50}{0,95}\right)^2 + \left(\frac{20,00}{0,95}\right)^2 + \left(\frac{22,50}{0,95}\right)^2 + \left(\frac{25,00}{0,95}\right)^2 + \left(\frac{27,50}{0,95}\right)^2 + \left(\frac{30,00}{0,95}\right)^2} \cdot 10$$

$$T_{eq} = \sqrt{\frac{(3,85)^2 + (7,69)^2 + 18 + (4,87)^2 + 4 + (3,25)^2 + 2 + (5,49)^2 + 18 + (2,63)^2 + 6 + (5,26)^2 + 10}{(2+18+4+2+18+6+10)}} = \sqrt{\frac{2072,60}{60}} = 5,88 \text{ kgfm}$$

Assim,

$$T_{eq} = \sqrt{\left(\frac{2,50}{1,00}\right)^2 + \left(\frac{5,00}{1,00}\right)^2 + \left(\frac{7,50}{1,00}\right)^2 + \left(\frac{10,00}{1,00}\right)^2 + \left(\frac{12,50}{1,00}\right)^2 + \left(\frac{15,00}{1,00}\right)^2 + \left(\frac{17,50}{1,00}\right)^2 + \left(\frac{20,00}{1,00}\right)^2 + \left(\frac{22,50}{1,00}\right)^2 + \left(\frac{25,00}{1,00}\right)^2 + \left(\frac{27,50}{1,00}\right)^2 + \left(\frac{30,00}{1,00}\right)^2} \cdot 10$$

$$T_{eq} = \sqrt{\frac{(2,50)^2 + (5,00)^2 + 18 + (3,75)^2 + 4 + (2,50)^2 + 2 + (5,00)^2 + 18 + (2,50)^2 + 6 + (5,00)^2 + 10}{(2+18+4+2+18+6+10)}} = \sqrt{\frac{1268,75}{60}} = 4,60 \text{ kgfm}$$

Logo, a potência exigida pela carga será:

$$P = \frac{5,88 \times 3600}{716} = 29,60 \text{ cv}$$

Consultando o manual de motores trifásicos WEG para 3600 rpm e 60 Hz, o motor ideal para esta aplicação é de 30 cv, 2 polos, 60 Hz, carcaça 160L.

8.5 Exemplo considerando a utilização da Solução Fluxo Ótimo WEG

8.5.1 Exemplo

Para a mesma aplicação do exemplo anterior, dimensionar um motor de indução de gaiola autoventilado WEG de alto rendimento, acionado por um inversor de frequência WEG CFW-09 versão 2.40 ou posterior. Considerar que a elevação de temperatura desejada nas bobinas seja 105 K.

8.5.2 Resolução

Observando a linha do motor (Alto Rendimento Plus) e as características do inversor (CFW-09 versão 2.40 ou posterior), percebe-se que neste caso será possível utilizar a solução fluxo ótimo. Este exemplo pretende evidenciar as vantagens proporcionadas pela utilização da Solução Fluxo Ótimo.

É necessário calcular novamente o fator de derating (df) para cada trecho do ciclo de funcionamento, mas desta vez de acordo com os critérios WEG de redução de torque para motores Alto Rendimento Plus na condição de fluxo ótimo (item 6.4.1.2), considerando a elevação de temperatura da classe F.

Trecho (i)	1	2	3	4	5	6	7
Período [min]	2	18	4	2	18	6	10
Torque p.u.	0,50	1,00	0,75	0,50	1,00	0,50	1,00
Torque [kgfm]	2,50	5,00	3,75	2,50	5,00	2,50	5,00
Rotação [rpm]	540	540	1080	1080	2520	3600	3600
Frequência [Hz]	9	9	18	18	42	60	60
Frequência p.u.	0,15	0,15	0,30	0,30	0,70	1,00	1,00
Fator Derating* (df)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

* Conforme os critérios WEG de redução de torque para motores normais na condição de fluxo constante (item 6.4.1.2).

Logo, a potência exigida pela carga será:

$$P = \frac{4,60 \times 3600}{716} = 23,12 \text{ cv}$$

Consultando o manual de motores trifásicos WEG para 3600 rpm e 60 Hz, o motor ideal para esta aplicação é de 25 cv, 2 polos, 60 Hz, carcaça 160M. Percebe-se, portanto, que neste exemplo a Solução Fluxo Ótimo oferece uma melhor utilização da energia, permitindo que um motor de carcaça menor atenda à aplicação, sem uso de ventilação forçada ou sobredimensionamento.

9 Recomendações para a realização de medições de formas de onda do tipo PWM

9.1 Advertência

As medições das quais tratam este capítulo envolvem níveis potencialmente letais de tensão e corrente elétrica. Apenas pessoas qualificadas, familiares com a construção e operação dos equipamentos e riscos envolvidos devem realizar tais medições.

9.2 Instrumentação

Conforme já mencionado, inversores de frequência fornecem aos motores formas de onda moduladas por largura de pulso, as quais são não senoidais. As medições de tais formas de onda requerem instrumentos especiais, apropriados a essa condição, para que possam ser confiáveis. Modernos instrumentos digitais de medição, que sejam aptos a ler valores eficazes verdadeiros (true rms) devem ser usados. Alguns deles, contudo, não conseguem medir a componente fundamental das formas de onda PWM. Instrumentos de medição de harmônicas com taxas de amostragem suficientemente elevadas são capazes de medir tanto o valor eficaz quanto o valor fundamental das tensões e correntes PWM. Na maioria dos casos é conveniente usar um osciloscópio com ponteiras de prova isoladas e largura de banda adequada.

9.3 Medição de parâmetros

De acordo com o NEMA Application Guide for AC ASD Systems, a instrumentação recomendada para a medição dos diversos parâmetros de interesse deve atender os requisitos apresentados na tabela a seguir.

Instrumentação recomendada para a medição de formas de onda em ambiente PWM

Parâmetro	Medição típica	Instrumentação requerida
Tensão entrada inversor	Fundamental	Voltímetro analógico ou digital
	Transientes	Osciloscópio com capacidade para 20 MHz ou mais
Tensão saída inversor (entrada motor)	Fundamental	Instrumento capaz de medir a fundamental de uma forma de onda não senoidal
	Transientes de pico e dV/dt	Osciloscópio com taxa de amostragem maior ou igual a 1Ms/s
Corrente entrada inversor	Valor eficaz verdadeiro	Instrumento capaz de medir valores true rms
Corrente saída inversor (entrada motor)	Valor eficaz verdadeiro	Instrumento capaz de medir valores true rms
	Fundamental	Instrumento capaz de medir a fundamental de uma forma de onda não senoidal
Harmônicas tensão entrada	Fundamental + Harmônicas	Analizador de espectro
Harmônicas corrente entrada	Fundamental + Harmônicas	Analizador de espectro

9.4 Considerações em relação ao aterramento

O aterramento do sistema de potência é uma questão crítica, que deve ser observada com atenção. Para que as medições possam ser seguras, confiáveis e livres de interferência é necessário que haja um bom sistema de aterramento. As recomendações dos fabricantes, assim como regulações locais concernentes ao sistema de aterramento devem ser sempre seguidas no projeto e instalação da malha de aterramento.

9.4.1 Aterramento do inversor

O inversor de frequência deve ser solidamente aterrado ao fio terra do sistema de distribuição principal. O condutor terra do controle não deve ser compartilhado com equipamento elétrico de solda ou outro(s) equipamento(s) elétrico(s) de alta corrente (5x a corrente nominal do controle). Se alguma dessas condições existe, deve ser usado um transformador isolador dimensionado para o controle instalado e com o neutro do secundário ligado em estrela solidamente aterrado. Quando existe mais do que um inversor, cada um deles deve ser aterrado diretamente ao terminal terra do sistema – eles não devem ser aterrados em malha ou em série.

9.4.2 Aterramento do motor

O condutor terra de saída pode passar pela mesma calha dos cabos do motor. Mas esse fio deve funcionar como aterramento para o motor e não como o quarto fio condutor de corrente em um circuito de alimentação de motor tipo estrela a quatro fios. A eletrocalha metálica aterrada que carrega os cabos de alimentação pode prover blindagem eletromagnética, mas não fornece um aterramento adequado para o motor; um condutor terra separado deve ser usado para esse fim. O fio terra do motor não deve ser conectado ao conduite metálico.

9.5 Procedimentos de medição

Condições reais de operação (especialmente no que tange à rotação, tipo de controle e frequência de chaveamento) devem ser atendidas no momento de realização das medições. Deve-se levar em conta que rotações mais elevadas implicam níveis mais elevados de tensão e, portanto, a operação na rotação mais alta da faixa de operação provavelmente acarretará os maiores picos de tensão possíveis nos terminais do motor.

9.5.1 Visualização da forma de onda

The correct evaluation of a VSD System strongly depends on a proper analysis of the waveforms measured. The visualization of one cycle (or specific parts of a cycle) of the PWM voltage waveform at the motor terminals gives an idea about the pulses' quality at the motor terminals. For a better verification of the consistency of these pulses, the visualization of two or three cycles is recommended, once it evidences the repetitiveness of such pulses. A detailed analysis of a single pulse finally allows that conclusions about the rise time and the intensity of the peak voltages be found.

9.5.2 Ajuste do fundo de escala do osciloscópio

A melhor escolha de fundo de escala a ser adotado durante as medições depende logicamente da ordem de magnitude das grandezas elétricas a se medir. No entanto, as faixas apresentadas na tabela abaixo são usualmente adequadas para medições em 50 ou 60 Hz e podem servir como orientação inicial.

Sugestões de seleção e ajuste de escala do osciloscópio

Visualização	Eixo "X"	Eixo "Y"
1 ciclo	1 □ 2 ms / div	100 □ 500 V / div
3 ciclo	5 □ 10 ms / div	100 □ 500 V / div
1 pulso	0.1 □ 10 □ s / div	100 □ 500 V / div

9.5.3 Trigger

Osciloscópios são instrumentos normalmente empregados para medição e não para monitoramento de grandezas elétricas. No entanto, o trigger de alguns osciloscópios modernos pode ser convenientemente ajustado para armazenar dados de interesse particular, por exemplo formas de onda de picos de tensão capturadas durante regimes transitentes, tais como os períodos de aceleração e desaceleração. Mais informações sobre essa possibilidade podem ser encontradas no Manual do Usuário do instrumento de medição.

10 Conclusão

O rápido avanço da eletrônica de potência tem permitido que motores de indução, tradicional solução para acionamentos de velocidade contínua, sejam utilizados com sucesso também em aplicações que exijam variação de velocidade. Nestes casos, porém, o motor não deve ser alimentado diretamente pela rede (senoidal), mas por meio de um inversor estático de frequência.

A utilização de motores de indução com inversores eletrônicos apresenta grandes vantagens tanto energéticas quanto econômicas, quando comparada com outras soluções existentes para aplicações industriais de velocidade variável. No entanto, o uso de inversor traz consequências, para as quais os fabricantes de motores precisam estar atentos.

Assim, o crescente número de aplicações com motores de indução operando em regime de velocidade variável - acionados por inversores PWM - exige o bom entendimento do sistema de potência como um todo e das interações que ocorrem entre as partes que o compõem (rede – inversor – motor – carga).

Este Guia Técnico abordou os principais aspectos relacionados com a aplicação de motores de indução de gaiola em conjunto com inversores estáticos de frequência, apresentando fundamentos teóricos e critérios práticos para tópicos específicos, provenientes de estudos e da experiência do corpo técnico da WEG sobre o assunto. Os principais documentos técnicos internacionais relacionados com tais aplicações também são citados e discutidos.

Deve ser ressaltado que os critérios aqui apresentados não são permanentes. Eles mudam à medida que novos materiais são desenvolvidos e novas experiências são executadas, como qualquer tecnologia. Dessa forma, podem acontecer alterações nos critérios de aplicação sem prévio aviso e por isso é importante que este documento seja periodicamente revisto e atualizado.

11 Bibliografia

- ⑨ NEMA MG1 Part 30 - Application considerations for constant speed motors used on a sinusoidal bus with harmonic content and general purpose motors used with adjustable-frequency controls or both (2006)
- ⑨ NEMA MG1 Part 31 - Definite-purpose inverter-fed polyphase motor (2006)
- ⑨ NEMA - Application Guide for AC Adjustable Speed Drive Systems (2001)
- ⑨ IEC 60034-17 - Cage induction motors when fed from converters – application guide (2006)
- ⑨ IEC 60034-25 - Guide for the design and performance of cage induction motors specifically designed for converter supply (2007)
- ⑨ GAMBICA/REMA Technical Guides for Variable Speed Drives and Motors
- ⑨ GAMBICA/REMA Technical Reports for Variable Speed Drives and Motors
- ⑨ Apostila do mini-curso Motores de Indução de Gaiola Alimentados por Inversores de Frequência – Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento do Produto – WEG Equipamentos Elétricos S.A. – Motores
- ⑨ Trabalhos de Tecnologia WEG concernentes ao assunto (TT 2000-002, TT 2003-011)
- ⑨ Catálogo Geral de Motores Elétricos WEG
- ⑨ Manual do Inversor de Frequência CFW-09
- ⑨ Relatórios Técnicos do Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento do Produto – WEG Equipamentos Elétricos S.A. – Motores
- ⑨ Notas Técnicas do Departamento de Desenvolvimento de Produtos – WEG Equipamentos Elétricos S.A. – Automação
- ⑨ Minimização de Perdas em Motores de Indução Alimentados por Inversores de Frequência – Solução Fluxo Ótimo – Waldiberto L. Pires e Hugo G. G. Mello – PCIC BR 2006
- ⑨ Low-Voltage PWM Inverter-Fed Motor Insulation Issues – Michael J. Melfi – IEEE Transactions on Industry Applications, vol.42



WEG Equipamentos Elétricos S.A.
Jaraguá do Sul - SC
Fone (47) 3276-4000 - Fax (47) 3276-4020
São Paulo - SP
Fone (11) 5053-2300 - Fax (11) 5052-4212
motores@weg.net
www.weg.net



27.00/112009 - Sujeito a alterações sem aviso prévio.
As informações contidas são valores de referência.

