

Atuadores

Aula 07 - Efeitos Adversos dos Acionamentos Eletrônicos

Apresentação

Nesta aula, iremos explorar o comportamento adverso dos acionamentos elétricos de motores, abordando de que maneira eles podem atuar negativamente na rede elétrica de energia.

Objetivos

- Analisar as influências dos acionamentos elétricos nas curvas de torque, os efeitos harmônicos e de sobretensão gerados.
- Conhecer os efeitos dos acionamentos sobre o fator de potência.
- Conhecer as perspectivas futuras de controle dessas implicações danosas dos acionamentos.

Preâmbulo

Os acionamentos eletrônicos, como vistos anteriormente, trouxeram uma grande flexibilidade para o condicionamento das grandezas elétricas de alimentação dos motores. Como toda solução técnica, no entanto, essa vantagem vem acompanhada de novos problemas que precisam ser conhecidos e controlados. Esses problemas podem ser divididos em dois grandes grupos, conforme a seguir.

Influência dos Acionamentos Eletrônicos nas Máquinas Elétricas

Ao se variar a frequência do estator, está se variando a velocidade do campo girante. Com isso, pode-se variar a velocidade do rotor mantendo-se constante o escorregamento da máquina e, portanto, as perdas podem ser otimizadas de acordo com as condições de carga.

Curvas de Torque

Normalmente, as características torque x velocidade de um motor de indução não levam em conta a existência de um inversor. A sua presença representa uma limitação em termos da corrente máxima que pode ser fornecida ao motor. A **Figura 1** ilustra o exemplo de um motor de 7,5 kW, 60 Hz, 4 polos. A curva tracejada indica os valores de torque para o caso de operação de curta duração com o inversor escolhido para a potência do motor. A curva "traço longo – traço curto" indica os limites no caso do inversor escolhido ser de uma faixa de potência superior a do motor.

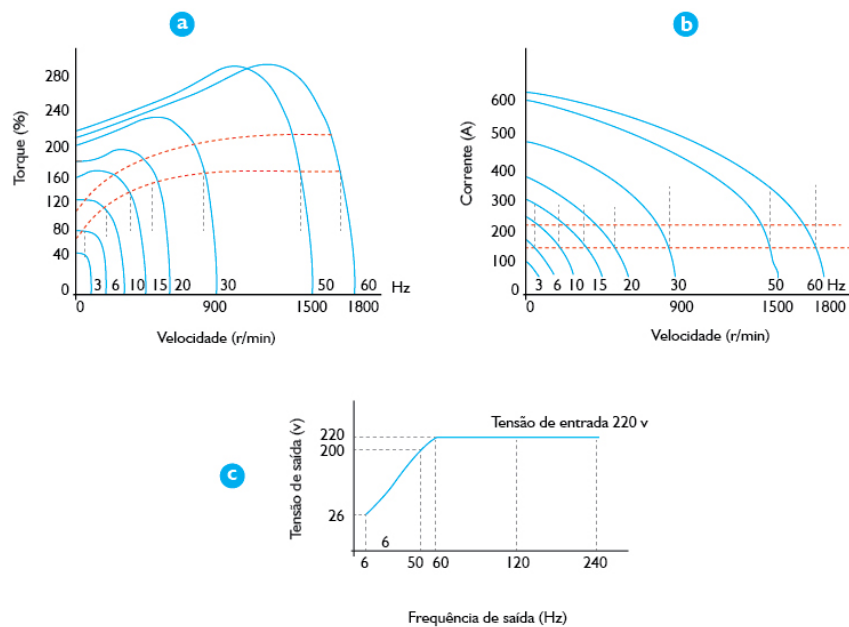


Figura 1 - Características do motor em função da velocidade motor de 7,5 kW, 60 Hz, 4 polos: (a) velocidade x torque; (b) Velocidade x corrente de saída; (c) Curva V/f.
Fonte: Stephan (2013).

As curvas apresentadas na **Figura 1** estão parametrizadas pela frequência de alimentação. É interessante apresentar curvas que tenham a frequência de alimentação não como parâmetro, mas sim como variável independente do eixo das abscissas. Nesse caso, o torque indicado no eixo das ordenadas representa o valor máximo disponível. A **Figura 2** ilustra esse tipo de informação para operação contínua e para operação de curta duração.

Na região de frequência de alimentação superior à frequência nominal, a capacidade de torque decresce, tendo em vista que a tensão de alimentação é mantida em seu valor máximo e, portanto, a razão V/f não fica constante. Na região central, o torque disponível é praticamente constante, voltando a decair na região de baixas frequências de alimentação, quando a queda de tensão na resistência do estator começa a se tornar significativa.

Exemplo 1

Considere o problema de selecionar um motor para acionar uma carga que solicita, em operação contínua, 19 Nm dentro de uma faixa de velocidade de 600 rpm a 1900 rpm. Para a partida do sistema, são necessários 30 Nm.

Inicialmente, é razoável escolher um motor de 4 polos, uma vez que a velocidade síncrona (1800 rpm) encontra-se dentro da faixa de operação desejada. Um motor de 6 polos, com velocidade síncrona de 1200 rpm, também estaria dentro da faixa de velocidades, mas, como será visto adiante, haveria uma grande perda na capacidade de torque nas velocidades mais elevadas. Assim, a escolha do acionamento será feita para um motor de 4 polos com faixa de frequência de operação de 20 Hz, correspondente a 600 rpm, a 63,5 Hz, correspondente a 1905 rpm.

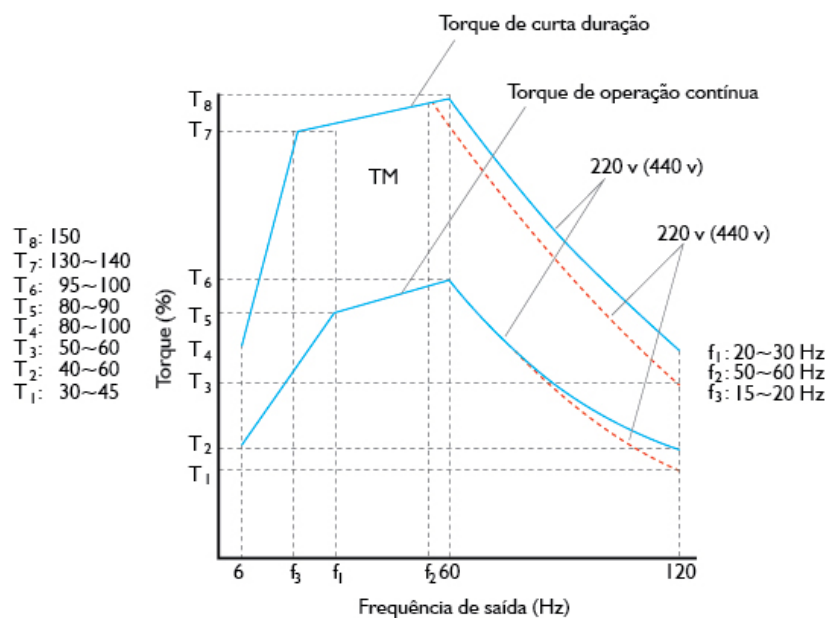


Figura 2 - Característica de torque de saída em função da frequência.

Fonte: Stephan (2013).

Em termos de torque, a **Figura 2** informa que o torque disponível no acionamento eletrônico para a frequência de alimentação de 63,5 Hz é da ordem de 90% do torque nominal. Já para a frequência de 20 Hz é da

ordem de 80% do torque nominal. Tomando o caso mais desfavorável, o motor especificado deve ter um torque nominal de:

$$T_{motor} = \frac{19Nm}{0,8} = 24Nm$$

É preciso ainda verificar se essa escolha seria suficiente para a partida do sistema. Segundo o gráfico da **Figura 2**, é possível atingir um torque de 130% para curta duração e baixa frequência de alimentação. Assim:

$$T_{motor} = 24 \cdot 1800 \cdot \frac{2\pi}{60} = 4,5kW$$

A escolha de um motor de 6 polos conduziria à faixa de frequência de 30 Hz (600 rpm) a 95 Hz (1900 rpm). Portanto, da **Figura 2**, percebe-se que existe uma perda da ordem de 80% do torque nominal, na operação a 600 rpm, e, na operação a 1900 rpm, a perda de capacidade de torque chega a 50%! Isto levaria à escolha de um motor de torque nominal.

$$T_{motor} = \frac{19Nm}{0,5} = 38Nm$$

Portanto, bem pior que a escolha anterior.

Se a carga fosse do tipo ventilador, uma vez que o torque solicitado não seria mais constante, porém proporcional ao quadrado da velocidade, a seleção do motor poderia ser feita considerando apenas o caso de maior velocidade, o que é mais simples que o exemplo apresentado.

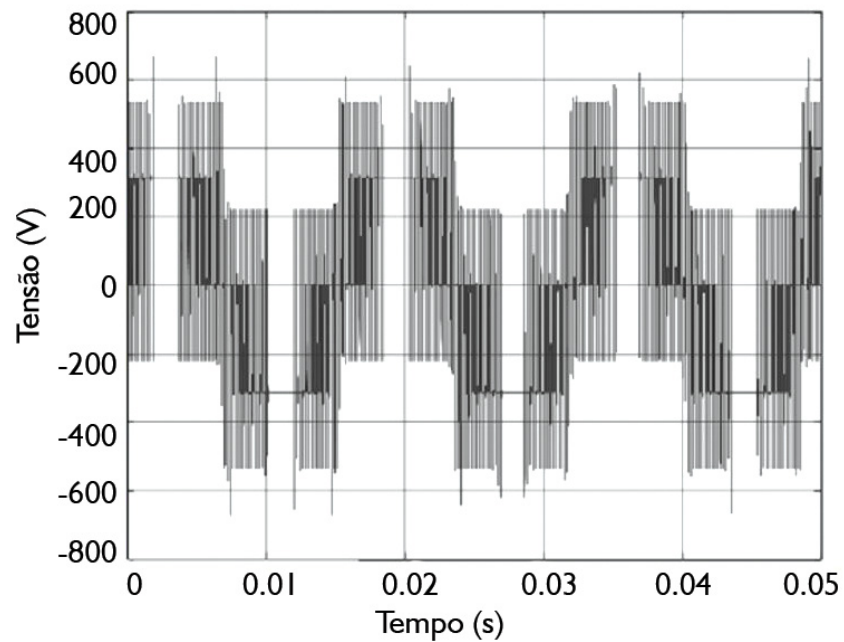
Efeito dos Sinais Harmônicos

Essencialmente, os sinais de tensão e corrente produzidos pelos acionamentos eletrônicos podem ser vistos, na condição de regime permanente, como um sinal fundamental, que se deseja, acompanhado de uma série de sinais em frequências harmônicas não desejáveis. Esse conhecimento resulta diretamente da aplicação da série de Fourier sobre sinais periódicos. As componentes harmônicas produzirão:

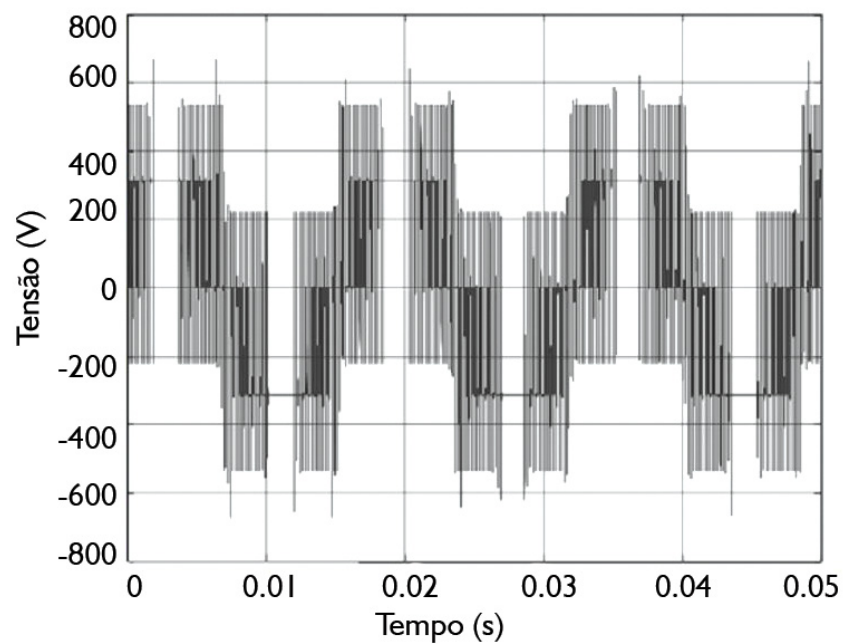
- maior aquecimento dos motores, fator que deve ser considerado se o motor estiver operando no limite da sua

capacidade;

- torques pulsantes;
- interferências eletromagnéticas;
- e correntes de alta frequência circulantes entre estator e rotor, principalmente através dos mancais.



(a)



(b)

Figura 3 - Resposta sem filtro: (a) Saída do inversor; (b) Tensão sobre o motor. **Fonte:** Adaptado de Erickson e Macksinmovic (2004).

Para contornar esse problema, podem ser aplicados filtros junto ao motor ou junto ao acionamento eletrônico, bem como aplicadas técnicas de chaveamento ou adotadas topologias adequadas de conversores eletrônicos. Aqui se ilustra, na **Figura 4**, a solução com um filtro casador de impedâncias conectado aos bornes do motor.

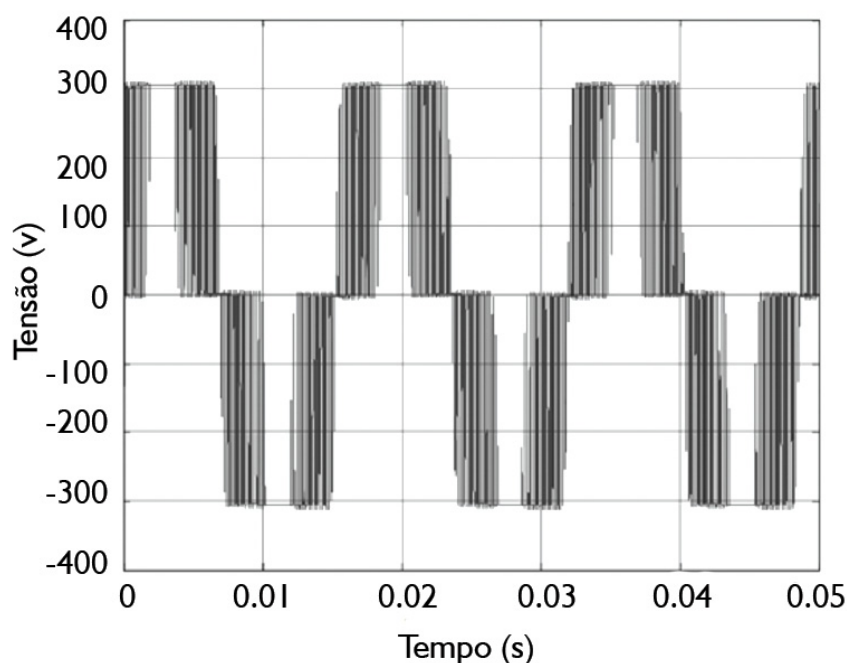


Figura 4 - Resposta com filtro: tensão sobre o motor. **Fonte:** Adaptado de Erickson e Macksinmovic (2004).

Correção do Fator de Potência

O fator de potência é definido como a razão da potência ativa pela potência aparente de entrada do conversor. Como a potência aparente depende do conteúdo harmônico dos sinais, o fator de potência depende não apenas do defasamento entre tensão e corrente fundamentais, conhecido como fator de deslocamento, mas também da distorção harmônica.

Idealmente, o fator de potência pode ser feito aproximadamente unitário escolhendo o método de conversão CA-CC de modo a minimizar a diferença de fase entre a tensão de alimentação e a corrente fornecida,

além de manter a forma desta corrente praticamente senoidal. Soluções deste tipo são caras e só se justificam em aplicações especiais. Em seguida, serão apresentadas algumas informações básicas relativas ao fator de potência com inversores PWM e PAM.

Atividade 01

1. Descubra de que forma é feita na prática a correção de fator de potência através de capacitores e o triângulo de potências.

Inversor PWM (Pulse Width Modulation)

Este inversor está ilustrado pela **Figura 5**, onde os reatores DCL e ACL são usados para atenuar as variações bruscas de corrente e com isso alterar o conteúdo harmônico e, portanto, o fator de potência.

Normalmente, o fator de potência pode ser corrigido para aproximadamente 0,9 ajustando a queda de tensão em ACL para 3 a 5% da tensão de alimentação na corrente nominal do motor.

É importante observar que o fator de potência não pode ser significativamente corrigido com a inclusão de um capacitor em paralelo com a fonte de alimentação, uma vez que este componente só permite uma modificação no defasamento das componentes fundamentais de tensão e corrente (fator de deslocamento), que, no caso de uma ponte retificadora a diodos, praticamente não existe nas aplicações usuais.

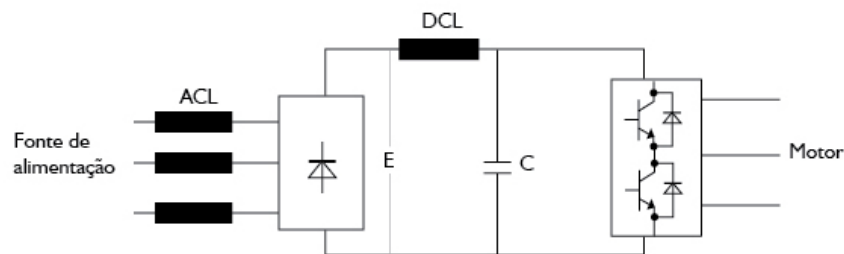


Figura 5 - Inversor PWM.
Fonte: Autoria Própria.

Inversor PAM (Pulse Amplitude Modulation)

Comparativamente à **Figura 5**, a diferença está no retificador de entrada, que na configuração PAM usualmente consiste de um retificador a tiristores controlado. Nesse caso, o fator de deslocamento sofre grandes variações em função do ângulo de disparo dos tiristores, que, por sua vez, controla a tensão na malha intermediária CC. Aqui, em oposição ao que ocorre no inversor PWM, o fator de potência pode ser efetivamente melhorado pela inclusão de um capacitor de correção de fator de potência. Deve-se, no entanto, estar atento às perdas harmônicas neste capacitor.

Quando o inversor PAM for construído com o uso de um *chopper* para controlar a tensão da malha intermediária CC (**Figura 6**), em lugar da ponte retificadora controladora, a entrada do circuito é novamente uma ponte com diodos, como no caso do inversor PWM, e as considerações sobre o fator de potência são então similares às apresentadas anteriormente.

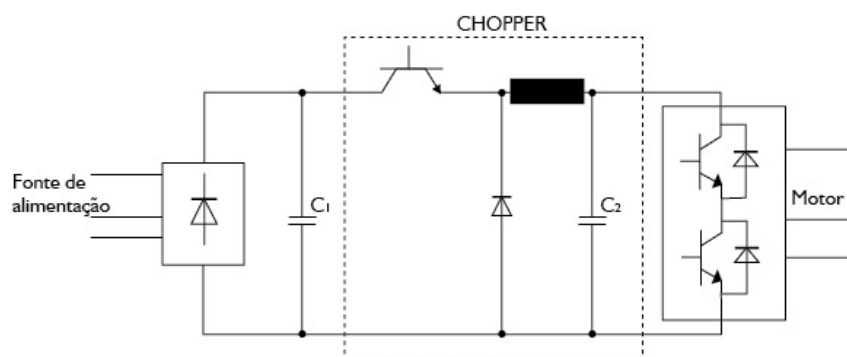


Figura 6 - Inversor PAM com *chopper*
Fonte: Autoria Própria.

Distorções nas Formas de Onda

Além destas considerações sobre fator de potência, procura-se estabelecer limites aceitáveis de THDi (*Total Harmonic Distortion* ou Distorção Harmônica Total da corrente) e THDv (Distorção Harmônica Total da tensão). A norma IEEE-519, bastante aceita para este fim, deposita

a responsabilidade do controle dos harmônicos de tensão sobre a concessionária de energia e a responsabilidade do controle dos harmônicos de corrente no consumidor.

Deve-se destacar que nos sistemas de potência os harmônicos usualmente são de ordem ímpar e sobre os harmônicos de ordem par são colocadas maiores restrições. As tabelas a seguir reproduzem as especificações da norma IEEE-519.

Harmônicos Ímpares de Corrente (I_h/I_1 , %)

I_{sc}/I_1	$11 > h$	$17 > h \geq 11$	$23 > h \geq 17$	$35 > h \geq 23$	$h \geq 35$	THD _i (%)
< 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

Obs.: I_{sc} é o valor da corrente de curto-circuito no ponto de conexão com a concessionária.
Os harmônicos pares estão limitados à 25% dos valores de harmônicos ímpares da tabela.

Harmônicos de Tensão (V_h/V_1 , %)

	2,3-69 kV	69-138 kV	> 138 kV
Máximo harmônico individual	3,0	1,5	1,0
THD _v	5,0	2,5	1,5

Fonte: Stephan (2013).

Os retificadores a tiristores apresentam ainda outro efeito adverso sobre a tensão nos seus terminais, conhecido como "*notch*". Os "*notches*" são oriundos das indutâncias do lado CA dos retificadores e que impedem uma comutação instantânea da corrente de uma fase para a outra durante o processo de retificação.

Durante os períodos de comutação de corrente, duas fases ficam curto-circuitadas originando formas de onda de tensão como as apresentadas na **Figura 7**.

A norma IEEE-519 também limita à profundidade e à área destas regiões em função do tipo de carga alimentada.

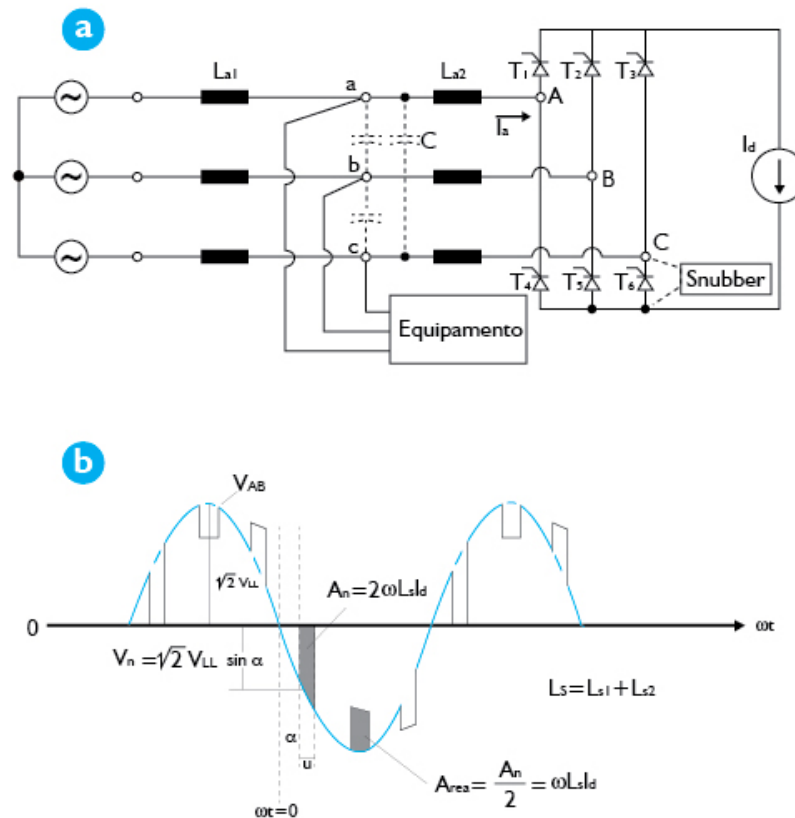


Figura 7 - "Notches" de tensão.

Fonte: Adaptado de Erickson e Macksinmovic (2004).

Perspectivas Futuras

As solicitações por uma engenharia menos agressivas ao meio ambiente vêm marcando as últimas décadas. A eletrônica de potência apresenta muitos dos requisitos necessários para enfrentar este desafio. A substituição dos motores CC por motores CA representa, sem dúvida, um menor consumo de matéria-prima e energia. As aplicações de acionamentos de velocidade variável para conservação de energia são várias. Os campos de aplicação vão do industrial ao doméstico, com grandes possibilidades no setor de transportes, comercial e de sistemas de potência.

As usuais pontes retificadoras a diodos, usadas na maioria dos acionamentos eletrônicos CA, garantem, em condução contínua de corrente, apenas fator de potência fundamental ($\cos \phi_1$) unitário, mas o fator de potência total (Potência Ativa/Potência Aparente) pode estar em

valores bem inferiores a 0,92. Para contornar este problema, a eletrônica de potência oferece soluções do tipo mostrado na **Figura 8**, já comercializada no Brasil pela WEG e conhecidos como "*Active Front End*".

Nestes conversores, em lugar de uma ponte de diodos ou tiristores na conexão com a rede, emprega-se um retificador com a mesma estrutura que um inversor e garante-se, com um controle de chaveamento adequado, fator de potência total unitário e formas de onda de corrente praticamente senoidais. Naturalmente, trata-se de uma solução mais cara, porém dispensa filtros de correção.

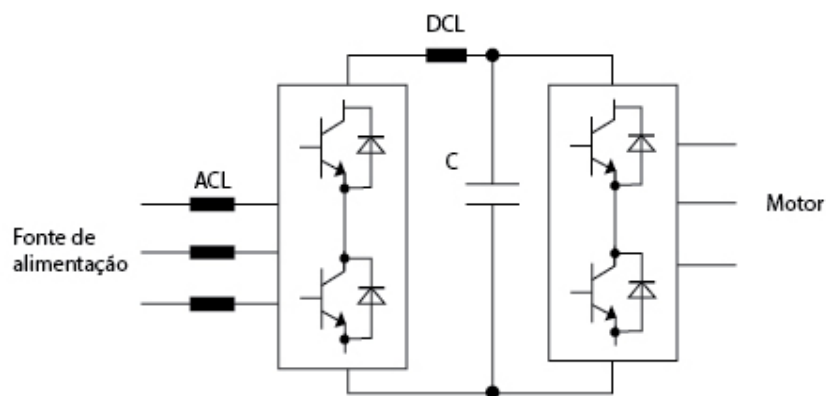


Figura 8 - Conversor com fator de potência unitário.
Fonte: Autoria Própria.

De qualquer modo, o desenvolvimento dos acionamentos estáticos de máquinas elétricas continuará fortemente relacionado aos avanços da eletrônica de potência e da microeletrônica.

Novos dispositivos com capacidade de comando para condução e bloqueio possivelmente substituirão os conversores que empregam tiristores até para potências de 10MW ou superiores.

O grande avanço presenciado na capacidade de processamento de sinais favorecerá o uso, em larga escala, de acionamentos de motores CA, mesmo para baixas potências. Métodos de identificação de parâmetros, autocomissionamento, eliminação de sensores de posição e velocidade, controle adaptativo e controle fuzzy serão acessíveis comercialmente.

Novas tecnologias, como os mencionados "módulos de potência inteligentes", apontam para uma integração do processamento de sinais com a eletrônica de potência. A disponibilidade destes componentes

contribuirá para a diminuição do volume e possivelmente dos preços dos conversores estáticos.

Outras topologias de inversores, que permitem o uso de chaves semicondutoras em níveis de potência mais elevadas sem a necessidade da conexão de dispositivos em série ou paralelo, já são encontradas a nível industrial. Um bom exemplo é o conversor de três níveis.

Deverá ocorrer um grande esforço na padronização dos protocolos de comunicação entre os conversores estáticos e os sistemas digitais de controle distribuído, bem como na comunicação homem-máquina.

Normas para utilização de acionamentos eletrônicos bem como para a determinação de índices de eficiência e de interferência com a rede elétrica, atualmente ainda pouco discutidas, deverão receber maior atenção da comunidade técnica.

Leitura Complementar

Para saber mais, recomendamos a leitura do texto no site da Unicamp no [link](#) sobre os efeitos e causas de harmônicas no sistema de energia elétrica. No [link](#) você encontrará um curso de inversor de frequência, *Soft Start* e automação.

Resumo

Nesta aula, você estudou as implicações negativas decorrentes dos acionamentos de motores elétricos em virtude do uso dos conversores para controle de velocidade. Em seguida, foram explicados os métodos adotados atualmente para a minimização desses efeitos.

Autoavaliação

1. Explique o que você entendeu sobre os efeitos dos acionamentos elétricos de motores nas curvas de torque dos motores.

2. Em relação aos harmônicos, quais as decorrências dos acionamentos?
3. Que tipo de interferência poderiam os inversores causar?
4. Que métodos estão sendo propostos no aprimoramento do controle dos efeitos adversos dos acionamentos?

Referências

BRITO, C. M. C. de, LEÃO, R. P. S. **Desempenho de um motor de indução trifásico submetido a distorções harmônicas na tensão de alimentação**. Disponível em: <http://www.labplan.ufsc.br/congressos/SBSE/anais/001_sbse2006_final.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2013.

ERICKSON, R. W., MAKSIMOVIC, D. **Fundamentals of power electronic**. 2. ed. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 2004.

MAGALHÃES, C. M. S. et al. **Análise da Influência das distorções harmônicas em motores de indução acionando correias transportadoras**. Disponível em: <http://www.sbqee.com.br/cbqee_2007_pdfs/31611.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2013.

STEPHAN, Richard M. **Acionamento, comando e controle de máquinas elétricas**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2013.

WEG Indústrias S/A. **Módulo 1 - Comando e proteção**. Centro de Treinamento de Clientes: [2010].

WEG Indústrias Ltda. **Módulo 2 – Variação de velocidade**. Centro de Treinamento de Clientes: [2010].

WEG Indústrias Ltda. **Motores de indução alimentados por inversores de frequência**: guia técnico. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motores-de-inducao-alimentados-por-inversores-de-frequencia-pwm-027-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 16 ago. 2013.