

PWM 3-Níveis

A Nova Tecnologia para Inversores de Freqüência.

Características, Benefícios e Aplicações

Inicialmente desenvolvida para inversores de média tensão, essa tecnologia chega agora aos inversores de baixa tensão na faixa de 380 a 480V, oferecendo diversas vantagens em relação aos inversores convencionais de 2-Níveis.

Este trabalho foi inicialmente apresentado na PESC 2004 (IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference) ocorrida na cidade de Aachen, Alemanha.

Tradução e adaptação Mário Sergio Di Grazia, da Yaskawa Brasil
Tsuneo Kume, Mahesh Swamy, Hans-Peter Krug, da Yaskawa Corp.

© 2004 IEEE. Traduzido sob permissão

I. INTRODUÇÃO

A tecnologia 3-Níveis, também conhecida internacionalmente como “Neutral Point Clamped (NPC)”, foi inicialmente introduzido por A. Nabae, I. Takahashi e H. Akagi em 1980 e publicado em 1981 [1]. Com essa configuração de circuito, o stress de tensão nos componentes de chaveamento de potência é metade do encontrado nos inversores convencionais de dois níveis. Devido a essa característica, esse circuito é normalmente aplicado em inversores de média e alta tensão. As mais recentes aplicações incluem indústrias siderúrgicas e área de tração elétrica para ferrovias na Europa [2][3] e Japão [4].

Além da capacidade de atuar com alta tensão, o inversor 3-Níveis têm características favoráveis como; tensão fase-fase e de modo comum com pulsos de menor amplitude de tensão, portadora com maior quantidade de pulsos de tensão por ciclo e menor ripple na corrente de saída para a mesma freqüência portadora.

Essas características proporcionam significantes vantagens no acionamento de motores de indução em relação aos inversores de freqüência convencionais de dois níveis, como a redução considerável do stress na isolação dos enrolamentos do motor, redução da corrente de fuga a terra e na corrente de circulação a terra através dos rolamentos e redução no ruído audível do motor. Combinado com sofisticados algoritmos PWM, torna-se possível à melhoria da performance dinâmica do acionamento através do emprego do método de “Observador de Fluxo Dual”.

De maneira a tornar as vantagens acima disponíveis para aplicações gerais, os inversores 3-Níveis foram desenvolvidos para aplicações em baixa tensão [5], [6]. Para sucesso dessa nova topologia desenvolveu-se um exclusivo processo de balanceamento de carga dos capacitores [7].

Detalhes serão apresentados e comentados nas seções a seguir.

II. CONFIGURAÇÃO BÁSICA DO CIRCUITO

A Fig. 1 mostra o circuito de potência de um inversor 3-Níveis. Cada fase tem quatro dispositivos de chaveamento (IGBTs) conectados em serie. Tomando a fase U como exemplo, o circuito se comporta conforme descrito a seguir.

Quando os IGBTs Q_{U1} e Q_{U2} são ligados, a saída U é conectada ao terminal positivo (P) do barramento CC. Quando Q_{U2} e Q_{U3} são ligados, os mesmos são conectados ao ponto médio (O) no barramento CC e quando Q_{U3} e Q_{U4} são

ligados, os mesmos são conectados ao terminal negativo (N). Assim a saída assume três diferentes níveis de tensão, enquanto os inversores convencionais atuam com apenas dois níveis de tensão. A relação entre a seqüência de chaveamento dos IGBTs e a tensão de saída com relação ao ponto médio é ilustrada na Tabela 1.

Capacitores são conectados em serie de forma a se obter o ponto médio, responsável pela criação da tensão zero de saída. Essa conexão em serie é largamente utilizada em inversores da classe 400V(380 a 480V), em virtude da indisponibilidade de obtenção de capacitores eletrolíticos de tensão de trabalho mais elevada. Um ponto importante nessa topologia é manter o balanceamento de carga nos capacitores, pois a corrente irá fluir em diversas direções a partir do ponto médio.

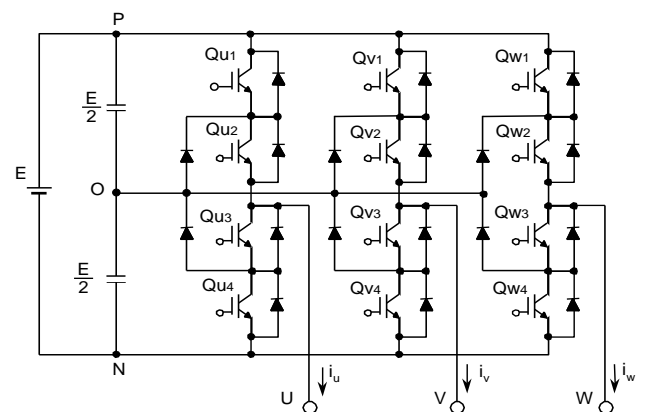


Fig. 1. Topologia dos inversores 3-Níveis.

Tabela 1. RELAÇÃO ENTRE CHAVEAMENTO E TENSÃO

	Q_{u1}	Q_{u2}	Q_{u3}	Q_{u4}	V_u
Estado dos IGBT's	ON	ON	OFF	OFF	+E/2
	OFF	OFF	ON	ON	-E/2
	OFF	ON	ON	OFF	0

De forma a ilustrar as formas de onda de saída de tensão, consideremos o sinal de referencia do PWM para as fases U, V e W como,

$$e_U = A \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$e_V = A \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (2)$$

$$e_W = A \sin(\omega t - 240^\circ) \quad (3)$$

onde A é o indexador de modulação. Assume-se a não existência de injeção de componentes da terceira harmônica de forma a melhorar a utilização da tensão do barramento CC.

As formas de onda da tensão de saída variam de acordo como indexador de modulação e do ângulo de fase. Para ilustrar o comportamento da tensão de saída, vamos adotar o indexador de modulação A igual a 1.0, o que significa que a tensão total de comando é aplicada. Consideremos ainda o ângulo de fase ωt igual a 75° para a fase U. Essa condição é mostrada na Fig. 2, onde as tensões de fase em “per-unit” são expressas como,

$$E_U = 1.0 \sin 75^\circ = 0.966 \quad (4)$$

$$E_V = 1.0 \sin(75^\circ - 120^\circ) = -0.707 \quad (5)$$

$$E_W = 1.0 \sin(75^\circ - 240^\circ) = -0.259 \quad (6)$$

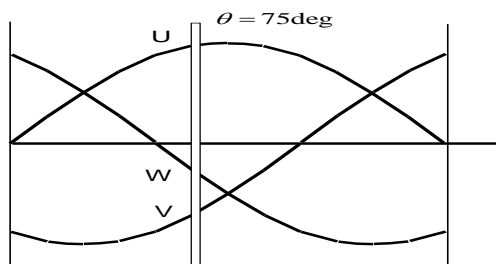


Fig. 2. Escolha do ângulo de fase para ilustração das formas de onda

A Figura 3 a seguir ilustra, as formas de onda da tensão de fase em relação ao ponto médio, a tensão de linha e a tensão de modo comum para um ciclo PWM.

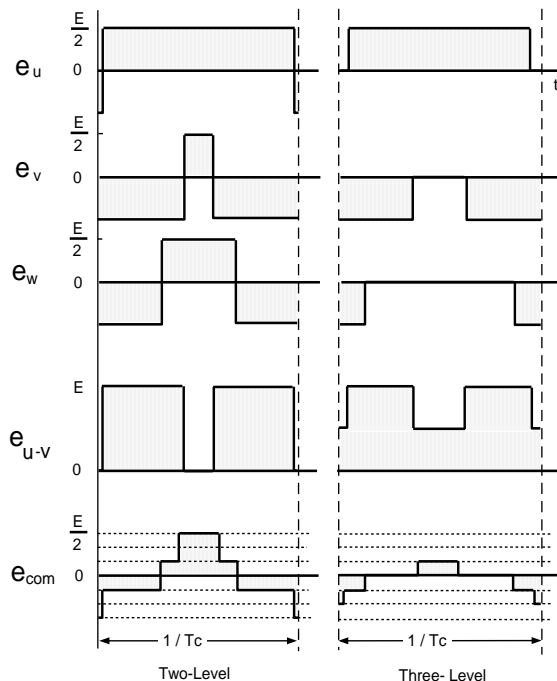


Fig. 3. Comparação entre as formas de onda de tensão dos inversores 2-Níveis (Two Level) e 3-Níveis (Three Level)

Na Fig. 3, T_c é o período de um ciclo PWM.

A tensão de linha e_{u-v} é definida como segue;

$$e_{u-v} = e_u - e_v \quad (7)$$

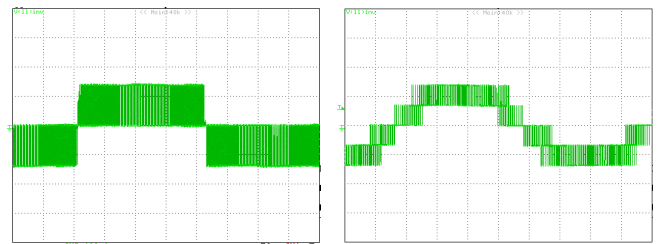
Essa é a tensão aplicada ao motor.

A tensão de modo comum e_{com} é definida como;

$$e_{com} = (e_u + e_v + e_w) / 3 \quad (8)$$

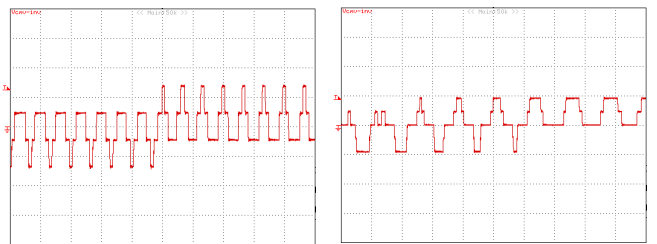
A tensão de modo comum se relaciona com a corrente de fuga a terra, tensão do eixo e corrente de rolamento do motor.

As formas de onda das tensões de linha obtidas para configuração 2-Níveis e 3-Níveis é ilustrada na figura 4. A Figura 5 compara as tensões de modo comum.



(a) Inversor 2-Níveis (b) Inversor 3-Níveis

Fig. 4. Forma de onda da tensão de linha
V: 500V/div, T: 2 ms/div



(a) Inversor 2-Níveis (b) Inversor 3-Níveis

Fig. 5. Forma de onda da tensão de modo comum
V: 250V/div, T: 110 μ s/div

As forma de onda acima foram obtidas sobre os terminais de um motor de 460V, 7,5kW acionado por inversores de 2 e 3 Níveis.

Conforme ilustram as Figs. 3-5, os inversores de 3-Níveis tem pulsos de tensão de linha e de modo comum de menor amplitude que os inversores 2-Níveis. Essas características proporcionam significantes benefícios para o acionamento de motores descritas na seção IV.

III. BALANCEAMENTO DA TENSÃO DO LINK CC

O ponto médio dos capacitores do barramento CC é conectado ao circuito da ponte inversora através dos diodos como mostra a Fig. 1. A corrente que vai e volta desse ponto causa desbalanceamento de tensão entre os capacitores superiores e inferiores.

Na topologia 3-Níveis, existem 27 (3^3) combinações de estados ligados e desligados dos IGBT's. Entretanto existem redundâncias nessas combinações e elas são categorizadas dentre um dos seguintes casos, na ordem da menor para a maior tensão.

Caso 1: Três terminais são combinados juntos e conectados ao barramento positivo (P), o ponto médio CC (O) ou barramento negativo (N). Isto é chamado de “zero vector”. A corrente do motor é completamente independente do circuito dos capacitores.

Caso 2: Um ou dois terminais do motor são conectados ao ponto médio e os remanescentes (são) conectados aos barramentos positivo ou negativo. Neste caso o fluxo da corrente do ponto médio causa desbalanceamento de tensão nos capacitores. Isto pode ser controlado pela escolha do chaveamento apropriado de forma a produzir a mesma tensão no motor, mas causando a corrente do capacitor a fluir em direção oposta.

Caso 3: Três terminais do motor são conectados ao P, O ou N. A magnitude e polaridade da corrente de ponto médio mudam dependendo das condições de carga e do ângulo da fase em operação. Esta corrente causa desbalanceamento de tensão nos capacitores e geralmente não controlável para uma determinada tensão. O Case 2 é utilizado para compensar o desbalanceamento causado por esta condição.

Caso 4: Um ou dois terminais do motor são conectados ao P, e os remanescentes (são) conectados ao N. Neste caso não existe corrente fluindo no ponto médio.

A Fig. 6 mostra exemplos típicos para o caso 2 mencionado acima. As conexões (a) e (b) fornecem ao motor a mesma tensão e corrente em ambas direções. Desta forma, o balanceamento de tensão no capacitor pode ser realizado pela escolha apropriada de (a) ou (b). As conexões (c) e (d) tem relações similares, em relação à tensão do ponto médio e corrente do motor.

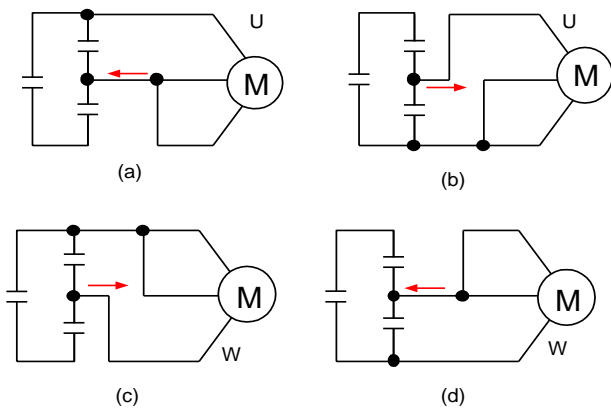


Fig. 6. Seleção da polaridade da corrente do ponto médio

O inversor 3-Níveis aqui apresentado utiliza um sofisticado método de controle baseado na tecnologia “space vector”, a qual seleciona o vetor ótimo ou combinação de chaveamento para a melhor performance do motor e o melhor balanceamento de tensão nos capacitores [7]. Neste método, a corrente que entra ou do ponto médio não necessita ser detectada diretamente podendo ser determinada a partir da corrente do motor e do estado de chaveamento dos IGBT's.

IV. CARACTERÍSTICAS E VANTAGENS DOS INVERSORES 3-NÍVEIS

Esta seção compara os transientes de tensão nos terminais do motor, a corrente de fuga, a tensão no eixo e a corrente no rolamento do motor entre os inversores de 2-Níveis e 3-Níveis.

A. Forma de Onda da Corrente

O ripple da corrente nos inversores 3-Níveis é menor que nos inversores convencionais devido a menor amplitude de tensão dos pulsos do PWM. A frequência portadora do PWM pode ser reduzida mantendo-se a mesma qualidade de corrente dos inversores 2-Níveis, porém com a vantagem adicional de poder reduzir as perdas por efeito Jaule nos IGBT's em consequência da redução do número de chaveamentos por ciclo.

B. Transientes de Tensão nos terminais dos motores

Quando a distância entre o inversor e o motor é grande, a tensão nos terminais do motor é elevada em virtude dos transientes de

tensão ocasionados pela reação da indutância e capacitância distribuída do cabo. Valores elevados de tensão aparecem nos terminais do motor podendo danificar e até romper a isolamento dos enrolamentos do motor. A aplicação contínua desses pulsos de tensão elevada contribuem ainda para a redução da vida dos motores.

A amplitude dos pulsos de tensão dos inversores 3-Níveis é metade da amplitude dos pulsos de tensão dos inversores 2-Níveis, desta forma os transientes de tensão nos terminais do motor são significativamente menores que nos motores acionados por inversores convencionais. As formas de onda da Fig. 7 são baseadas no conceito que os transientes de tensão no extremidade final dos cabos, ou terminais do motor, atingem cerca de duas vezes o valor da tensão de saída do inversor. Esse efeito é decorrente da aplicação de pulsos de tensão em um circuito ressonante L-C formado pelos cabos e sua capacitância distribuída.

Na Fig. 7 (a), Sobre o pulso PWM é adicionado um transiente de tensão atingido o valor de pico de $2E$. Na Fig. 7 (b), sobre o pulso é adicionado um transiente de valor $0,5E$, o valor de pico passa para $1,5E$ menor que a figura (a).

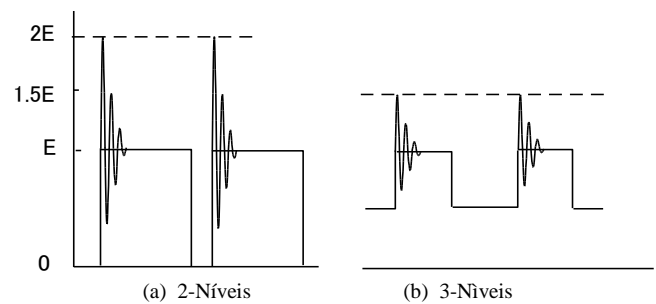


Fig. 7. Transiente de tensão nos terminais do motor

A Fig. 8 mostra as formas de onda da tensão medida sobre os terminais do motor para uma distância de cabo de 100 metros. Essas formas de onda mostram claramente a diferença dos picos de tensão. O comportamento das oscilações amortecidas dos transientes são facilmente identificáveis em ambas as configurações de inversores.

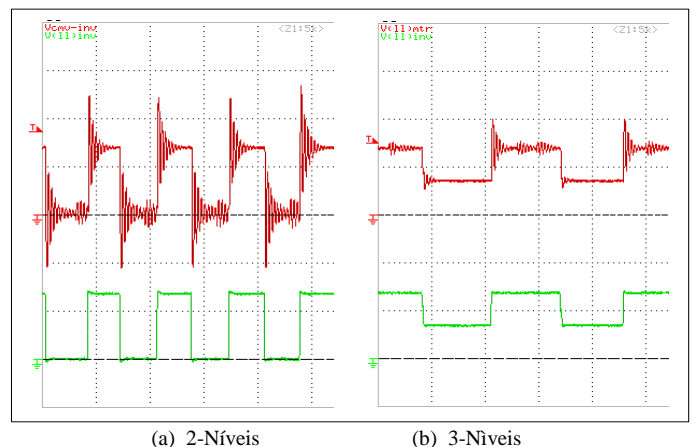


Fig. 8. Oscilograma dos Transientes de tensão nos terminais do motor
V: 500V/div, T: 50µs/div

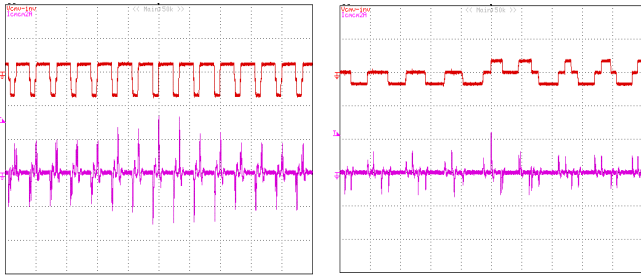
C. Corrente de Fuga

O valor elevado da tensão de modo comum causa o aparecimento da corrente de fuga entre os cabos de interligação e os enrolamentos do motor para o terra, através das capacitâncias

parasitas das mesmos. Essa corrente de fuga costuma criar problemas de ruído de rádio frequência em equipamentos sensíveis instalados próximos ao inversor/motor.

Devido à amplitude reduzida dos pulsos de tensão em modo comum dos inversores 3-Níveis a corrente de fuga a terra é sensivelmente menor nos inversores 3-Níveis quando comparado aos inversores convencionais.

A Fig. 9 mostra uma redução significativa nos picos da corrente de fuga a terra para os inversores 3-Níveis. A medição foi realizada com motor de 460V, 7.5kW instalado a uma distância de 100m do inversor.



(a) 2-Níveis (b) 3-Níveis
 Fig. 9. Corrente de fuga a terra
 Escala Superior: Tensão de mod comum, 500V/div
 Escala Inferior: Corrente de fuga, 2A/div
 T: 100 µs/div

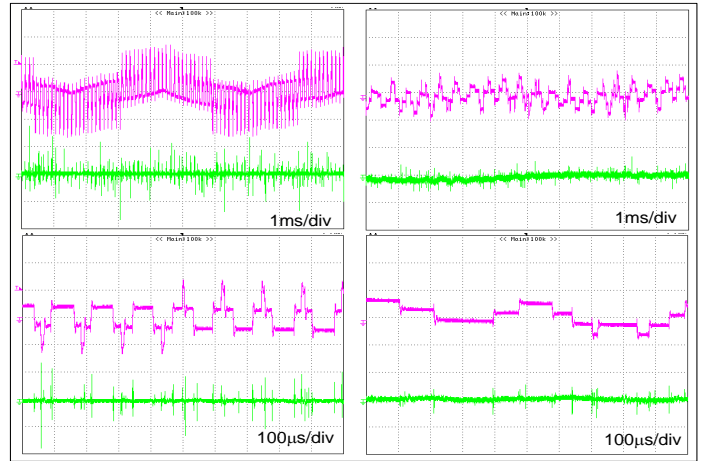
D. Tensão no eixo e Corrente no rolamento do motor

Danos em rolamentos de motores acionados por inversores tem sido relatados em casos onde o eixo do motor não estava devidamente aterrado. Esse problema é causado pela tensão de modo comum que aparece no eixo do motor gerando uma corrente de fuga a terra a qual atravessa o rolamento.

Quando o motor esta rodando o rolamento encontra-se isolado pela graxa formando um filme de graxa, isso provoca o aparecimento de capacitâncias entre o rotor e a carcaça e conseqüentemente ao terra. Essas capacitâncias são carregadas pela tensão de modo comum entre estator e rotor. Isso resulta na tensão do eixo, cuja forma é similar a tensão de modo comum. Essa tensão ocasiona descargas nas bordas do rolamento criando estrias e pontos que acabam por danificar completamente o rolamento.

Nos inversores 3-Níveis, a tensão de modo comum é significativamente reduzida em relação aos inversores convencionais reduzindo significativamente a corrente no rolamento do motor e conseqüentemente proporcionando redução no desgaste do rolamento. A Fig. 10 mostra o resultado do teste da tensão e corrente de rolamento em inversores 3-Níveis e 2-Níveis. Apesar da Fig. 10 mostrar que os inversores 3-Níveis produzem uma corrente de rolamento significativamente menor, ainda é um pouco difícil de se estimar precisamente o quanto se acrescentou ao tempo de vida do rolamento de uma forma em geral. No momento são realizados testes de longa duração para verificação desse efeito. A Fig. 11 mostra claramente que o uso de inversores 3-Níveis pode resultar em aumento significativo do tempo de vida dos rolamentos do motor.

Condições extremas incluindo temperatura, tipo de graxa, e velocidade do motor foram empregadas no teste de vida do rolamento ilustrado na Fig. 11. Nesse momento podemos afirmar de forma pratica, que o tempo de vida dos rolamentos será significativamente maior com a utilização de inversores 3-Níveis, no mínimo o aqui mostrado.



(a) Inversor 2-Níveis (b) Inversor 3-Níveis
 Fig. 10. Tensão no eixo e corrente no rolamento
 Acima em cada figura: Tensão do eixo, 10V/div
 Abaixo em cada figura: Corrente de Rolamento, 20mA/div

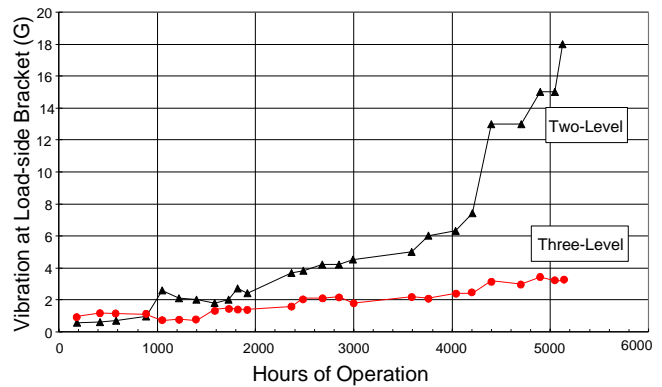


Fig. 11. Resultado do teste de vida dos rolamentos
 Motor 0,7 kW, 2.100 rpm



Obs.: Fotos cedidas por um cliente que teve problemas com correntes nos rolamentos usando inversores de 2 níveis.

V. PRODUTOS QUE EMPREGAM A TECNOLOGIA 3-NÍVEIS

A Yaskawa Europe (Germany) introduziu ao mercado o inversor Varispeed G7 empregando a tecnologia 3-NÍVEIS durante a feira de Hannover em 2002.

Conforme mencionado na seção anterior, a topologia 3-Níveis resulta em baixas correntes de rolamento. Isso elimina a necessidade de utilização de rolamentos isolados reduzindo o custo de fabricação de motores.

A próxima vantagem para tecnologia 3-Níveis é a redução dos transientes de tensão. Isso é muito importante em casos de modernização onde se deseje manter o motor existente. Motores antigos normalmente se encontram com sua isolamento deteriorada e o uso de inversores convencionais irá sem duvida ajudar a romper essa isolamento.

A baixa amplitude dos transientes de tensão reduzem o “stress” sobre a isolação dos motores. Em aplicações com longa distância de cabos, a topologia 3-Níveis resolve o problema dos transientes de tensão sobre o motor evitando o uso de filtros de saída (filtros dv/dt). Em aplicações com transformadores de elevação de tensão na saída de inversores de baixa tensão, a topologia 3-Níveis possibilita reduzir o tamanho dos componentes de filtragem normalmente utilizados entre inversor e transformador.

O ruído audível do motor também é reduzido em virtude dos pulsos de menor tensão. O ruído é comparável ao ruído produzido pelo motor conectado diretamente a rede elétrica.

Outra vantagem é a melhoria da performance dinâmica. Combinado com um sofisticado controle space vector e estratégia PWM específica para pulsos de baixa tensão, é possível o emprego de modernas tecnologias de controle destinadas a melhorar a performance do motor. A Fig. 12 mostra um diagrama de blocos simples de controle de velocidade sem sensor, “sensor less”, com a nova tecnologia do “Observer de Fluxo Dual” resultando em um excelente controle de torque [5], [6].

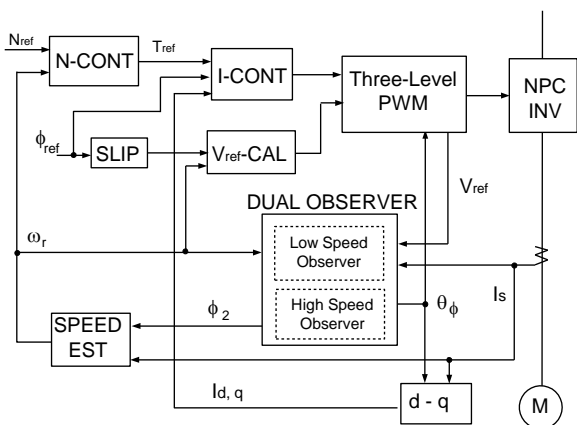


Fig. 12. Controle Vetorial Sensorless utilizando “Dual Flux Observer”

Utilizando esse método, é possível alcançar mais que 150% de torque a baixíssimas frequências como 0,3Hz, como ilustra a Fig. 13.

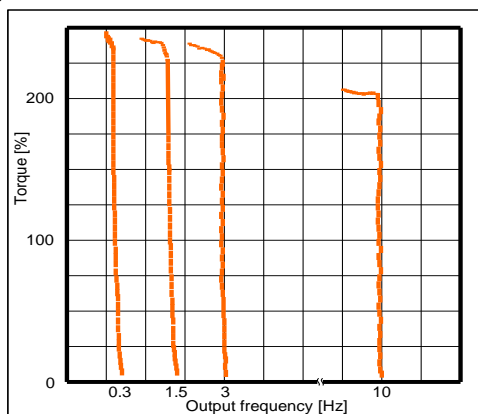


Fig. 13. Características de torque em baixas velocidades

O “Dual Flux Observer” também ajuda na melhoria da precisão de controle do torque do motor. A limitação do torque de saída protege máquinas e materiais contra mudanças súbitas de carga como ilustra a Fig. 14.

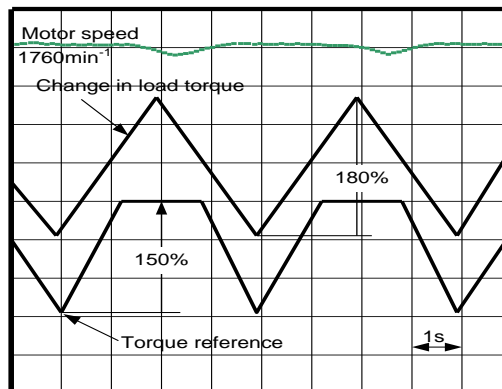
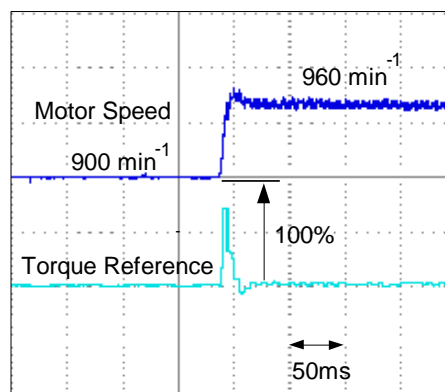
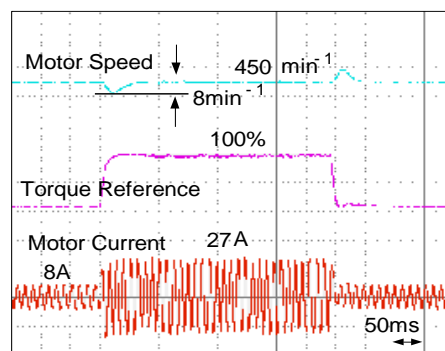


Fig. 14. Função de limitação de torque

O modelo de “tracking control” assegura respostas rápidas mesmo em operação “sensorless” ou sem realimentação. Em adição, o uso do realimentação por encoder pode atingir altíssima performance, com rápidas respostas as mudanças nas referências de velocidade e torque conforme ilustra a Fig. 15. A Fig. 15(a) mostra um exemplo de uma rápida resposta a uma mudança abrupta na referência de velocidade. A Fig. 15(b) é o caso onde ocorre um repentino aumento de carga. A alteração de velocidade é praticamente insignificante em virtude da rápida resposta de torque do sistema.



(a) Resposta rápida a alterações na velocidade



(b) Mudanças bruscas na carga

Fig. 15. Melhoria da performance dinâmica

Em virtude dessas características de controle é necessário o conhecimento preciso dos parâmetros do motor. Para alcançar a melhor performance, o Varispeed G7 possui a função de auto ajuste de parâmetros, “auto tuning”, que busca essas informações do motor, baseado apenas nas informações externas da placa do mesmo.



Fig. 16. Inversor Varispeed G7, 400V, 1.5kW

VI. APLICAÇÕES TÍPICAS

Baseados nas categorias e benefícios da topologia 3-Níveis incluindo controles mais precisos de torque e velocidade e melhor dinâmica existem muitas aplicações em potencial. Algumas aplicações típicas são o acionamento de bobinadeiras e desbobinadeiras, eixo arvore em máquinas operatrizes, elevadores de passageiros, elevação de cargas e outras.

Baseados na redução dos transientes de tensão que proporcionam utilização com longas distâncias de cabos podemos citar aplicações como; acionamentos de bombas em unidades de tratamento de água e/ou esgoto onde o motor é normalmente instalado a longa distância do inversor, pontes rolantes com longas distâncias de cabos, áreas onde o inversor deve ser instalado longe do motor em virtude da área ser classificada ou agressiva, com grande concentração de poeira, calor, água e ou umidade como o caso de siderúrgicas, petroquímicas, papel, celulose e etc.

Em áreas alimentícias lavadas frequentemente, os inversores 3-Níveis podem ser instalados a distância segura sem necessidade de armários especiais a prova de água, barateando o custo da instalação.

Outra aplicação é o acionamento de motores antigos com isolamento já reduzida. Os inversores 3-Níveis possuem menor geração de transientes de tensão no motor reduzindo a possibilidade de queima dos mesmos.

Os inversores 3-Níveis produzem menor ruído audível permitindo aplicações internas a prédios comerciais e residenciais onde o ruído não é aceitável. Aplicações típicas nesse caso são o acionamento de bombas e ventiladores para unidades de ar condicionado, elevadores, máquinas comerciais para lavagem de roupas e outras.

VII. ANÁLISE DE CUSTOS

A tecnologia 3-Níveis para baixa tensão ainda é recente e ainda não é possível quantificar com exatidão os ganhos financeiros de utilização da mesma. A Tabela 2 a seguir compara o preço orientativo de inversores 3-Níveis com o valor orientativo de inversores 2-Níveis, acrescidos de filtros de saída, de forma a atender a aplicação com longas distâncias de cabos entre inversor e motor. Para baixas potências a diferença de custos praticamente inexistente. Nas potências maiores a distância aumenta.

Não foi ainda possível tabular os efeitos financeiros das demais características dos inversores 3-Níveis como, maior vida útil dos motores, maior intervalo de tempo entre troca de rolamentos. Se considerarmos que na maioria das aplicações industriais o custo de paradas de produção em decorrência de troca de motores é muito elevado, as diferenças de preço acima apresentadas para maiores podem perfeitamente serem justificadas por uma maior confiabilidade de operação dos acionamentos.

Tabela 2. RELAÇÃO ENTRE INVERORES 2-NÍVEIS E 3-NÍVEIS

CV	2-Níveis			3-Níveis	Δ (%)
	Inversor	Filtro	Total	Inversor	
10	975,00	525,00	1.500,00	1.520,00	+1
20	1.640,00	595,00	2.235,00	2.135,00	-0,5
50	3.570,00	945,00	4.515,00	4.900,00	+8

Δ : Comparação 2-Níveis Total / 3-Níveis
Valores de referência em US Dolares

VIII. CONCLUSÃO

Foi mostrado que a tecnologia dos inversores 3-Níveis não foi desenvolvida apenas para a satisfação dos técnicos de pesquisa e desenvolvimento, mas também para aplicações praticas no mundo moderno. É um passo em direção ao futuro das novas tecnologias de acionamentos de motores.

REFERENCIAS

- [1] A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi, "A new neutral-point-clamped PWM inverter," IEEE Trans. Ind. Applications, vol. 17, pp. 518-523, Sept./Oct. 1981.
- [2] R. A. Timer, "PWM Frequency Converters in the metal Industry," EPE Firenze 1991.
- [3] V. Cascone, L. Mantica and M. Oberti, "Three level inverter DSC control strategy for traction Drives," EPE Firenze 1991.
- [4] K. Nakata and K. Nakamura, "A three-level traction inverter with IGBTs for electric trains," IEEE Tokyo Section, Denshi TOKYO, No. 33, 1994, pp. 188-191.
- [5] E. Watanabe, et al., "New Inverter Drive Technology," Yaskawa Technical Review Vol. 65, No. 2, 2001, pp. 104-111
- [6] H. Takasaki, et al., "High-performance & Environmentally Friendly General Purpose Inverter Varispeed G7," Yaskawa Technical Review Vol. 65, No. 2, 2001, pp. 122-126
- [7] K. Yamanaka, A. M. Hava, H. Kirino, Y. Tanaka, N. Koga and T. Kume, "A novel neutral point potential stabilization technique using information of output voltage vector and currents," IEEE Trans. Ind. Applications, Vol. 38, No. 6 November/December, 2002 pp. 1572-1579.