

Inversor Multinível Assimétrico Bidirecional Com 15 Níveis na Tensão de Saída Usando um Estágio CC-CA-CA e Poucas Chaves

Anderson Jhones Passos Nascimento
Universidade Federal do Ceará
Fortaleza, CE, Brasil
Email: anderson_5jhones@hotmail.com

Bruno Ferro de Menezes
Universidade Federal do Ceará
Fortaleza, CE, Brasil
Email: bmenezes@live.com

Samuel Jó de Mesquita
Instituto Federal do Ceará
Fortaleza, CE, Brasil
Email: samuel.mesquita@ifce.edu.br

Sérgio Daher
Universidade Federal do Ceará
Fortaleza, CE, Brasil
Email: sdaher@dee.ufc.br

Fernando Luiz Marcelo Antunes
Universidade Federal do Ceará
Fortaleza, CE, Brasil
Email: fantunes@dee.ufc.br

Kevin Rabelo Costa
Universidade Federal do Ceará
Fortaleza, CE, Brasil
Email: kevincosta@alu.ufc.br

Resumo—Este artigo propõe um inversor multinível assimétrico bidirecional com 15 níveis na tensão de saída. A topologia sugerida é composta de um transformador que trabalha na frequência de 60 Hz, uma ponte H-Bridge, uma única fonte de Corrente Contínua e de células assimétricas associadas ($2L + L$). De acordo com os pesos ξ das células x e sua posição j ($\xi x, j$), o inversor pode gerar até 15 níveis na tensão de saída. A configuração da topologia diminui o número de fontes de tensão isoladas necessárias para a obtenção da quantidade de níveis desejada. O inversor funciona com a modulação staircase, baseada na eliminação de harmônicos. A topologia apresenta baixa distorção harmônica e poucos interruptores eletrônicos quando comparada com o conversor multinível convencional para entregar a mesma quantidade de níveis na tensão de saída. Estudos teóricos e resultados em simulação são apresentados a fim de validar o conversor proposto.

Palavras-Chave – Estágio CA-CA, Inversor de 15 Níveis, Inversor Híbrido, Modulação Staircase, Transformador de Múltiplos Secundários.

I. INTRODUÇÃO

De acordo com [1], a geração de energia elétrica a partir de fontes de energia renováveis como sol, vento etc, é amplamente adotada devido ao aumento do consumo de energia elétrica.

A integração de fontes renováveis de energia com a rede desempenha um papel importante na utilização da energia elétrica gerada de forma sustentável. A injeção de energia na rede por meio de fontes renováveis de energia, de forma direta, apresenta algumas complicações. Dessa forma o sistema necessita utilizar conversores eletrônicos de potência como uma interface entre fontes de energia renováveis, rede elétrica e carga.

Segundo [2], nesse cenário, no qual deseja-se ter o controle do fluxo de energia, um equipamento muito importante é o conversor bidirecional usado para fazer a interface da rede elétrica de serviço público com fontes

de energias renováveis ou sistemas de armazenamento de energia. Um Conversor bidirecional é capaz de controlar tensão e corrente em ambos os lados, CC ou CA. É um elemento fundamental nos sistemas de geração distribuída, especialmente aqueles com armazenamento de energia em banco de baterias.

Como explica [3], os inversores multiníveis conseguem atingir tensões mais altas com melhor conteúdo harmônico, sintetizam a saída desejada de tensão de vários níveis. Pode-se aumentar a qualidade da tensão de saída incrementando o número de níveis. Dentre os inversores multiníveis temos as topologias assimétricas, que apresentam um número reduzido de interruptores em relação às topologias simétricas, porém perdem em modularidade.

Como relata [4], quando se trata de conversores CA-CC, CC-CC, ou CC-CA, nas aplicações que requerem baixas potências e baixas tensões é frequente o uso de inversores baseados na estrutura ponte completa monofásica ou trifásica trabalhando com modulação PWM bipolar ou unipolar. No entanto, quando os inversores são designados a operar em altas potências e altas tensões prevalece a capacidade de bloqueio de tensão dos dispositivos semicondutores no arranjo topológico. Segundo [5], desse modo, surgem as topologias multiníveis no intuito de assegurar reduzidos esforços de tensão nos semicondutores e uma tensão de saída controlada em baixa frequência e com a mitigação do conteúdo harmônico.

Como explica [6], as topologias híbridas ou assimétricas têm despertado o interesse da comunidade acadêmica relacionada à área por proporcionar mais níveis na saída com quantidade reduzida de componentes, se comparados com a topologia multinível convencional.

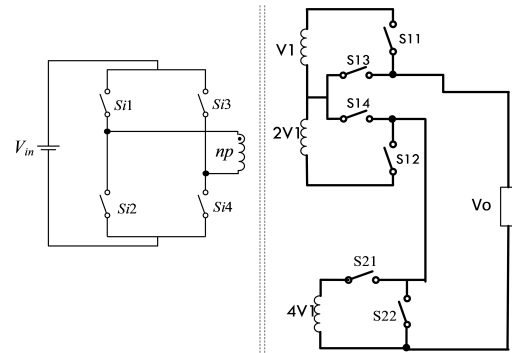
Os inversores multiníveis assimétricos são aplicados

em acionamento de máquinas elétricas, em dispositivos FACTS (Flexible AC Transmission Systems), especialmente em sistemas de energias renováveis. Maior qualidade de saída pode ser obtida com menos células, com uma quantidade menor de chaves e controle com menor complexidade, quando comparados com os inversores multiníveis simétricos que usam diodos de bloqueio e capacitores flutuantes. Os filtros de saída podem ser drasticamente reduzidos ou mesmo eliminados.

A modulação staircase pode produzir uma saída em que se consiga eliminar uma determinada harmônica, pois o tamanho de cada degrau pode ser controlado de acordo com a exigência requerida e está mais próximo da onda senoidal dependendo do número de níveis do conversor. A modulação reduz a distorção harmônica total e é largamente utilizada em aplicações de altas potências com baixa frequência de comutação. Assim pode-se obter menores perdas por chaveamento e também manter a taxa de distorção nas grandes elétricas em valores aceitáveis por norma.

II. INVERSOR PROPOSTO

A topologia apresentada neste trabalho foi projetada visando operar em sistemas renováveis, sistemas isolados ou não, na interligação entre sistemas CC-CA e em microrredes. Proporcionando a inversão da corrente continua para a forma alternada, entregando uma baixa taxa de distorção harmônica nos sinais de tensão e corrente de saída e apresentar baixas perdas no momento da comutação das chaves semicondutoras. Uma vantagem desta topologia de circuito é a questão de uma ótima modularidade que é indispensável para vários tipos de conexões com transformadores para fornecimento ou carregamento. A utilização do transformador possibilitou que o inversor trabalhasse apenas com uma fonte CC, reduzindo por conta disso o elevado custo que há na aplicação de várias fontes CC em inversores em cascata. Isto supre a necessidade de um conversor CC-CC elevador de alto ganho, além de não necessitar da aplicação de capacitores eletrolíticos nas células 2L + L. Na configuração empregada para as chaves bidirecionais utiliza-se dois mosfets de canal n em anti-série (source comum). Esta combinação é responsável por garantir o caminho da corrente I_{os} de acordo com a lógica de chaveamento e ainda favorece a menores perdas quando comparada com a tecnologia IGBT em baixas tensões. Pode-se destacar também como benefício da estrutura o fato de o transformador operar com vários secundários (três no total) em 60 Hz, com estágio CA-CA, isto faz a presença de pontes de diodo suplementares ser dispensada. A Figura 1 mostra o inversor de 15 níveis proposto de uma forma simplificada.



Inversor de 15 níveis Célula 2L+L

Figura 1. Topologia de 15 níveis proposta em um arranjo simplificado.

III. PECULIARIDADES GENERALIZADAS DA TOPOLOGIA

O acionamento independente da chave bidirecional, S_{xyz} , (S_{xya} ou S_{xyb}) traz modularidade à estrutura além de permitir a dupla condução dreno-source de S_{xya} e S_{xyb} , ao invés da condução de uma chave e um diodo de S_{xyz} , durante um estado de nível n. Não se adotou a condução de uma chave e um diodo, ambos de S_{xyz} , para manter o estado de nível n neste trabalho, pois assim as perdas seriam maiores do que a condução simultânea dos mosfets de S_{xyz} . Esta configuração de condução de uma chave e um diodo, é aplicada apenas durante o intervalo de transição de nível para uso do diodo somente em um tempo muito curto, em torno de 2 μ segundos. Para melhor compreensão, evidencia-se que os termos: x equivale ao número de cada módulo em cascata; y é a posição da chave pertencente a cada módulo e z é o termo referente à descrição de um dos interruptores pertencente à chave bidirecional, que usa dois mosfets anti-série (a,b).

O inversor proposto é mostrado em sua configuração completa na Figura 2.

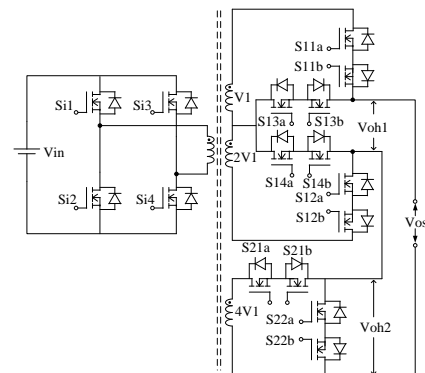


Figura 2. Inversor de 15 níveis proposto em sua configuração completa.

Quando forem ligadas as chaves bidirecionais em cada

braço em formato de L os interruptores complementares devem estar bloqueados para não ocasionar curto circuito das fontes.

O peso de uma fonte $\xi_{x,j}$, na posição j , é $\xi_{x,j}=V_{S_{x,j}}/V_{S_{1,1}}$ para uma dada célula x , tem conexão com o peso da célula P_x , que é $P_x=V_{S_x}/V_{S_{1,1}}$, onde V_{S_x} é a tensão da célula x , $V_{S_x}=V_{S_{x,1}} + V_{S_{x,2}}$. O peso da célula x é dado pela tensão do barramento da célula sobre a tensão da primeira fonte tensão secundária, logo $V_{S_x}/V_{S_{1,1}}$. A associação em cascata das células permite diferentes combinações de $\xi_{x,j}$. Para o caso da configuração com 15 níveis adotada neste trabalho temos que $V_{S_{1,1}}$ que é a primeira célula em formato de L tem peso 1, as demais têm pesos 2 e 4, respectivamente. Na configuração apresentada neste artigo o inversor trabalha com múltiplos secundários.

Os secundários foram postos com pesos 1, 2 e 4, a célula L (Célula inferior), processa cerca de 60% da potência, e a carga é a combinação de um resistor e um indutor que funciona como filtro.

A Figura 3 mostra os níveis sintetizados da tensão V_{os} com 15 níveis e os estados para esta configuração. Nesta Figura não se encontram os estados de transição de nível, mas são apresentados todos os estados das chaves de ambos os semiciclos, positivo e negativo.

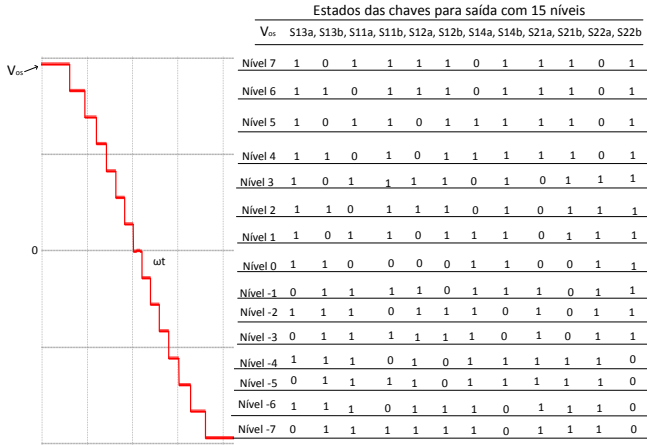


Figura 3. Estados aplicados às chaves e tensão de saída para 15 níveis.

Segundo mesquita2016nova, a modulação staircase, baseada na eliminação de harmônicos, é amplamente utilizada em aplicações de altas potências com baixa frequência de comutação, comumente, igual ou próxima a da componente fundamental.

Pode-se obter os tempos de transição de cada nível utilizando-se a equação 1, V_{CC} é o valor da tensão de pico desejada dividida pela quantidade de níveis em um quarto de ciclo, n é o nível em que está sendo calculado o seu tempo em determinado momento e V_p é uma função.

$$T_n \approx \sin^{-1}\left[\frac{V_{CC}(n-0,5)}{V_p}\right] \quad (1)$$

IV. RESULTADOS OBTIDOS EM SIMULAÇÃO

A Figura 4 mostra a tensão localizada no primário, foi aplicado a ela aproximadamente $49 V_{CC}$ para a obtenção das tensões das células L, tendo a primeira célula 44,5 volts de pico do módulo em L em que estão as chaves S12a, S12b, S14a e S14b possui 89 volts de pico e a célula inferior tem por volta de 178 volts de pico.

A análise feita em [7], foi utilizada com intuito de expressar a tensão no enrolamento primário da topologia. V_{Pri} é apresentada em função de chaveamento como: $V_{Pri}=V_{in}(Si1-Si3)$.

Segundo [7], essa tensão apresenta-se nos enrolamentos secundários $N_{S_{x,j}}$, como $V_{S_{x,j}}=(N_{S_{x,j}}/N_{Pri}) \cdot [V_{in}(Si1-Si3)]$.

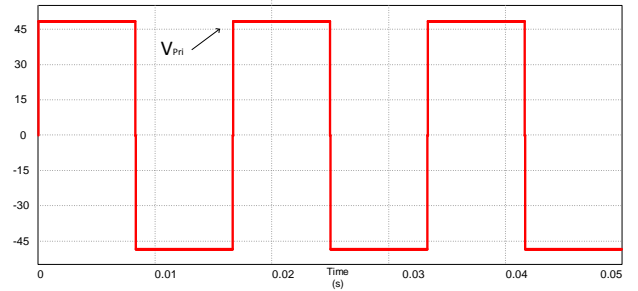


Figura 4. Tensão medida no enrolamento primário.

Na Figura 5 temos a corrente que se encontra no primário do transformador I_{Pri} . A corrente não apresenta sobressinais ou spikes de corrente, pode-se, assim, concluir que os estágios de chaveamento do conversor perante a operação com cargas indutivas estão implementados corretamente.

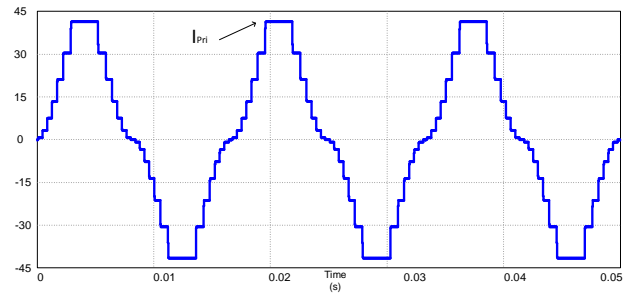


Figura 5. Corrente que flui no enrolamento primário I_{Pri} .

A corrente I_{in} (corrente do barramento CC), está expressa na Figura 6. A corrente I_{in} pode ser apresentada pela função de chaveamento $I_{in}(t)=(Si1-Si3) \cdot I_{Pri}(t)$.

O valor médio da corrente no barramento CC é dado pela equação 2.

$$I_{imed} = \frac{1}{T} \int_0^{\pi} i_p \cdot \sin^2(\omega t) \cdot d\omega t \quad (2)$$

A corrente eficaz na entrada I_{inef} é mostrada em termos da função $\sin^2(\omega t)$ com magnitude $i_p=I_{ospico}$. λ e

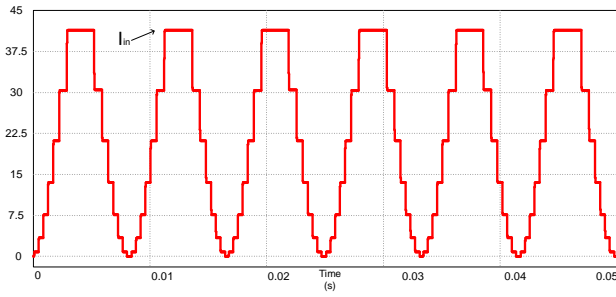


Figura 6. Corrente do barramento CC I_{in} .

λ é o ganho de tensão. Por meio da equação 3 pode-se encontrar a corrente eficaz I_{inef} .

$$I_{inef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{\pi} (i_p \cdot \text{sen}^2 \omega t)^2 \cdot d\omega t} \quad (3)$$

Na Figura 7 são mostradas as correntes I_{n1} , I_{n2} e I_{n3} relativas aos enrolamentos de pesos ξ 1, 2 e 4, respectivamente. As correntes nos enrolamentos não apresentam spikes, isto valida a técnica de acionamento independente das chaves bidirecionais Sxyz para operação do inversor multinível com transformador trabalhando na frequência fundamental.

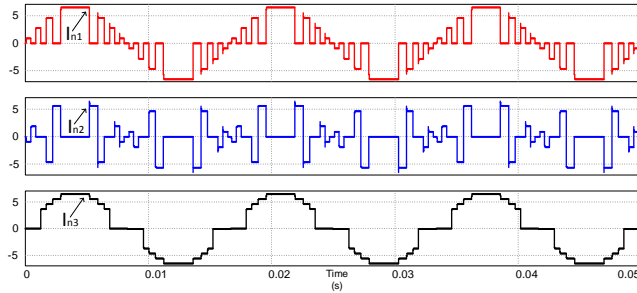


Figura 7. Correntes dos enrolamentos I_{n1} , I_{n2} e I_{n3} .

A tensão V_{oh1} , apresentada na Figura 8, é a união das células 1 e 2 (células superiores do conversor), estas fontes são as de menor potência e são responsáveis pela formação dos três primeiros níveis da tensão de saída V_{os} , a sua forma de onda é composta por 7 níveis com a tensão eficaz de aproximadamente 96 volts e a tensão de pico a 133,4 volts.

Agora pode-se observar na Figura 9 a tensão V_{oh2} da célula de maior potência. Esta fonte é formada por 3 níveis e participa da formação dos níveis 4, 5, 6 e 7, respectivamente (no semiciclo negativo e no positivo, nesta ordem). Seu valor eficaz é próximo de 145,6 volts e seu valor de pico é cerca de 177,83 volts.

A tensão da saída do inversor V_{os} pode ser vista na Figura 10. Seu valor eficaz está em torno de 220 volts e 311 volts de pico, sua taxa de distorção harmônica é aproximadamente 5,37% considerando todo espectro

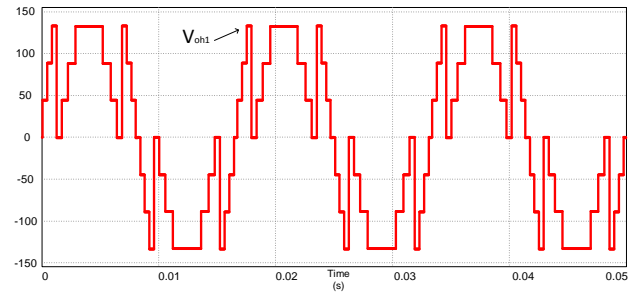


Figura 8. Tensão da composição das células 1 e 2 apresentando 7 níveis.

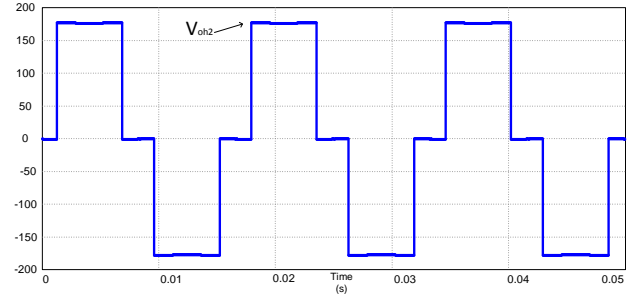


Figura 9. Tensão da célula V_{oh2} contando com 3 níveis.

harmônico fornecido pelo software utilizado e 1,17% para 50 harmônicas.

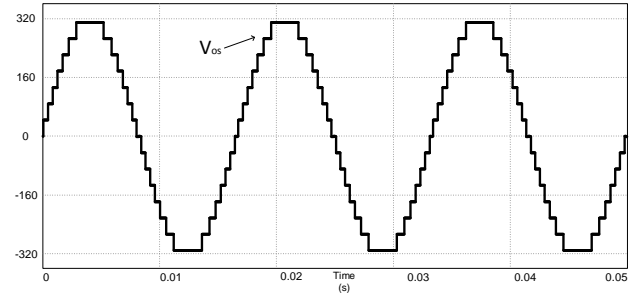


Figura 10. Tensão de saída V_{os} com 15 níveis.

A tensão de saída $V_{os}(\omega t)$ está mostrada de acordo com a série de Fourier na equação 4:

$$V_{os}(\omega t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \text{sen} n\omega t) \quad (4)$$

As expressões a_0 , a_n , e b_n são os coeficientes de Fourier e C_n sendo a amplitude da n^{th} harmônica:

$$C_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} V_{os}(\omega t) e^{-jn\omega t} d\omega t \quad (5)$$

A tensão de saída pode ser expressa na serie de Fourier pela equação 6, pois a tensão $V_{os}(\omega t)$ é simétrica, a componente CC, que corresponde ao termo a_0 , e os harmônicos pares são iguais a zero.

$$V_{os}(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2V_{cc}}{n\pi} [\cos(n\theta_i) - \cos(n(\pi - \theta_i))] \sin(n\omega t) \quad (6)$$

A tensão fundamental de saída, V_{osf} de um inversor trabalhando com n níveis em $1/4$ de ciclo sendo aplicada a ele a modulação staircase é:

$$V_{osf} = \frac{4V_{cc}}{\pi} \sum_{i=1}^N \cos(\theta_i) \quad (7)$$

Os enésimos harmônicos de tensão $(2y - 1)^{th}$, na saída do inversor ficam por parte da equação 8:

$$V_{osh(2y-1)} = \frac{4V_{cc}}{(2y-1)\pi} \sum_{i=1}^N \cos((2y-1)\theta_i) \quad (8)$$

para $y = 2, 3, 4 \dots$

Na Figura 11 pode-se ver a corrente da saída do inversor I_{os} . Foi utilizado um filtro indutivo de 2mH. Por conta dos 15 níveis e também da aplicação do filtro indutivo, a taxa de distorção harmônica ficou dentro dos padrões aceitáveis por norma e seu percentual é cerca de 4,31% considerando todo espectro harmônico fornecido pelo software usado. No entanto para permanecer em 5% de DHT basta um indutor de 0,6 mH, e considerando 50 harmônicas tem-se DHT de 1,17%.

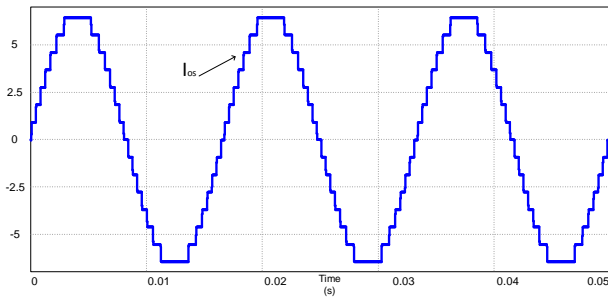


Figura 11. Corrente de carga I_{os} .

A potência ativa de saída P_{os} , vista na Figura 12, pode ser calculada através da equação 9.

$$P_{os} = \frac{1}{T} \int_0^T v_{os}(t) i_{os}(t) dt \quad (9)$$

A potência média da saída do inversor, encontrada utilizando a equação 12, está em torno de 1 kW.

Como vemos na tabela 1 a potência de saída P_{os} é um somatório das potências processadas nas células 2L (com duas fontes de pesos 1 e 2 respectivamente) e L (com uma fonte de peso 4).

A Figura 13 mostra pulsos necessários aplicados às chaves para o acionamento do inversor multinível. As

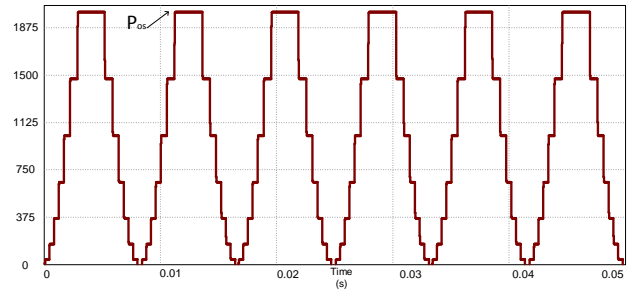


Figura 12. Potência de saída composta pelo somatório das células 2L e L.

Tabela I
CONTRIBUIÇÃO DOS MÓDULOS 2L E L PARA A POTÊNCIA P_{os} .

Potência processada pelo inversor
Célula 2L - Aproximadamente 40% da potência total.
Célula L - Aproximadamente 60% da potência total.

chaves S11a a S14b são das células superiores em formato de L, também mencionada no trabalho como célula (2L) e as chaves S21a a S22b são da célula inferior (L). As chaves são acionadas e desligadas com arranjo de estados para se obter 15 níveis na tensão de saída. Os tempos de transição de níveis foram implementados com $Tn=2 \mu s$.

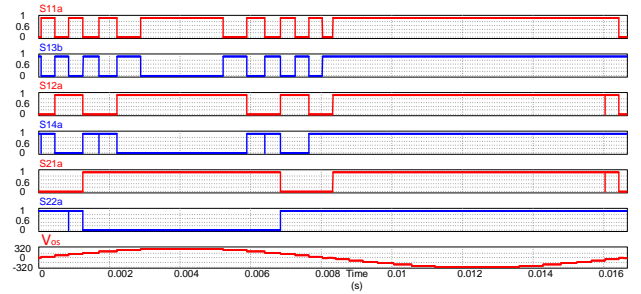


Figura 13. Sinais de gate e tensão de saída V_{os} para 15 níveis.

A Figura 14 mostra as tensões que as chaves das células do conversor estão submetidas. As chaves S11a, S11b e suas complementares S13a e S13b estão sujeitas a tensão de pico de aproximadamente 44,5 volts, as chaves S12a, S12b e suas complementares S14a e S14b estão sujeitas a aproximadamente 89 volts de pico e as chaves S21a, S21b e suas complementares S22a e S22b estão sujeitas a aproximadamente 178 volts de pico. No semiciclo positivo S11a não pode estar ativa ao mesmo tempo que S13b e no semiciclo negativo S11b não pode estar acionada quanto S13a estiver em nível alto, para S12a não pode estar ativa quando S14a estiver, no semiciclo positivo e S12b e S14b não podem funcionar juntas no semiciclo negativo, isto acontece de forma semelhante para S21 e S22.

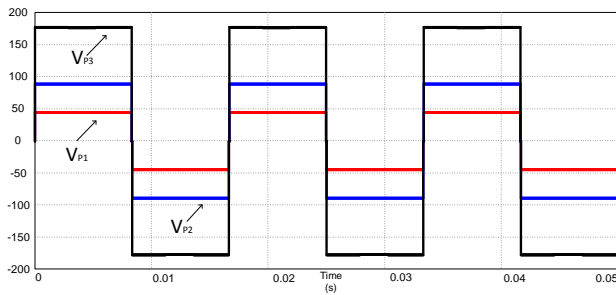


Figura 14. Tensões nas chaves S11a, S12a e S22a.

A Figura 15 mostra a corrente do barramento CC para uma carga indutiva com 300 mH e 48 V. Na figura pode-se ver claramente o retorno de energia, confirmando, assim, que o inversor é bidirecional em corrente.

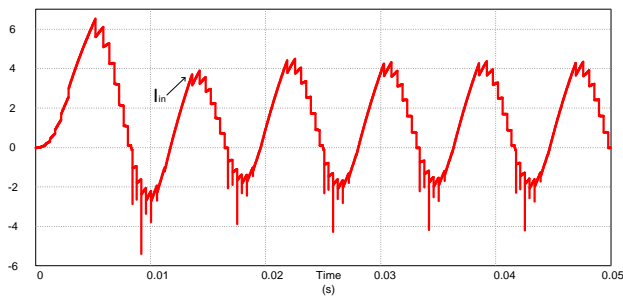


Figura 15. Corrente do barramento CC (I_m) para 300 mH.

V. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou uma nova topologia de inversor multinível bidirecional. A estrutura contou com um transformador de múltiplos secundários, o que diminuiu o número de fontes de tensão isoladas, dispensou a necessidade de capacitores eletrolíticos, seu estágio CA-CA fez que a presença de pontes de diodo complementares fosse descartada e trabalhou em 60 Hz.

Os estados de chaveamento foram otimizados a fim de obter-se menores perdas, além de o conversor poder trabalhar com carga indutiva sem que ocorresse curto-circuito entre as fontes, spikes e sobressinais.

A modulação staircase aplicada possibilitou que o inversor funcionasse com baixas perdas por chaveamento. Inferi-se que o inversor implementado é apropriado para operação em sistemas de energia renovável como por exemplo o fotovoltaico, na interligação de sistemas CC-CA e em microrredes, pois apresenta baixas perdas na comutação, e tem a vantagem de ser bidirecional em corrente.

Em relação à distribuição de potência do inversor percebeu-se através de análise que a primeira célula (2L) é responsável por cerca de 40% de P_{os} e o segundo módulo (L) processa aproximadamente 60% da potência de saída.

Pode-se constatar através da Figura 15 que a corrente do barramento CC para uma carga indutiva com 300 mH e 48 V faz o retorno de energia no sentido carga para a fonte, confirmando, assim, que o inversor é bidirecional em corrente.

A topologia, que apresenta 15 níveis na tensão de saída utilizando poucos componentes, quando comparada a conversores multiníveis convencionais, mostra uma baixa taxa de distorção harmônica, isso diminui o tamanho do filtro de saída. A partir dos resultados extraídos nas simulações foi possível concluir que o conversor cumpriu seu papel pretendido de dar uma boa resolução na tensão de saída, operar com perdas reduzidas no chaveamento e trabalhar com uma taxa de distorção harmônica bem pequena, diminuindo, assim, o filtro requerido na saída.

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos e reconhecimentos vão para os professores orientadores, para a Universidade Federal do Ceará pela assistência em relação à estrutura organizacional de pesquisa como: laboratório e artigos disponibilizados para pesquisa e para a CAPES por seu auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] Y. Wang and R Marquardt, Future HVDC-Grids Employing Modular Multilevel Converters and Hybrid DC-Breakers, 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), pp. 1-8, Organization IEEE, 2013.
- [2] dos Santos Euzeli C., A bidirectional DC-AC Converter, 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON), pp. 50-56, organization IEEE, 2012.
- [3] Menaka S. and Muralidharan S., Novel Symmetric and Asymmetric Multilevel Inverter Topologies With Minimum Number of Switches for High Voltage of Electric Ship Propulsion System, NISCAIR-CSIR, India, 2017.
- [4] B. Singh, Bhim Singh, Brij N and Chandra, Ambrish and Al-Haddad, Kamal and Pandey, Ashish and Kothari, Dwarka P., A review of Single-Phase Improved Power Quality AC-DC Converters, IEEE Transactions on industrial electronics, Vol. 50, pp. 962-981, organization IEEE, 2003.
- [5] Rech, Cassiano and Gründling, Hilton A. and Hey, Hélio L. and Pinheiro, Humberto and Pinheiro, José R., Uma Metodologia de Projeto Generalizada Para Inversores Multiníveis Híbridos, SBA: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica, Vol. 15, pp. 190-201, SciELO Brasil, 2004.
- [6] Manjrekar, Madhav D. and Steimer, Peter K. and Lipo, Thomas A., Hybrid multilevel power conversion system: A competitive solution for high-power applications, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 36, pp. 834-841, organization IEEE, 2000.
- [7] Mesquita Samuel Jó de, Nova Família de Inversores Multiníveis Assimétricos Com Estágio CA-CA e Poucos Componentes em Condução, 2016.