

# 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.

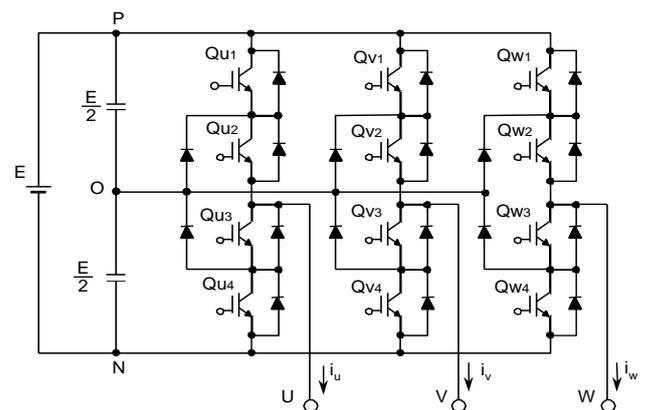


Fig. 1. Topologia dos inversores 3-Níveis.

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  $\omega t$  igual a  $75^\circ$  para a fase U. Essa condição é mostrada na Fig. 2, onde as tensões de fase em “per-unit” são expressas como,

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

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

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

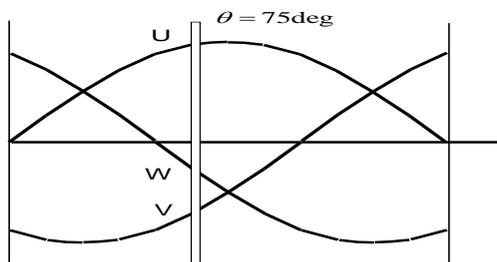


Fig. 2. Escolha do ângulo de fase para ilustração das formas de onda

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.

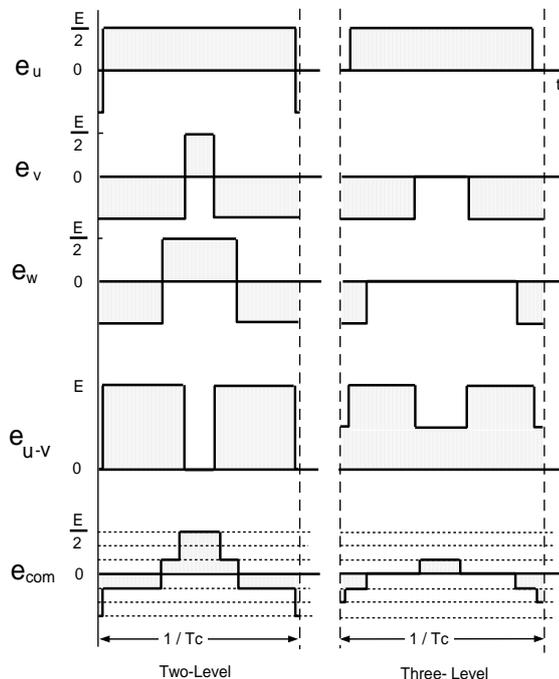


Fig. 3. Comparação entre as formas de onda de tensão dos inversores 2-Níveis (Two Level) e 3-Níveis (Three Level)

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

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

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

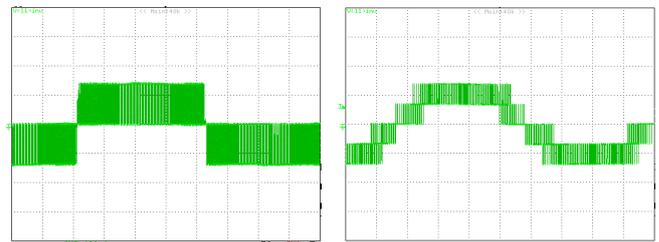
Essa é a tensão aplicada ao motor.

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.

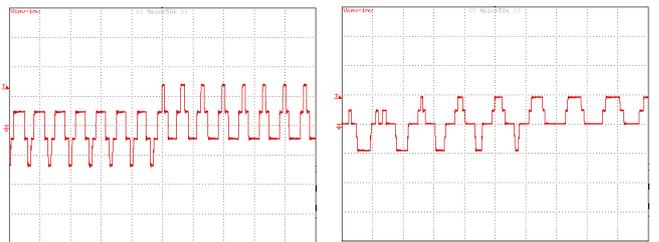
As formas de onda das tensões de linha obtidas para configuração 2-Níveis e 3-Níveis é ilustrada na figura 4. A Figura 5 compara as tensões de modo comum.



(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  $\mu$ 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.

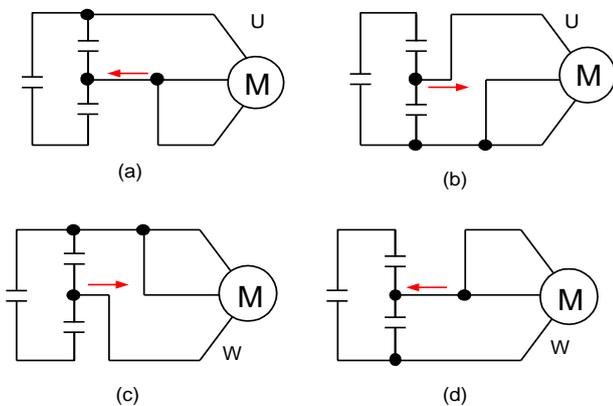


Fig. 6. Seleção da polaridade da corrente do ponto médio

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).

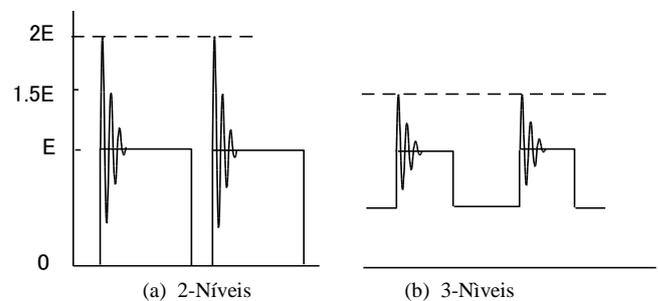


Fig. 7. Transiente de tensão nos terminais do motor

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.

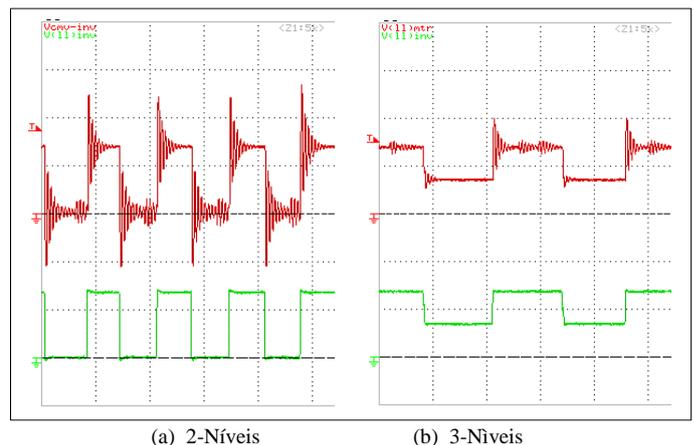


Fig. 8. Oscilograma dos Transientes de tensão nos terminais do motor  
V: 500V/div, T: 50µs/div

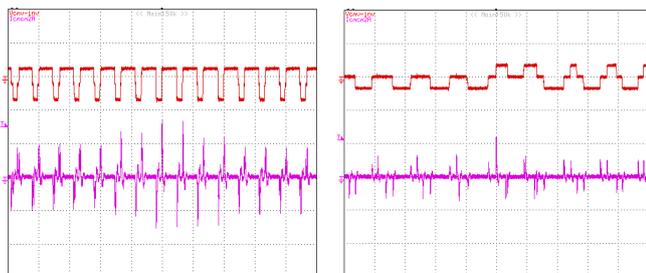
##### C. Corrente de Fuga

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  $\mu$ s/div

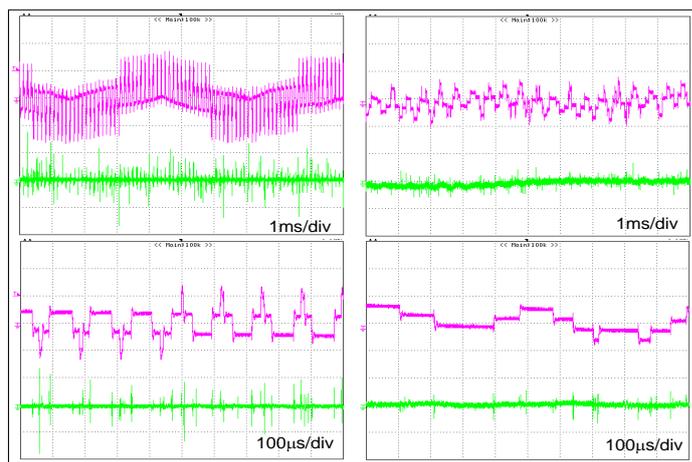
#### D. Tensão no eixo e Corrente no rolamento do motor

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

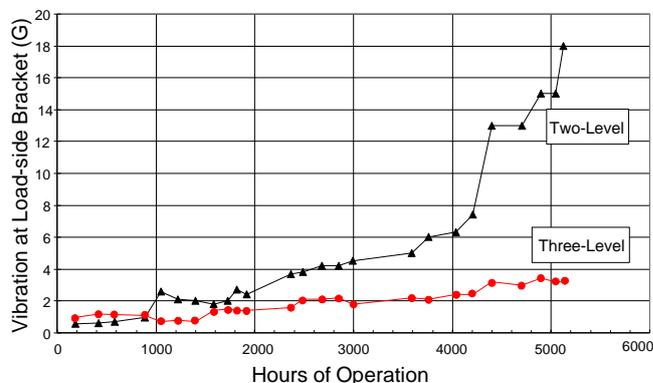


Fig. 11. Resultado do teste de vida dos rolamentos  
 Motor 0,7 kW, 2.100 rpm



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 “ Observador de Fluxo Dual” resultando em um excelente controle de torque [5], [6].

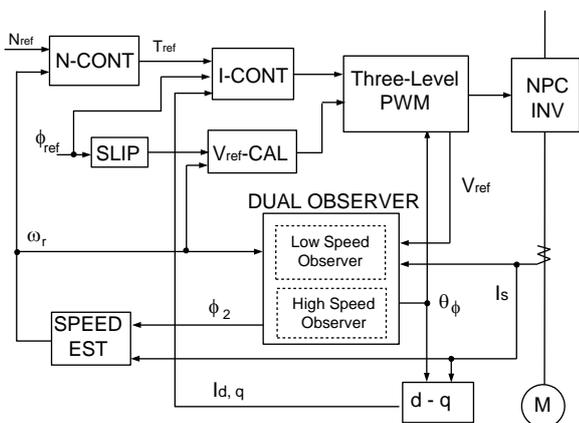


Fig. 12. Controle Vetorial Sensorless utilizando “Dual Flux Observer”

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

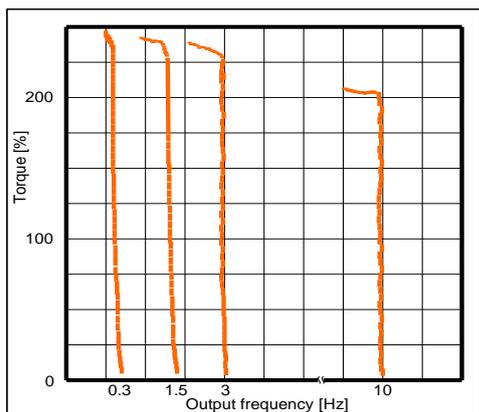


Fig. 13. Características de torque em baixas velocidades

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.

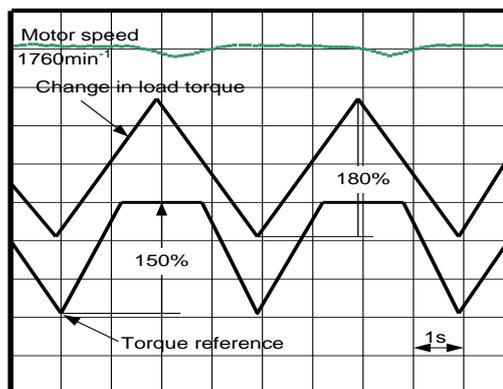
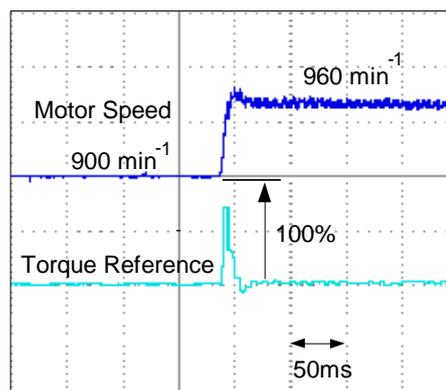
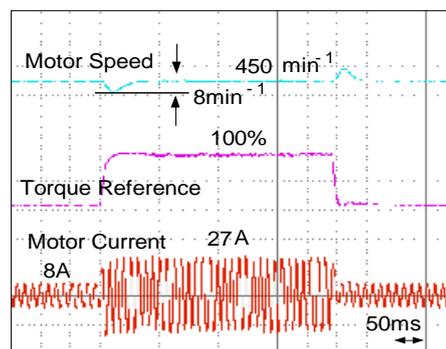


Fig. 14. Função de limitação de torque

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	$\Delta$ (%)
	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

$\Delta$  : 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.