



RETIFICADOR TRIFÁSICO DE 12 PULSOS COM AUTOTRANSFORMADOR E CONVERSORES CUK ISOLADOS

Ana Lúcia Soares*¹, Antônio de Oliveira Costa Neto¹, Luiz Carlos Gomes de Freitas¹, Gustavo Brito de Lima¹, Ernane Antônio Alves Coelho¹

¹FEELT – Universidade Federal de Uberlândia

Resumo – Com o intuito de melhorar a qualidade da energia surgiram topologias de retificadores multipulsos conectadas a autotransformadores que possuem um alto fator de potência e reduzem a distorção harmônica total das correntes de linha. Entretanto, eles exigem reatores ou transformadores de interfase para corrigir o desequilíbrio das tensões secundárias causadas pelo autotransformador de mudança de fase, aumentando o custo e o volume da estrutura. Para resolver este problema, várias topologias de conversores multipulsos com autotransformadores e conversores estáticos surgiram como a topologia apresentada que é de um retificador de 12 pulsos com Autotransformador Autoconectado Delta e Conversores Cuk Isolados.

Palavras-Chave - autotransformador, conversores, distorção, multipulsos, fator de potência.

THREE-PHASE 12-PULSE RECTIFIER WITH AUTOTRANSFORMER AND CUK ISOLATED CONVERTERS

Abstract - In order to improve the quality of the energy, multi-pulse rectifier topologies connected to autotransformers have a high power factor and reduce the total harmonic distortion of the line currents. However, they require reactors or interface transformers to correct the unbalance of the secondary voltages caused by the phase-shifting autotransformer, raising the cost and volume of the structure. To solve this problem, several topologies of multipulse converters with autotransformers and static converters have emerged as the topology presented that is of a 12-pulse rectifier with Delta Autoconnected Autotransformer and Isolated Cuk Converters.

Keywords - autotransformer, converters, distortion, multipulse, power factor.

I. INTRODUÇÃO

Conversores de múltiplos pulsos se apresentam como uma das técnicas de se corrigir o fator de potência e eliminar as distorções harmônicas presentes nas correntes injetadas na rede elétrica, principalmente quando baseados em autotransformadores, que possuem peso e volume reduzidos,

pois possui baixo processamento de potência em relação ao núcleo, uma vez que somente cerca de 18% da potência processada passa por meios magnéticos.

Levando isso em consideração, algumas topologias utilizando autotransformadores foram criadas como as que se seguem.

Em [1], [2] observa-se um autotransformador de 18 pulsos com conexão Delta Diferencial conectado a Transformadores de Interfase (IPTs). Ele possui baixa distorção harmônica total das correntes de linha e alto fator de potência. Entretanto estes elementos exigidos para corrigir as diferenças instantâneas de tensão devido à defasagem entre as saídas retificadas elevam o peso e volume do retificador.

Outra possibilidade de conexão utilizando autotransformador é empregando conversores estáticos ao invés dos IPTs. Isso pode ser visto em topologias que envolvem os conversores Full-Bridge [3], [4], [5], conversores Boost [2], [6] e conversores Sepic [7], [8]. Os conversores Full-Brige possuem isolamento em alta frequência, mas necessitam de um filtro LC na saída, além de possuir um número elevado de semicondutores. Os conversores Boost não precisam de filtro apresentam característica de fonte de corrente na entrada, entretanto não têm isolamento galvânico. Já os conversores Sepic também apresentam característica de fonte de corrente na entrada, possibilitam a regulação da tensão de saída e podem operar com abaixador ou elevador de tensão.

Neste contexto, este trabalho apresenta um retificador de 12 pulsos com autotransformador Delta diferencial e dois conversores Cuk. O conversor Cuk tem entrada com característica de fonte de corrente e isolamento galvânico, emprega transferência capacitiva entre entrada e saída, apresenta um transformador de alta frequência, bem reduzindo e não influenciando no seu peso e volume. Este retificador pode ser empregado em um grande número de aplicações que envolvem telecomunicações, acionamentos de máquinas elétricas, carregadores de baterias e aeronaves mais elétricas (MEA).

II. ESTRUTURA PROPOSTA

A fig. 1 apresenta o retificador de 12 pulsos proposto com autotransformador delta diferencial e dois conversores Cuk isolados, operando no modo de condução contínua. Ele possui

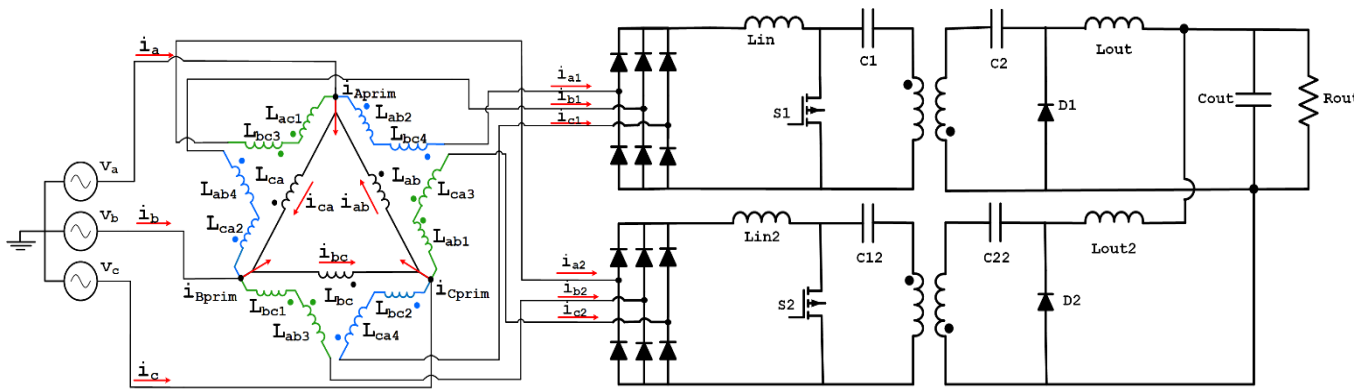


Fig.1 – Retificador de 12 Pulsos com Autotransformador Delta Diferencial e Conversores Cuk Isolados.

baixa distorção harmônica das correntes de entrada e alto fator de potência.

A. Autotransformador Delta Diferencial

O autotransformador usado foi projetado de acordo com [3] – [5]. Ele possui três enrolamentos primários e doze enrolamentos secundários. Na sua saída são gerados dois sistemas trifásicos defasados em 30° entre si, que são interligados a pontes retificadas de seis pulsos cada. Este autotransformador não possui isolamento galvânico processando apenas parte da potência, cerca de 18%, que é responsável pelas defasagens e ajustes de tensão. Apresentando, dessa forma, núcleo com peso e volume reduzidos.

B. Conversores Cuk

O conversor Cuk isolado possui um transformador em alta frequência entre dois capacitores (C1 e C2). É um conversor CC-CC com as seguintes características: fonte de corrente na entrada, isolamento entre entrada e saída, controle de sobrecorrente, sua transferência de energia entre entrada e saída é capacitiva, baixa ondulação de corrente de entrada e ampla faixa de tensão de saída [12], [13].

1) Etapas de Operação

No modo de condução contínua, ele possui duas etapas de operação:

- 1ª: Como visto Em Fig. 2, quando a chave S1 é ligada, a energia da fonte é armazenada pelo capacitor C1 e é transferida através do transformador, formando uma corrente negativa (fora do ponto) em seu enrolamento primário e consequentemente uma corrente positiva (no ponto) no secundário, passando pelo capacitor C2 e descarregando no indutor Lout, no capacitor Cout e na Carga Rout.

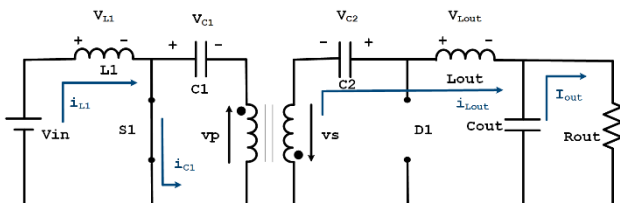


Fig.2 – Conversor Cuk operando com a chave S1 ligada.

- 2ª: Quando se desliga a chave S1, a fonte Vin e a energia armazenada no indutor Lin transferem sua energia através do capacitor C1, criando no primário do transformador uma corrente positiva e, dessa forma, uma corrente negativa no seu secundário, o que polariza o diodo D1 e é descarregada no indutor Lout, no capacitor Cout e na carga Rout, conforme observado na Figura 3.

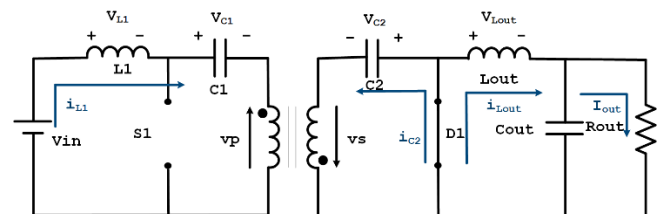


Fig.3 – Conversor Cuk operando com a chave S1 desligada.

C. Técnica de Controle

A técnica de controle é feita impondo correntes triangulares com frequência em torno de 360Hz nos indutores de entrada de cada conversor Cuk. Para este fim, é preciso que estas correntes estejam em fase com qualquer tensão de linha do secundário do autotransformador do mesmo grupo retificador em que a corrente de linha, de acordo com a Figura 4 que mostra a tensão de linha Vab1 e as correntes de entrada (i_{L1} e i_{L2}) de cada grupo retificador.

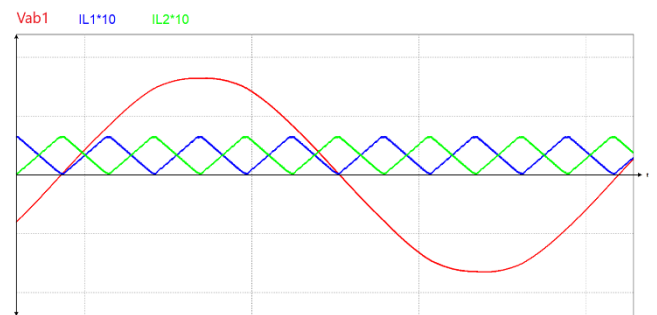


Fig.4 – Formas de onda de tensão de linha Vab1 do secundário do autotransformador e correntes imposta na entrada de cada conversor CC-CC.

Conforme apresentado na Fig. 5, a estratégia de controle ocorre da seguinte maneira: o sinal da tensão de saída (V_o') é comparado com um sinal de referência de tensão desejada

(Vref). Esse erro é enviado a um compensador proporcional integral (Cv) que processa esse sinal. A saída de Cv é multiplicada por uma referência triangular IrefTr gerando a referência de corrente Iref que é comparada com ILin' criando erro(s) que é enviado ao compensador proporcional integral de corrente Ci(s) que processa este sinal. A saída de Ci(s) é enviada ao comparador PWM que compara este sinal com um dente de serra, permitindo a alteração na razão cíclica na função transferência GiLin(s)/d(s) e na corrente ILin(s) da Planta (Gvo(s)/iL(s)).

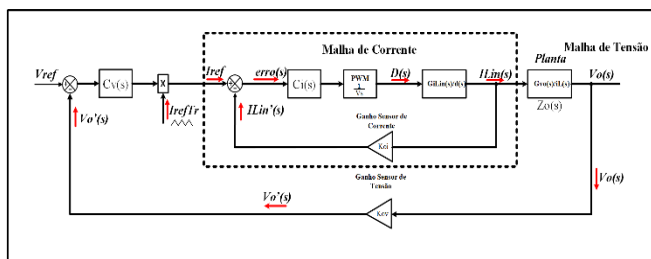


Fig.5 – Diagrama de controle.

III. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

A fim de validar a estratégia de controle proposta, foram realizadas simulações computacionais deste retificador usando o software PSIM[®], mostrando que este retificador opera com um fator de potência de 0,99 e uma taxa de distorção harmônica total de 3,44%.

A Fig. 6 que apresenta as correntes de linha da entrada do autotransformador, mostrando que com a estratégia de controle usada estas correntes são quase senoidais. E a Fig.7 traz a resposta dinâmica dos controladores da tensão de saída quando submetidos a um degrau de descida e subida de ±50%, comprovando um comportamento satisfatório com um tempo de assentamento de 300ms e ultrapassagem percentual de 15%.

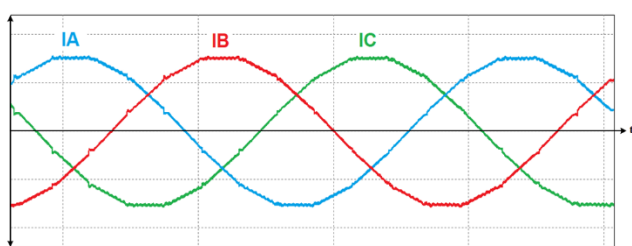


Fig.6 - Correntes de linha da entrada do autotransformador.

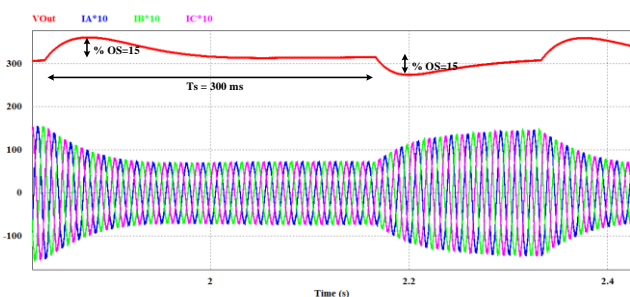


Fig.7 – Resposta ao degrau de ± 50%.

Para verificar os resultados de simulação, um protótipo de 2kW, está desenvolvido e analisado em laboratório e as especificações deste retificador encontram-se na tabela I.

TABELA I
Especificações de Projeto

Tensão de linha da Entrada	220Vrms
Tensão no barramento CC	315Vcc
THD _i	de acordo com IEC 61000 3-2
Conversores Cuk	
Potência de Saída de cada conversor	1000W
Frequência Máxima de Chaveamento	50kHz
Indutância Lin1, Lin2, Lout1, Lout2	5mH
Indutância Magnetizante do	1mH
Transformador	
Capacitâncias Ca1, Ca2, Cb1, Cb2	564nF
Capacitância de saída Cout	900µF
Chaves S1 e S2	MOSFET SCT20N120 (20A/1200V)
Diodos D1 e D2	RHRG30120 (30A / 1200V)

A Fig. 8 mostra um comparativo entre as harmônicas individuais da corrente de entrada com a norma IEC 61000 3-2.

Como é observado, a distorção harmônica individual das correntes de entrada apresenta valores inferiores quando comparados com a norma internacional.

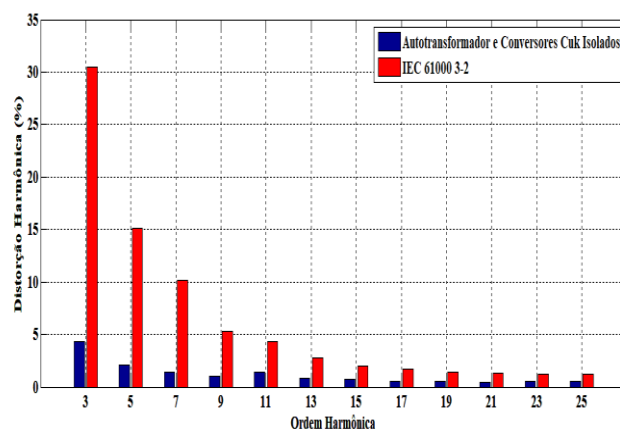


Fig. 8 – Espectro harmônico da topologia proposta comparado à norma IEC 61000-3-2.

Na Fig. 9, é mostrado a distorção harmônica em função da potência de saída. Como foi observado, em todas as situações de carga a estrutura apresentou um THD inferior ao encontrado em estruturas de 12 pulsos convencionais. O aumento da distorção é justificado pela dificuldade intrínseca que o controle da malha de corrente tem de impor com precisão as correntes triangulares de entrada em cada conversor.

Diminuindo a potência de saída, mais rápido a malha de corrente deve ser para que ocorra a imposição e equilíbrio adequado em cada conversor, caso isso não ocorra, haverá um fluxo reativo de potencia fluindo dentro dos conversores SEPIC, impactando no fator de potência e THD. Observamos que à medida que se aumenta a potencia no conversor, mais fácil é para o controle impor as correntes e equilibrar a potência em cada conversor, fazendo com que o THD diminua significativamente.

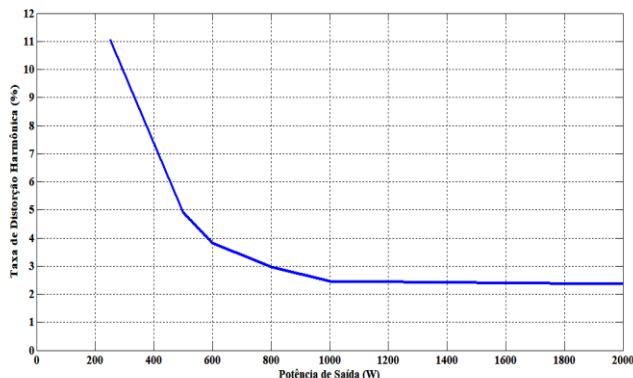


Fig. 9 – Taxa de distorção harmônica em função da potência aplicada na topologia proposta.

IV. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um autotransformador de conexão generalizado operando com dois conversores Cuk isolados. Os resultados computacionais do Cuk confirmam o alto desempenho em relação ao aumento do fator de potência e redução na taxa de distorção harmônica das correntes de entrada se comparado aos retificadores de 12 pulsos convencionais.

A estrutura proposta mostrou-se que pode ser utilizada em uma variedade de aplicações de telecomunicações, acionamentos de máquinas elétricas, carregadores de bateria e aeronaves elétricas MEA.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UFU, CAPES e CNPq (Nos processos: 304489/2017-4 e 420602/2016-0) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] R. C. Fernandes, P. S. Oliveira, F. J. M. Seixas, “A Family of Autoconnected Transformers for 12-and 18-Pulse Converters Generalization for Delta and Wye Topologies”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 7, p. 2065-2078, 2011.
- [2] F. J. M. Seixas, I. Barbi, “A New 12 kW Three-Phase 18-Pulse High Power Factor AC-DC Converter with Regulated Output Voltage for Rectifier Units”, *Telecommunication Energy Conference, INTELEC'99. The 21st International*, p.295, IEEE 1999.
- [3] F. J. M. Seixas, I. Barbi, “A New Three-Phase Low THD Power Supply with High-Frequency Isolation and 60V/200A Regulated DC Output”, *Power Electronics Specialists Conference, PESC. 2001. IEEE 32nd*, vol.3, June 2001.
- [4] F. J. M. Seixas, I. Barbi, “A New 12 kW Three-Phase Low THD Rectifier with High-Frequency Isolation Regulated DC Output”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 2, p. 371-377, March 2004.
- [5] S. Choi, “A Three-Phase Unity Power Factor Diode Rectifier with Active Input Current Shapping”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 6, pp. 1711-1711, December 2005.
- [6] R. C. Fernandes, F. J. M. Seixas, “AC-DC Three-Phase Multipulse Converter with Boost DC-DC Stage and Constant Hysteresis Control”, *Power Electronics Conference (COBEP)*, Brazilian, p. 403-408, 2011.
- [7] A. C. Lourenço, F. J. M. Seixas, J. C. Pelicer, P. S. Oliveira, “18-Pulse Autotransformer Rectifier Unit Using Sepic Converters for Regulated Dc-Bus and High Frequency Isolation”, *IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, p.1-6, November 2015.
- [8] A. O. C. Neto, A. L. Soares, G. B. Lima, D. B. Rodrigues, E. A. A. Coelho, L. C. G. Freitas, “Optimized 12-Pulse Rectifier with Generalized Delta Connection Autotransformer and Isolated Sepic Converters for Sinusoidal Input Line Current Imposition”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, pp. 3204-3213, July 2018.
- [9] J. R. de Britto, A. E. Demian, L. C. de Freitas, V. J. Farias, E. A. A. Coelho, J. B. Vieira, “A Proposal of Led Lamp Driver for Universal Input Using Cuk Converter”, *Proc. IEEE Power Electron. Special Conf.*, p. 2640-2644, June 2008.
- [10] A. Newton, T. C. Green, D. Andrew, “C/DC Power Factor Correction Using Interleaved Boost and Cuk Converters”, *Proc. Inst. Electr. Eng. PEVCD Conf.*, p. 293-298, 2000.
- [11] N. Mohan, T. M. Undeland, “Power Electronics Converters Applications and Design”, *John Wiley & Sons*, 2007.
- [12] A. V. Costa, D. B. Rodrigues, G. B. Lima, L. C. Freitas, E. A. A. Coelho, V. J. Farias, L. C. G. Freitas, “New Hybrid High-Power Rectifier with Reduced THDi and Voltage-sag Ride-Through Capability Using Boost Converter”, *IEEE trans. Industry Applications*, vol. 49, no.6, p 2421 – 2436, November/December 2013.
- [13] J. A. Pomílio, “Pré-reguladores de Fator de Potência”, *Publicação FEE*, v.3, p.95, 2007.