



ESTUDO COMPUTACIONAL DE TOPOLOGIAS ALTERNATIVAS DO CIRCUITO DE GREINACHER PARA GERAÇÃO OTIMIZADA DE ALTAS TENSÕES CONTÍNUAS

Carlos Ermídio Ferreira Caetano¹, Raphael Batista*¹, Diogo Sampaio César Souza¹, Ivan José da Silva Lopes¹ e Wallace do Couto Boaventura¹

¹UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

Resumo - Fontes para o fornecimento de alta tensão em corrente contínua são utilizadas para diversos fins, englobando desde pesquisa científica e aplicações industriais. Uma alternativa simples para construir tais fontes é a consideração de circuitos multiplicadores de tensão, como a cascata de Greinacher. Este trabalho apresenta comparações da resposta de fontes desenvolvidas a partir de técnicas de projeto tradicionais e alternativas por meio da cascata de Greinacher. São apresentados as formulações e cálculos associados ao seu projeto e a resposta das fontes por meio da simulação no programa PSpice. Os resultados indicam o ganho significativo de rendimento e redução acentuada nos níveis de *ripple* da fonte quando projetadas por meio de técnicas alternativas para as cascatas de Greinacher, sugerindo um estudo mais aprofundado nas etapas de projeto. Tal realização tende a otimizar parâmetros de interesse da fonte, a citar a minimização das perdas e das oscilações na saída do circuito.

Palavras-Chave - Circuitos multiplicadores, Diodos, Geradores de alta tensão, Simulação de circuitos.

COMPUTATIONAL ANALYSIS OF ALTERNATIVE TOPOLOGIES FOR GREINACHER CIRCUITS TO REACH OPTIMIZED HIGH-VOLTAGE DC GENERATION

Abstract - High-voltage direct current power supplies are required for many purposes, ranging from scientific research to industrial applications. A simple alternative to construct such power supplies is to consider multiplier circuits as the Greinacher circuit in their projects. This work shows the comparison of the output response of different power supplies developed by traditional and alternative techniques for Greinacher circuits. The formulation associated with their project is presented and the output signals are provided by simulations using

PSpice. The results indicate a significant efficiency gain and a considerable reduction of the ripple levels for the situation where the power supply is projected by the alternative methodology for the development of a Greinacher circuit. This behavior suggests that a depth study of the project steps is necessary to obtain optimized power supply parameters, such as the power losses minimization and attenuation of the output oscillation of the circuit.

Keywords - Circuit simulation, Diodes, Multiplying circuits, High-Voltage power supply.

I. INTRODUÇÃO

Os geradores ou fontes de alta tensão em corrente contínua (CC), do inglês *High-Voltage Direct Current* (HVDC), são utilizadas em diversas aplicações industriais e em diversos laboratórios de pesquisa científica, como: aceleradores de partículas, microscópios eletrônicos, sistemas de raio-X, multiplicadores de fótons, precipitação e filtragem de gases ou poeiras, pintura ou revestimento eletrostático e outros. Em todas os casos, é requerida a geração de campos elétricos muito intensos, o que se associa diretamente a níveis elevados de alta tensão nos geradores.

O desenvolvimento de fontes HVDC com tensão de saída da ordem de dezenas a centenas de kV pode ser realizado por meio dos tradicionais circuitos multiplicadores de tensão [1], sendo um dos mais comuns o arranjo em cascata de Greinacher [2,3]. O projeto que considera essa topologia deve considerar algumas boas práticas para que o rendimento do circuito multiplicador seja aceitável, já que tal parâmetro é dependente da carga ligada à fonte de alta tensão. A literatura reporta trabalhos que tem o objetivo de melhorar alguns parâmetros elétricos da fonte HVDC, a citar o aumento do rendimento do gerador e a diminuição da oscilação de tensão na saída do circuito, o chamado *ripple*.

Uma topologia alternativa à tradicional cascata de Greinacher é proposta em [4]. Sua ideia se baseia na oposição angular de fases em corrente alternada (CA) com a finalidade de atenuar o *ripple* na tensão de saída do gerador. Sua implementação por meio de uma topologia multiníveis é realizada em [5,6], na qual é reportado uma grande redução

*raphaelbatista@ufmg.br

nos níveis de *ripple* por meio do procedimento adotado e do uso de fonte CA de elevada frequência para alimentação do circuito.

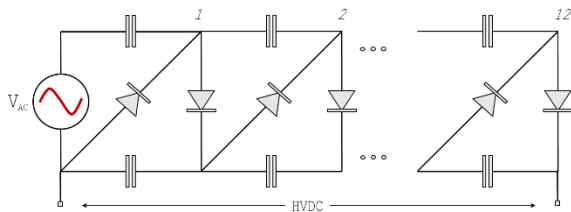
Este trabalho apresenta fontes HVDC desenvolvidas a partir das técnicas apresentadas em [4-6], com o principal objetivo de investigar as vantagens e desvantagens de cada metodologia. São apresentadas comparações entre o circuito tradicional de Greinacher e com uma nova topologia em que o conceito de compensação de fases é explorado em um circuito multinível de forma similar a [6]. Ademais, um foco é dado aos níveis de *ripple* na saída e no rendimento dos geradores propostos.

II. PROJETO DO CIRCUITO EM CASCATA DE GREINACHER

A. Funcionamento e componentes do circuito

O circuito em cascata de Greinacher é composto, essencialmente, por uma fonte de tensão CA, diodos e capacitores no esquema ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Representação do circuito clássico em cascata de Greinacher.



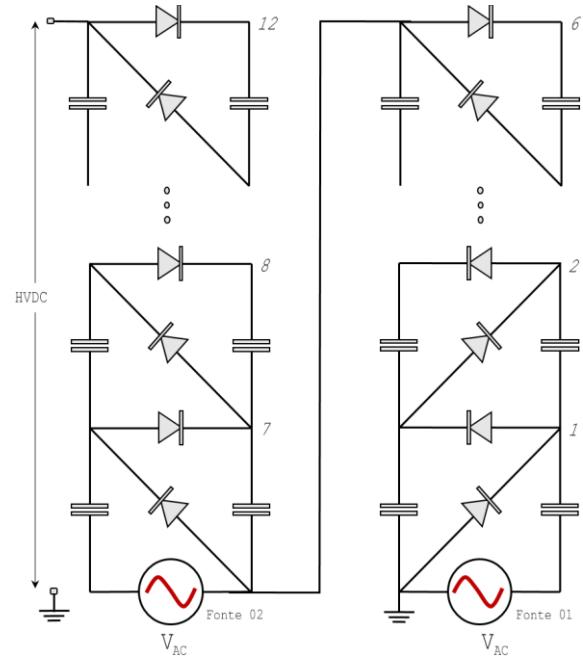
O funcionamento do circuito em cascata de Greinacher consiste no dobramento da tensão a cada estágio acrescido ao gerador, de tal forma que a tensão na saída seja $2nV_{AC}$, em que n é o número de estágios e V_{AC} é a amplitude máxima da tensão CA de entrada.

O modelo de um circuito multinível em cascata de Greinacher é ilustrado na Figura 2, em que o exemplo possui dois níveis e quatro estágios no total. A introdução de novas fontes de tensão em pontos intermediários dos estágios do circuito multiplicador permite o aumento do rendimento do gerador final, como indicado em [1,4,6]. Deve-se atentar ao nível de isolamento das fontes adicionais nesta topologia, seguindo o raciocínio de que quanto maior o número do estágio em que a fonte CA for introduzida, mais robusto deve ser seu nível de isolamento.

A referência [4] apresenta uma estrutura similar à mostrada na Figura 2. Seu complemento é a adoção de fases em ângulos opostos para as fontes CA 01 e 02 da Figura 2. É mostrado que o uso de fontes CA com 180° de defasagem entre si diminuem significativamente o *ripple*, o que permite o uso do gerador em aplicações em que a oscilação da tensão de saída é prejudicial ao circuito alimentado pela fonte HVDC.

A apresentação das topologias sugere que o uso de circuitos em cascata de Greinacher multiníveis com fontes CA defasadas entre si resultam em ganhos expressivos no rendimento dos geradores CC e tendem a apresentar baixos níveis de *ripple* na tensão de saída.

Figura 2: Representação de um circuito multiníveis em cascata de Greinacher.



B. O ripple e a queda de tensão nos circuitos em cascata de Greinacher

O *ripple* e a queda de tensão são dois fatores usados para se determinar a qualidade e o rendimento da fonte HVDC. Uma fonte HVDC ideal, sem carga, não apresenta queda de tensão e *ripple* na forma de onda de saída do circuito. Quando uma carga é conectada, a tensão de saída se modifica, apresentando uma queda de tensão ΔV_0 e um *ripple* igual a $2\delta V$. Tais parâmetros são descritos pelas seguintes expressões [1,4]:

$$\delta V = \frac{I}{f_s C} \frac{n(n+1)}{4} \quad (1)$$

$$\Delta V_0 = \frac{I}{f_s C} \left(\frac{2n^3}{3} - \frac{n}{6} \right) \quad (2)$$

Onde:

- I - Corrente drenada pela carga.
- f_s - Frequência de oscilação da fonte CA.
- C - Capacitância de cada capacitor presente nos estágios do multiplicador de tensão (supostos idênticos na análise do circuito).
- n - Número de estágios do circuito.

A máxima tensão V_{0m} de saída da fonte HVDC, quando alimenta uma carga, pode ser estimada por:

$$V_{0m} = 2nV_{AC} - \Delta V_0 \quad (3)$$

As Equações (2) e (3) indicam que a tensão de saída V_{0m} é dependente do número de estágios n . Assim, para calcular o valor otimizado do número de estágios do multiplicador, podemos derivar V_{0m} em relação a n :

$$\frac{\partial V_{0m}}{\partial n} = 0 \Rightarrow 2V_{AC} - \frac{I}{f_s C} \left(2n^2 - \frac{1}{6} \right) \quad (4)$$

Ao colocarmos o número de estágios em evidência na Equação (4), chega-se ao número otimizado n_{op} :

$$n_{op} = \sqrt{\frac{V_{AC} f_s C}{I} + \frac{1}{12}} \quad (5)$$

O número n de estágios pode ser escolhido conforme seu valor ótimo oriundo da Equação (5) ou por critérios de projeto. Nesta situação, a relação entre a tensão de saída da fonte e a fonte de tensão CA de entrada define o valor n escolhido pelo projetista – n pode ser usado, neste caso, para escolha dos capacitores e/ou da frequência natural da fonte CA.

C. Procedimento para desenvolver circuitos em cascata de Greinacher por meio das topologias apresentadas

Com o objetivo de exemplificar o uso das equações anteriores e definir os circuitos de cada topologia para posterior avaliação, definem-se valores para os parâmetros de interesse de projeto. Consideremos o caso em que $V_{AC} = 125$ V, $f_s = 60$ Hz, $C = 95$ μ F e $I = 20$ mA é a corrente drenada pela carga. Por meio da Equação (5), obtém-se um valor n_{op} igual a 6,13, o qual sugere a escolha de n igual a 6 estágios em cada nível do circuito.

Para o projeto dos circuitos, adotou-se um número máximo de 6 estágio por nível, com exceção do circuito convencional de Greinacher, ilustrado na Figura 1, o qual possui 12 estágios. Assim, almeja-se a equivalência nos valores máximos de tensão de saída e, assim, comparar o rendimento das diferentes topologias de maneira mais justa.

As Equações (2) e (3) podem ser modificadas para o fim de se obterem expressões para cálculo da corrente quando há a presença de carga na fonte HVDC. Para o caso da tensão máxima de saída, tem-se que:

$$V_{om} = 2nV_{AC} - \frac{2nV_{AC}}{f_s RC} \left(\frac{2n^3}{3} - \frac{n}{6} \right) \quad (6)$$

Onde:

R - Valor da resistência da carga na saída da fonte HVDC.

A corrente drenada será, portanto, dada pela razão entre V_{om} e a resistência R da carga:

$$I = \frac{V_{om}}{R} = \frac{2nV_{AC}}{R} \left[1 - \frac{1}{f_s RC} \left(\frac{2n^3}{3} - \frac{n}{6} \right) \right] \quad (7)$$

Supondo uma carga resistiva de 100 k Ω , a substituição dos valores na Equação (7) resulta em uma corrente de 22,5 mA para n igual a 6 estágios e dois níveis. Por conta dos dois níveis, as Equações (1) e (2) devem ser multiplicadas por dois, resultando em um nível de *ripple* $2\delta V$ igual a 147,37 V e uma queda de tensão ΔV_0 de 1003,51 V.

Os percentuais de *ripple* F_r e queda de tensão F_{QV} na fonte HVDC são estimados por meio das seguintes expressões:

$$F_r = \frac{2\delta V}{V_{om}} \quad (8)$$

$$F_{QV} = \frac{\Delta V_0}{2nV_{AC}} \quad (9)$$

Para os circuitos desenvolvidos, as Equações (8) e (9) resultam em F_r igual a 7,4% e F_{QV} igual a 33,4%.

Se for considerado um gerador HVDC multinível com 3 níveis de 4 estágios cada, mantendo-se as características da fonte, obtém-se valores de F_r e F_{QV} , respectivamente, iguais a 4,9% e 17,2%.

D. Fases com ângulos opostos e atenuação dos níveis de ripple

A principal contribuição de [4] em relação ao desenvolvimento de geradores HVDC baseados em circuitos em cascata de Greinacher é o uso de fontes CA com ângulos opostos para atenuação dos níveis de *ripple* na saída. Segundo os autores, “se o *ripple* possuir forma de onda senoidal ou uma forma de onda periódica qualquer, a oposição de fase das fontes de alimentação CA cancelará os picos de tensão, de tal modo que o *ripple* será significativamente atenuado na forma de onda de tensão da saída. Entretanto, a prática mostra que as formas de onda do *ripple* são ligeiramente distorcidas devido a dinâmica de descarga ou mesmo por causa de não linearidades do circuito”. Logo, o *ripple* não desaparece da saída, embora seja atenuado.

Para ilustrar tais características, as Figuras 3 e 4 exemplificam, respectivamente, formas de onda com ângulos opostos e a atenuação do *ripple* por conta da superposição das ondas.

Figura 3: Ilustração das formas de onda típicas obtidas com a oposição de fases aplicada ao cancelamento do *ripple* da tensão de saída – adaptado de [4].

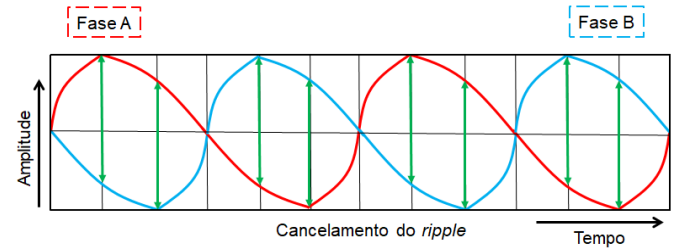
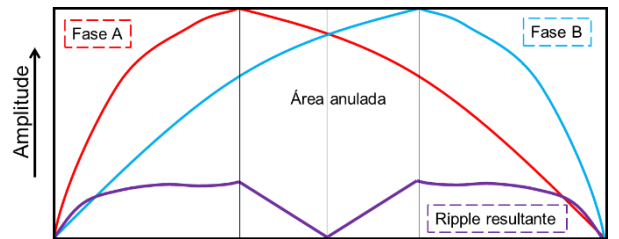


Figura 4: Representação da parcela cancelada do *ripple*, com destaque para a forma de onda final – adaptado de [4].



III. SIMULAÇÃO DOS CIRCUITOS EM CASCATA DE GREINACHER E RESULTADOS

Optou-se por simular cinco topologias distintas, cujas características são descritas a seguir:

- Caso 1: Arranjo clássico do circuito em cascata de Greinacher, como ilustrado na Figura 5;
- Caso 2: Circuito de dois níveis, com 6 estágios por nível, como ilustrado na Figura 6;
- Caso 3: Mesma topologia do caso 2, mas com duas fontes CA com ângulos opostos;

- Caso 4: Circuito em cascata de Greinacher de 3 níveis, com 4 estágios por nível, como ilustrado na Figura 7;
- Caso 5: Mesma topologia do caso 4, mas com três fontes CA defasadas de 120° entre si.

Figura 5: Circuito representativo do caso 1.

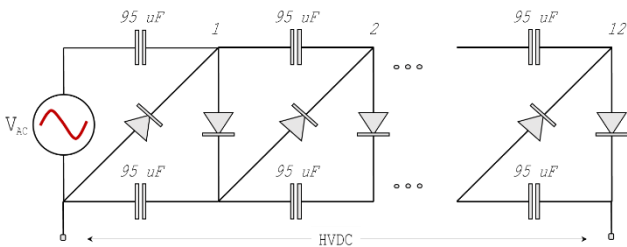


Figura 6: Circuito representativo dos casos 2 e 3.

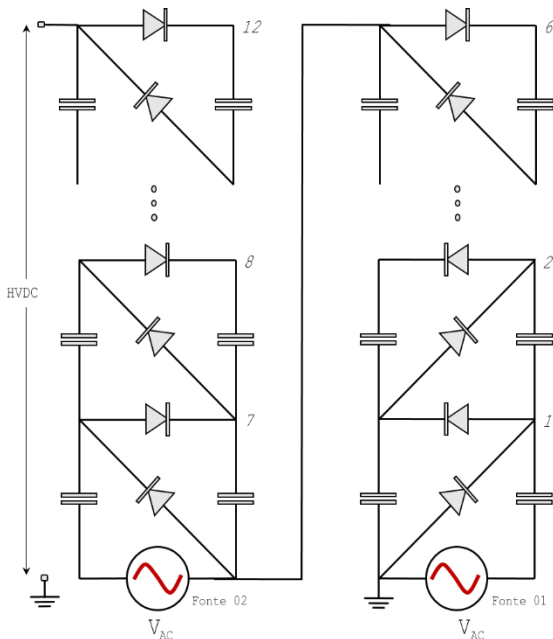
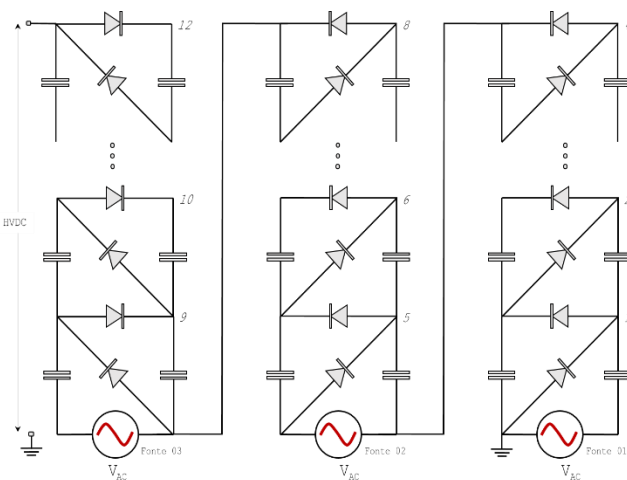


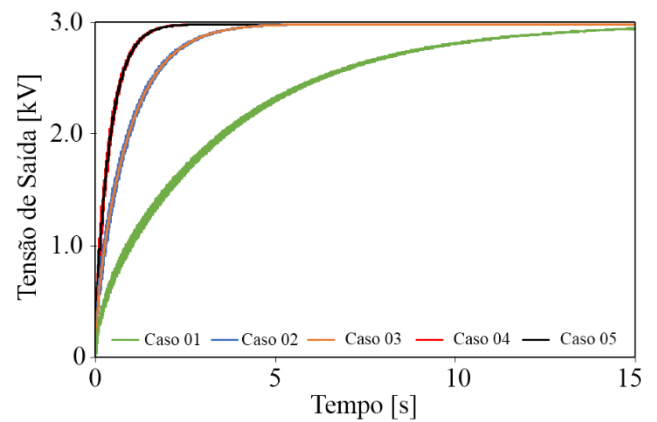
Figura 7: Circuito representativo dos casos 4 e 5.



As topologias consideradas nos casos 1 a 5 são simuladas no programa PSpice [7]. Duas condições de funcionamento dos geradores HVDC desenvolvidos são avaliadas, sendo a primeira o caso em que não há carga na saída – fonte a vazio.

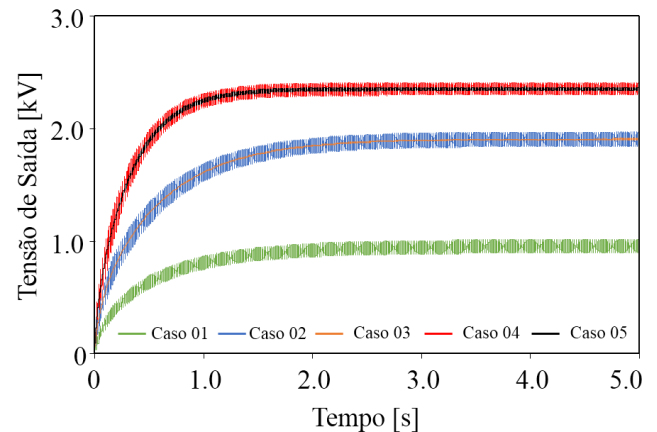
A Figura 8 apresenta os resultados obtidos para todos os casos em que não há carga na saída dos geradores. Como indicado pela Equação (3), a fonte a vazio apresenta tensão máxima de saída que tende a $2nV_{AC}$, que, para os casos avaliados, resulta em 3 kV. Nota-se que há diferenças na dinâmica de cada gerador, com os casos 4 e 5 apresentando cerca de 2,5 s para atingir o valor final, enquanto os casos 2 e 3 demandam cerca de 5 s para o mesmo feito. Ademais, o caso 1 apresentou a dinâmica mais lenta, com cerca de 15 s para atingir o valor final na saída do circuito.

Figura 8: Curvas de tensão na saída dos geradores HVDC avaliados para condição de fonte a vazio.



A Figura 9 apresenta os resultados da condição em que os geradores HVDC possuem uma carga resistiva de $100\text{ k}\Omega$ ligada às suas saídas. Os menores tempos de carregamento e de queda de tensão são observados nos casos 4 e 5, algo esperado por utilizarem topologia com maior número de níveis e, conseqüentemente, menor número de estágios. A queda de tensão estimada é de, aproximadamente, 20%, valor próximo ao apresentado na seção II, item C – 17,2%.

Figura 9: Curvas de tensão na saída dos geradores HVDC avaliados para condição de carga resistiva de $100\text{ k}\Omega$.



O rendimento para os casos 2 e 3 também se mostrou superior ao do caso 1. A queda de tensão observada para os

casos 2 e 3 foi de 36%, similar ao estimado na seção II, item C – 33,4%.

Outro parâmetro elétrico passível de avaliação na condição de fonte com carga é a corrente drenada na saída do gerador. Como apresentado na Figura 10, as topologias com menor queda de tensão, casos 4 e 5, possuem a maior corrente fornecida à carga, o que resulta em maior potência fornecida à mesma. O valor de 23 mA é similar a aquele estimado na seção II, item C – 22,5 mA.

A qualidade da tensão de saída dos geradores pode ser estimada por meio dos resultados apresentados nas Figuras 9 e 10. A Tabela I mostra os valores de *ripple* associados aos casos avaliados.

Figura 10: Curvas de corrente drenada pela carga resistiva de 100 kΩ na saída dos geradores HVDC avaliados.

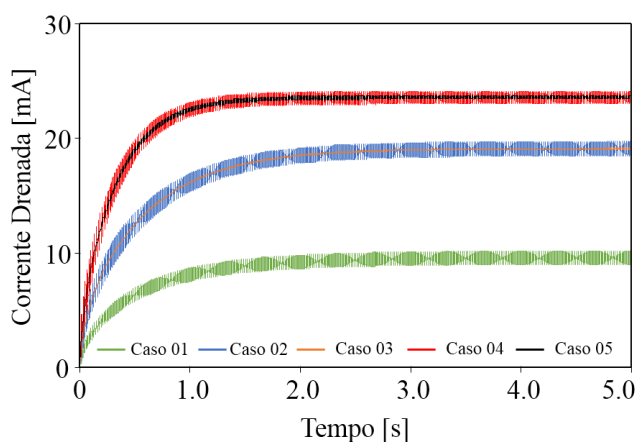


Tabela I: Valor percentual do *ripple* nos geradores HVDC

Arranjo	Nível de <i>ripple</i>
Caso 1	12,5%
Caso 2	6,8%
Caso 3	0,5%
Caso 4	4,7%
Caso 5	1,3%

Observa-se uma amplitude significativa de oscilação da tensão nos casos 1, 2 e 4, sendo o maior apresentado no primeiro arranjo de 12,5%. Nas topologias em que a oposição do ângulo de fases é utilizada, isto é, nos casos 3 e 5, o nível de *ripple* possui os menores índices, sendo inferiores a 1,5%. Tal característica respalda a hipótese de se utilizar fontes CA com ângulos opostos para atenuar os níveis de *ripple*.

Os níveis de *ripple* das simulações são similares aos estimados na seção II, item C. Estima-se um nível de *ripple* igual a 7,3% para o caso 2, enquanto o observado é 6,8%, e de 4,9% para o caso 4 – 4,7% observado. Os valores obtidos nas simulações novamente se aproximam da metodologia apresentada no item II deste trabalho.

Com o objetivo de detalhar as oscilações na tensão de saída dos casos 2 a 5, as Figuras 11 e 12 apresentam trechos retirados das simulações nos instantes finais do período de tempo considerado.

Figura 11: Detalhe do *ripple* na onda de tensão na saída dos geradores dos casos 2 e 3.

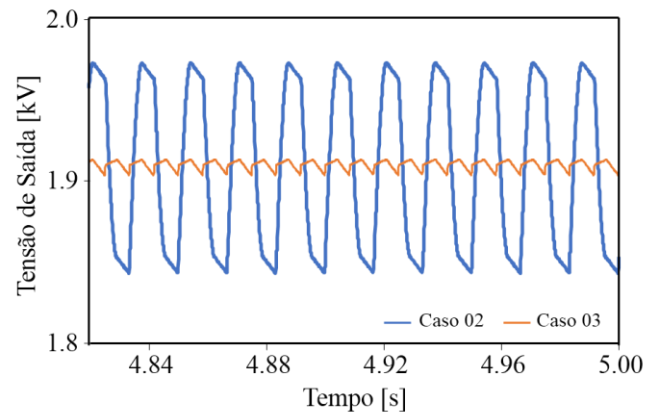
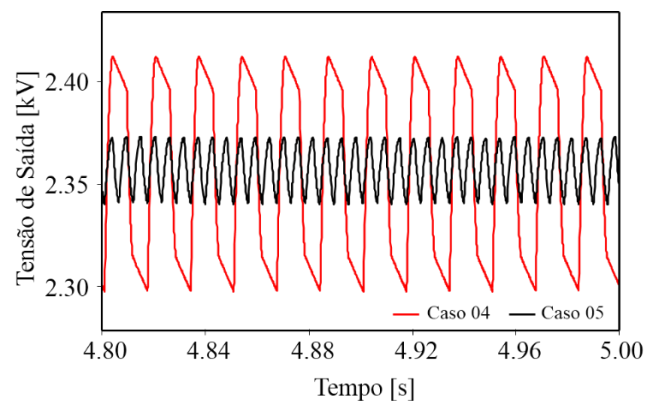


Figura 12: Detalhe do *ripple* na onda de tensão na saída dos geradores dos casos 4 e 5.



Observa-se claramente das Figuras 11 e 12 que o uso das fontes CA com ângulos opostos permitem a atenuação do *ripple*. Outra constatação é o aumento na frequência das oscilações nas condições em que as fontes CA possuem ângulos opostos, característica que pode ser atrativa para algumas cargas devido a maior facilidade em se filtrar frequências mais elevadas. Conseqüentemente, é possível que as ondas de tensão na saída dos geradores se tornem ainda mais suaves.

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo a respeito de diferentes topologias de circuitos em cascata de Greinacher para desenvolvimento de geradores HVDC. As metodologias de cada topologia foram apresentadas e simulações realizadas com o intuito de realizar comparações entre cada procedimento.

Os resultados do trabalho sugerem que o uso de fontes multiníveis tendem a aumentar o rendimento dos geradores HVDC. Quando aliado à consideração de fontes CA com ângulos opostos em sua alimentação, tendem a diminuir significativamente os níveis de *ripple* da tensão de saída, algo compatível com o que a literatura convencional indica.

Para trabalhos futuros, sugere-se a investigação experimental das topologias apresentadas no trabalho por meio de adaptações do protótipo de gerador HVDC em

funcionamento no Laboratório de Extra Alta Tensão da Universidade Federal de Minas Gerais (LEAT/UFMG). Resultados experimentais comparados com dados provenientes de simulações tendem a enriquecer a compreensão sobre o funcionamento das topologias avaliadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pelo suporte e o financiamento prestados à realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, *High Voltage Engineering: Fundamentals*, Newnes, 2nd Edition, Oxford, 2000.
- [2] H. Greinacher, “Das Ionometer und seine Verwendung zur Messung von Radium- und Röntgenstrahlen”, *Physikalische Zeitschrift*, vol. 15, pp. 410-415, 1914.
- [3] H. Greinacher, “Über eine Methode, Wechselstrom mittels elektrischer Ventile und Kondensatoren in hochgespannten Gleichstrom umzuwandeln”, *Zeitschrift für Physik*, vol. 4, no. 2, pp. 195-205, 1921.
- [4] F. Hwang, Y. Shen, and S. H. Jayaram, “Low-Ripple Compact High-Voltage DC Power Supply”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 42, no. 5, pp. 1139-1145, 2006.
- [5] S. Iqbal, “A Hybrid Symmetrical Voltage Multiplier”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 1, pp. 6-12, 2014.
- [6] L. Katzir, and D. Shmilovitz, “Compact Multi-Level High-Voltage Power Supply for Vacuum Applications”, in *IEEE International Vacuum Electronics Conference*, vol. 12, no. 6, pp. 457-458, 2014.
- [7] J. Keown, *PSpice and Circuit Analysis*, Merrill, 2nd Edition, New York, 1993.