

Inversor sem Transformador com Redução da Corrente de Fuga para Sistemas Fotovoltaicos

Arnaldo O. Cunha Junior* Filipe A. da C. Bahia**
Joao P. R. A. Mello*** Fabiano F. Costa****

* Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação,
Universidade Federal da Bahia, BA, (e-mail: arnaldoocj@ufba.br).

** Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação,
Universidade Federal da Bahia, BA, (e-mail: filipe.bahia@ufba.br).

*** Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, Universidade
Federal Rural de Pernambuco, PE, (e-mail: joao.ramello@ufrpe.br).

**** Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação,
Universidade Federal da Bahia, BA, (e-mail: fabiano.costa@ufba.br).

Abstract: Distributed generation using renewable energies is a solution to meet the growing demand for energy around the world. In grid-connected photovoltaic systems, transformerless inverters play an important role as they are lighter, cheaper and more efficient than conventional ones. This paper proposes a transformerless inverter topology with AC-decoupling and DC-link midpoint clamping for photovoltaic systems, with the objective of solving the leakage current issue by eliminating common mode voltage fluctuation. A comparison with two other existing transformerless inverter topologies is performed. The proposed topology exhibits a reduction in leakage current, in addition to fewer devices in the current path and, consequently, lower losses. Simulation results are presented in order to demonstrate the best performance of the new topology.

Resumo: A geração distribuída através de energias renováveis é uma solução para atender a crescente demanda de energia em todo o mundo. Nos sistemas fotovoltaicos conectados a rede, os inversores sem transformador desenvolvem um importante papel visto que são mais leves, mais baratos e eficientes que os convencionais. Este artigo propõe uma topologia de inversor sem transformador com desacoplamento CA e grampamento ao ponto central do barramento CC para sistemas fotovoltaicos, com o objetivo de solucionar o problema da corrente de fuga através da eliminação da flutuação da tensão de modo comum. Uma comparação com outras duas topologias existentes de inversor sem transformador é realizada. A topologia proposta exibe uma redução na corrente de fuga, em adição a uma menor quantidade de dispositivos no caminho da corrente e, conseqüentemente, menores perdas. Resultados de simulação são apresentados a fim de demonstrar a melhor performance da nova topologia.

Keywords: Transformerless Inverter; Photovoltaic Systems; Distributed Generation; Leakage Current Reduction; Level-Shifted PWM.

Palavras-chaves: Inversor Sem Transformador; Sistemas Fotovoltaicos; Geração Distribuída; Redução de Corrente de Fuga; Modulação PWM Level-Shifted.

1. INTRODUÇÃO

A procura pela geração através de energias renováveis segue em alta por todo o mundo. Mesmo com o planeta sofrendo a pior pandemia de sua história, a geração de energia solar chegou em 2020 a um recorde anual de 18% de crescimento (SolarPower Europe (2021)). A produção descentralizada de energia utilizando os sistemas fotovoltaicos é uma solução para atender a necessidade crescente de energia, de forma a reduzir as perdas e economizar investimentos em transmissão em relação à geração centralizada. Nos sistemas fotovoltaicos conectados a rede, os transformadores desempenham um importante papel ao oferecer isolamento galvânica, de forma a eliminar correntes parasitas e evitar a injeção de corrente CC na rede. En-

tretanto, tais transformadores elevam o peso e o custo dos inversores, além de diminuírem sua eficiência e densidade de energia (Khan et al. (2019a)). A redução no peso e tamanho do transformador pode ser alcançada com um transformador de alta frequência no lado CC, porém a alta frequência resultará num aumento das perdas magnéticas e, conseqüentemente, numa redução da eficiência do sistema.

Para solucionar todos esses problemas, os sistemas sem transformador são utilizados, visto que são mais eficientes, mais leves e ocupam um menor espaço que os sistemas convencionais. Porém, há uma grande preocupação com a segurança desses inversores devido à corrente de fuga que aparecerá nesses sistemas. Sem isolamento galvânica providenciada pelo transformador, será estabelecido um

caminho direto entre a rede e os painéis como demonstrado na Fig. 1, determinado através da capacitância parasita (C_{PV}) que aparece entre os terminais do painel fotovoltaico e a terra (Freddy et al. (2013)). Com isso, uma corrente de modo comum indesejada se estabelecerá da rede para os painéis através do terra. Essa corrente, além de adicionar perdas ao sistema, causa graves problemas de segurança do sistema, distorção na corrente da rede, e interferência eletromagnética.

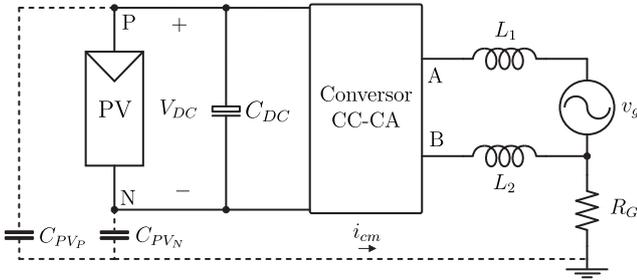


Figura 1. Modelo geral para um inversor monofásico sem transformador.

Diversas topologias de inversores para sistemas fotovoltaicos sem transformador estão sendo desenvolvidas ao longo dos últimos anos com o objetivo de reduzir a corrente de fuga que surgem nestes sistemas. Neste artigo, uma topologia de inversor sem transformador com redução de corrente de fuga é proposta. Ao combinar técnicas de desacoplamento, a concepção da topologia busca a mitigação da corrente de fuga ao mesmo ponto que propõe uma quantidade reduzida de dispositivos no caminho da corrente e, conseqüentemente, menores perdas. A base teórica, modelos utilizados e estados topológicos são discutidos ao longo do artigo, assim como os resultados de simulação em comparação a topologias existentes de inversores sem transformador.

2. MODELO DE MODO COMUM

O modelo de modo comum do inversor sem transformador é apresentado na Fig. 2, composto pelo conversor, indutores de filtro (L_1 e L_2) e capacitância parasita (C_{PV}).

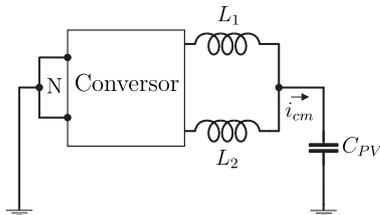


Figura 2. Modelo de modo comum do inversor.

A tensão de modo diferencial (V_{DM}) é obtida através da diferença entre V_{AN} e V_{BN} (tensões dos pontos A e B em relação ao terminal do painel fotovoltaico (ponto N)) e a tensão de modo comum (V_{CM}) obtida pelo valor médio entre V_{AN} e V_{BN} , como segue:

$$V_{DM} = V_{AN} - V_{BN} \quad (1)$$

$$V_{CM} = V_{AN} + \frac{V_{BN}}{2} \quad (2)$$

Como apresentado na Fig. 3, o conversor pode ser representado pelas tensões de polo V_{AN} e V_{BN} , que podem ser

expressadas em termos de V_{DM} e V_{CM} , como realizado nas equações 3 e 4:

$$V_{AN} = V_{CM} + \frac{V_{DM}}{2} \quad (3)$$

$$V_{BN} = V_{CM} - \frac{V_{DM}}{2} \quad (4)$$

Levando em consideração as equações apresentadas acima, chega-se ao modelo apresentado na Fig. 4, que por sua vez pode ser simplificado para duas fontes de tensão, como demonstrado na Fig. 5. Logo, a tensão equivalente de modo comum V_{ECM} será:

$$V_{ECM} = V_{CM} + \frac{V_{DM}}{2} \frac{L_2 - L_1}{L_1 + L_2} \quad (5)$$

Com a equação 5 apresentada, percebe-se que a parcela diferencial de V_{ECM} pode ser anulada caso os indutores L_1 e L_2 sejam iguais. E assim, a corrente de fuga I_{CM} dependerá fortemente do comportamento da tensão de modo comum. Dessa forma, topologias de conversores e técnicas de modulação são desenvolvidas para que esta tensão permaneça constante, a fim de eliminar a corrente de fuga nos sistemas fotovoltaicos sem transformador.

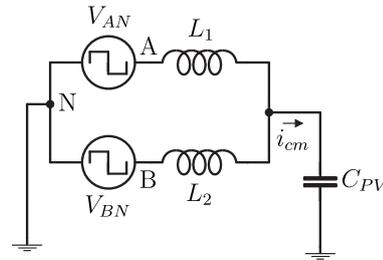


Figura 3. Modelo com fontes comutadas.

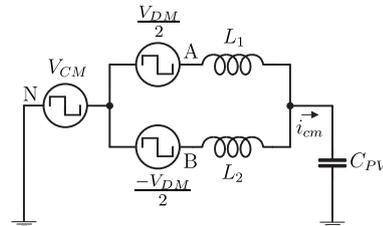


Figura 4. Modelo com tensão diferencial e de modo comum.

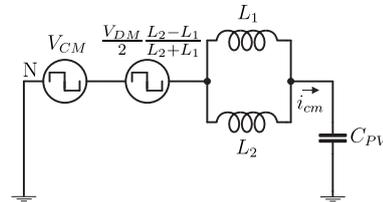


Figura 5. Modelo de modo comum simplificado.

3. TOPOLOGIAS DE INVERSOR SEM TRANSFORMADOR

Entre as técnicas utilizadas na concepção das topologias de inversor sem transformador estão a de desacoplamento CC e desacoplamento CA. No desacoplamento CC, é adicionada uma chave no lado CC do inversor para isolar

galvanicamente os módulos fotovoltaicos da rede durante o período de roda livre. O ponto negativo dessa técnica é que, como o desacoplamento é feito por dispositivos semicondutores, eles estarão incluídos no caminho da corrente nos períodos de condução. Já no desacoplamento CA, são adicionadas chaves no lado CA do inversor que funcionam como caminho da corrente no período de roda-livre, de forma que a malha de roda-livre será completamente isolada da malha de condução.

O ponto negativo de ambas técnicas de desacoplamento é que fica-se impossibilitado de controlar a tensão de modo comum durante o período de roda-livre, visto que as tensões de polo (V_A e V_B) ficam fluindo em relação ao barramento CC. Desta forma, a tensão de modo comum estará fluindo de acordo com os parâmetros parasitas e as capacitâncias das junções das chaves, fazendo com que uma corrente de fuga apareça durante esse período. Para solucionar este problema, foram projetadas topologias que realizam o grampeamento ao ponto central do barramento CC durante o período de roda-livre, de modo a garantir que a malha de roda-livre esteja no potencial equivalente à metade da tensão do barramento CC. As topologias que combinam as técnicas de desacoplamento com o grampeamento ao ponto central do barramento CC conseguem reduzir a corrente de fuga a valores extremamente satisfatórios.

3.1 Topologia HERIC

Uma topologia com desacoplamento CA foi proposta em Schmidt et al. (2003), denominada de Highly Efficient and Reliable Inverter Concept (HERIC). Este inversor, apresentado na Fig. 6, adiciona duas chaves que servem como caminho da corrente no período de roda-livre. Para isso, tanto S_5 como S_6 são fechados quando deseja-se $v_{inv}=0$, seja no semiciclo positivo ou no negativo da corrente. Para obter $v_{inv}=V_{DC}$ no semiciclo positivo, as chaves S_1 e S_4 são ligadas. Já para obter $v_{inv}=-V_{DC}$ no semiciclo negativo, as chaves S_2 e S_3 são acionadas. Este conversor apresenta baixa ondulação de corrente na saída, além de isolar galvanicamente os painéis fotovoltaicos da rede no período de roda-livre, visto que a malha de roda-livre e a malha de condução são completamente distintos. Entretanto, não se tem nenhum controle da tensão de modo comum durante o período de roda-livre devido à falta do grampeamento ao ponto central do barramento CC.

3.2 Topologia HB-ZVSCR

A topologia proposta em Khan et al. (2019b), denominada de H-bridge zero-voltage switchcontrolled rectifier (HB-ZVSCR), é demonstrada na Fig. 7. O inversor realiza o desacoplamento CA e grampeamento ao ponto central do barramento CC através do retificador de ponte completa composto pelos diodos D_1 a D_4 e pelas chaves S_5 e S_6 . Durante o semiciclo positivo, as chaves S_1 e S_4 são ligadas para formar a tensão $v_{inv}=V_{DC}$, enquanto que as chaves S_5 e S_6 funcionam de modo complementar para formar a tensão $v_{inv}=0$, com a corrente fluindo através dos dispositivos D_1 , D_4 , S_1 e S_5 durante o modo de roda-livre. Já no semiciclo negativo, as chaves S_2 e S_3 são ligadas para obter a tensão $v_{inv}=-V_{DC}$, enquanto que as

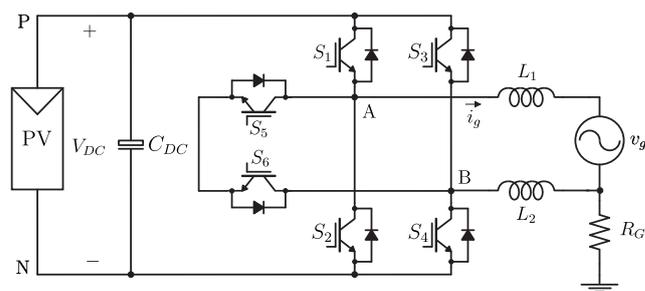


Figura 6. Topologia HERIC.

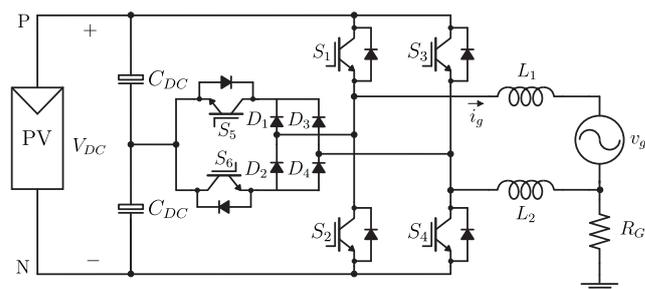


Figura 7. Topologia HB-ZVSCR.

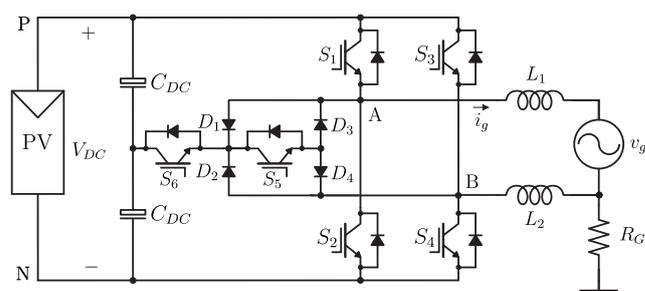


Figura 8. Topologia Proposta.

chaves S_5 e S_6 são ligadas de modo contrário para formar a tensão $v_{inv}=0$, de forma que os dispositivos D_2 , D_3 , S_2 e S_3 estão no caminho da corrente neste período. Desta forma, a topologia terá sempre duas chaves e dois diodos conduzindo durante o modo de roda-livre.

3.3 Topologia Proposta

A topologia proposta neste artigo é apresentada na Fig. 8. O inversor proposto combina os benefícios das técnicas de desacoplamento CA com o grampeamento no ponto central do barramento CC. Nesta topologia, apresentada na figura na Fig. 8, uma chave S_5 e uma ponte composta por 4 diodos D_1 a D_4 são adicionados para servir como caminho da corrente durante o período de roda-livre. Além disso, uma chave S_6 é adicionada para realizar o grampeamento com o ponto central do barramento DC e assim garantir que a tensão de modo comum permaneça constante em $\frac{V_{DC}}{2}$. A técnica de modulação utilizada e os estados topológicos são apresentados na Seção 4.

4. TÉCNICA DE MODULAÇÃO

A técnica de modulação utilizada para o conversor é o level-shifted PWM, como demonstrado na Fig. 9. Nesta técnica, uma referência senoidal é comparada com duas

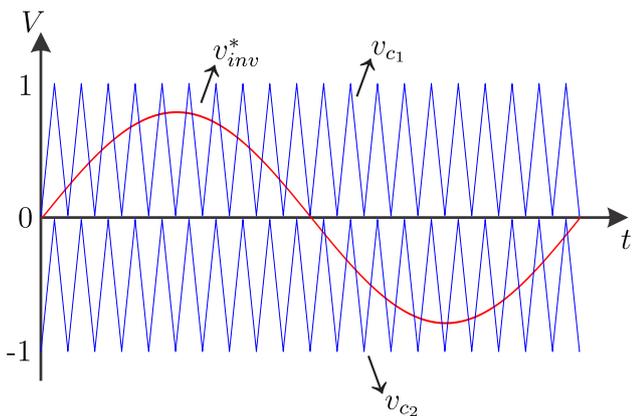


Figura 9. v_{inv}^* normalizada e sinais das portadoras.

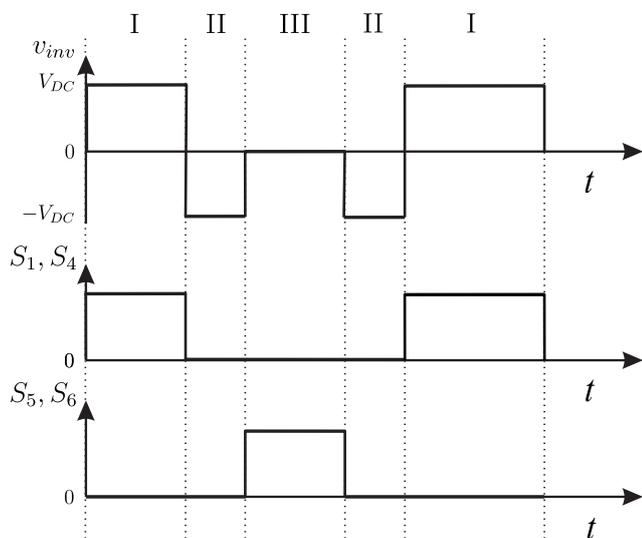


Figura 10. v_{inv} e sinais de comutação (semiciclo positivo).

portadoras triangulares de forma a obter uma tensão média v_{inv}^* desejada na saída, dada por $v_{inv}^* = m_a V_{DC} \sin(\omega_s t)$, sendo m_a o índice de modulação em amplitude e ω_s a frequência angular da rede. Como demonstrado na Fig. 10 e na Fig. 11, o inversor tem seis regiões de operação que dependem da polaridade da tensão de referência e sua comparação com os sinais de portadora. A tensão de saída v_{inv} pode assumir três níveis: V_{DC} , 0 e $-V_{DC}$.

Na região I, onde $v_{inv}^* \geq 0$ e $v_{inv}^* \geq v_{c1}$, de modo a obter a tensão de saída $v_{inv} = V_{DC}$, as chaves S_1 e S_4 são ativadas e a corrente i_g flui através destes dispositivos, enquanto que as chaves S_2, S_3, S_5 e S_6 estão desativadas. Na região II, durante a transição entre as regiões do semiciclo positivo, um tempo morto é adicionado para evitar os caminhos de curto-circuito entre os dispositivos S_1, D_1, S_5, D_4, S_4 e entre S_1, D_1 , e o diodo em anti-paralelo de S_6 , respectivamente. Durante esse período, a tensão de saída $v_{inv} = -V_{DC}$. Na região III, onde $v_{inv}^* \geq 0$ e $v_{inv}^* < v_{c1}$, as chaves S_5 e S_6 são ativadas, enquanto que as chaves S_1, S_2, S_3 e S_4 estão desligadas. Portanto, corrente i_g flui por D_2, D_3 e S_5 e a tensão de saída $v_{inv} = 0$.

No semiciclo negativo da tensão de referência, são descritas três regiões. Na região IV, onde $v_{inv}^* < 0$ e $v_{inv}^* < v_{c2}$, de forma a obter $v_{inv} = -V_{DC}$, as chaves S_2 and S_3 são

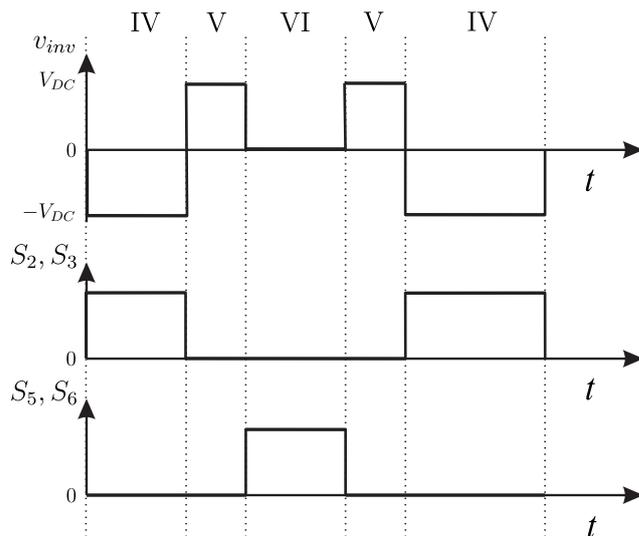


Figura 11. v_{inv} e sinais de comutação (semiciclo negativo).

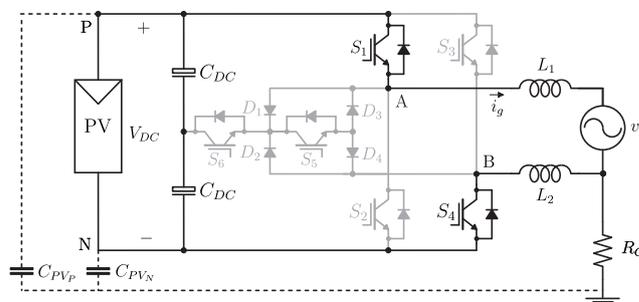


Figura 12. Modo de condução no semiciclo positivo.

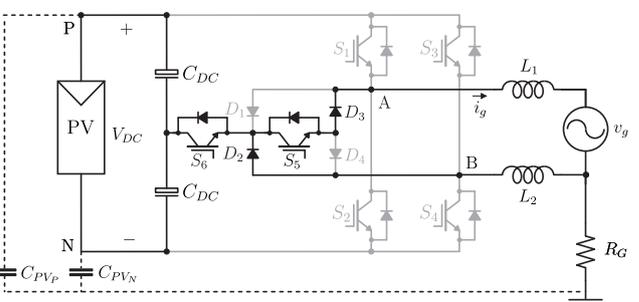


Figura 13. Modo de roda-livre no semiciclo positivo.

acionadas e a corrente flui através delas, enquanto que as chaves S_1, S_4, S_5 e S_6 estão desligadas. Durante a região V, um tempo morto é adicionado para evitar os caminhos de curto-circuito entre os dispositivos S_3, D_2, S_5, D_3, S_2 e S_3, D_2 e o diodo em anti-paralelo de S_6 , respectivamente. Nesse período, a tensão de saída $v_{inv} = V_{DC}$. Na região VI, onde $v_{inv}^* < 0$ e $v_{inv}^* > v_{c2}$, as chaves S_5 e S_6 são ativadas para obter $v_{inv} = 0$ e a corrente i_g percorre os dispositivos D_1, S_5 e D_4 . Os modos de operação são apresentados nas Fig. 12-15.

5. SISTEMA DE CONTROLE

A Fig. 16 ilustra o diagrama de controle utilizado nas simulações dos inversores apresentados. A referência i_g^*

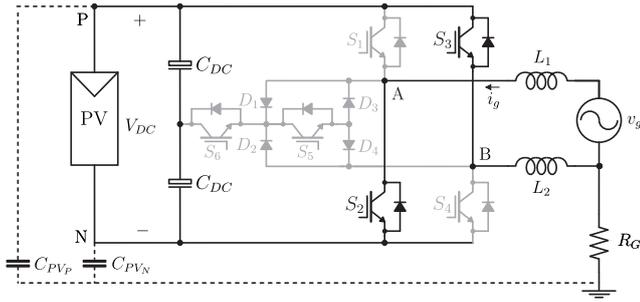


Figura 14. Modo de condução no semiciclo negativo.

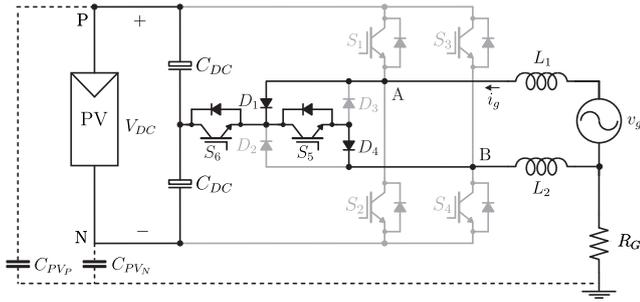


Figura 15. Modo de roda-livre no semiciclo negativo.

é determinada para que a potência injetada na rede seja de 1,5kW. A corrente i_g é ajustada à referência i_g^* através da mudança da tensão de referência v_{inv}^* , que será obtida ao aplicar o erro de corrente ao controlador PI ressonante demonstrado no diagrama. O uso do controlador PI ressonante torna possível o uso da referência senoidal com erro zero (Zhou et al. (2018)). A tensão de referência será aplicada no bloco de PWM para determinar os estados de S_1 a S_6 . O sistema de controle ainda garantirá o fator de potência unitário com a sincronização da tensão da rede v_g com a corrente i_g .

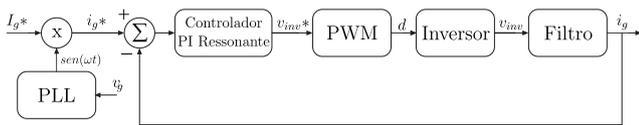


Figura 16. Sistema de controle utilizado.

6. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

As topologias apresentadas foram simuladas com o objetivo de analisar importantes aspectos para garantir a viabilidade do conversor proposto, tais como THD, corrente de fuga, perdas por condução e chaveamento. Os parâmetros utilizados para todas as topologias são apresentados na Tab. 1.

Tabela 1. Parâmetros utilizados na simulação.

V_{DC} [V]	v_g [V _{rms}]	f_{sw} [kHz]	f_o [Hz]	C_{DC} [mF]	C_{PV} [nF]	L_1, L_2 [mH]	r_{L1}, r_{L2} [Ω]
450	220	20	50	1	100	8	0.4

A partir das curvas apresentadas nas Fig. 17-19 e os valores listados na Tab. 2, nota-se que os valores medidos de THD são aproximadamente iguais. Entretanto, há uma disparidade entre os valores medidos de corrente de fuga i_{cm} , visto que a topologia HERIC apresenta picos de

Tabela 2. Valores adquiridos das topologias.

Topologia	THD	i_{cm}	Dispositivos (positivo)	Dispositivos (negativo)
HERIC	1.49%	$\leq 76.24mA$	2	2
HB-ZVSCR	1.50%	$\leq 9.21mA$	4	4
Proposta	1.74%	$\leq 12.36mA$	3	3

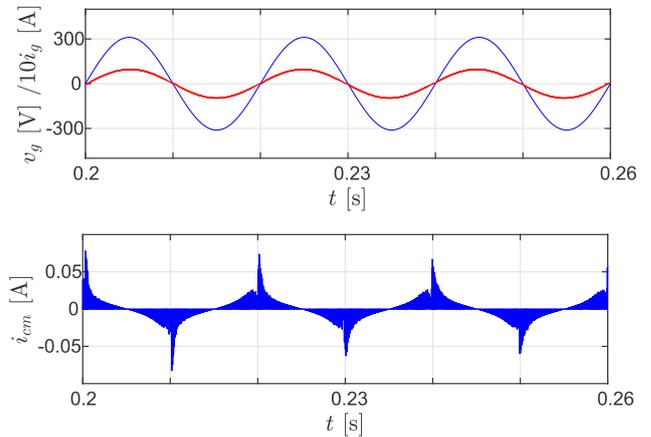


Figura 17. Corrente injetada (i_g), tensão de rede (v_g) e corrente de fuga (i_{cm}) da topologia HERIC.

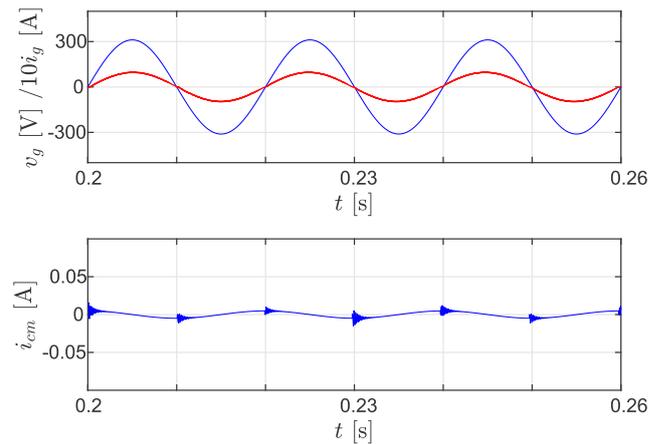


Figura 18. Corrente injetada (i_g), tensão de rede (v_g) e corrente de fuga (i_{cm}) da topologia HB-ZVSCR.

76,24mA, enquanto que as demais topologias, que utilizam o método de desacoplamento CA e grampeamento ao ponto central do barramento CC, apresentam valores bem menores. A topologia HB-ZVSCR exibe picos de 9,21mA e a topologia proposta apresenta uma corrente de fuga com pico de 12,36 mA.

Ademais, a Tab. 2 apresenta o número de dispositivos no caminho da corrente durante o período de roda-livre, tanto no semiciclo positivo como no semiciclo negativo. Em relação a esse fator, a topologia HERIC tem a melhor performance com o menor número de dispositivos. Entre os conversores que apresentam maiores valores de corrente de fuga, a topologia proposta tem menos dispositivos no caminho da corrente durante o período de roda-livre, o que implica em menores perdas por condução. A tensão diferencial V_{DM} e a tensão de modo comum V_{DM} podem ser visualizadas nas Fig. 20-22. É observado que a tensão

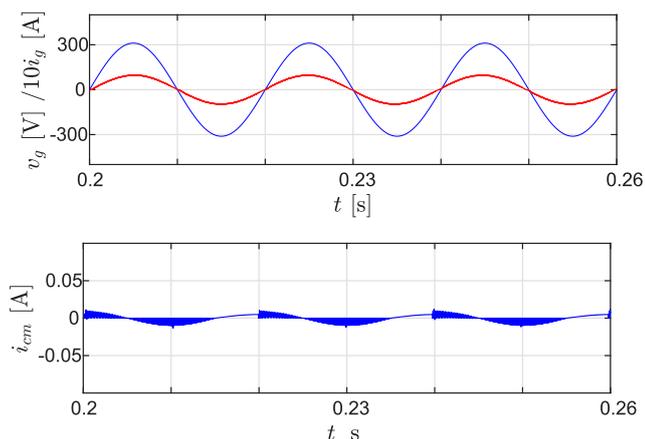


Figura 19. Corrente injetada (i_g), tensão de rede (v_g) e corrente de fuga (i_{cm}) da topologia proposta.

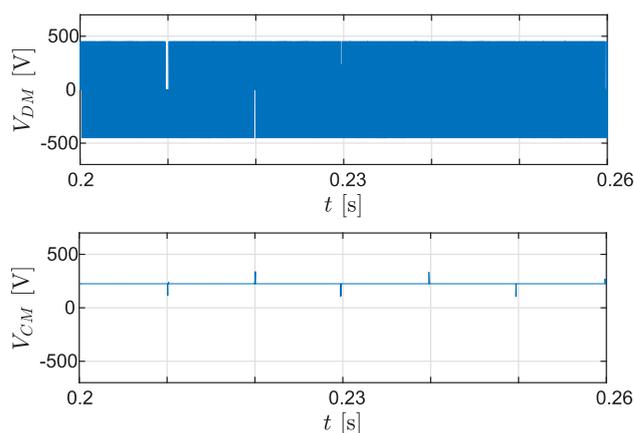


Figura 22. Tensão de saída diferencial V_{DM} e Tensão de modo comum V_{CM} da topologia proposta.

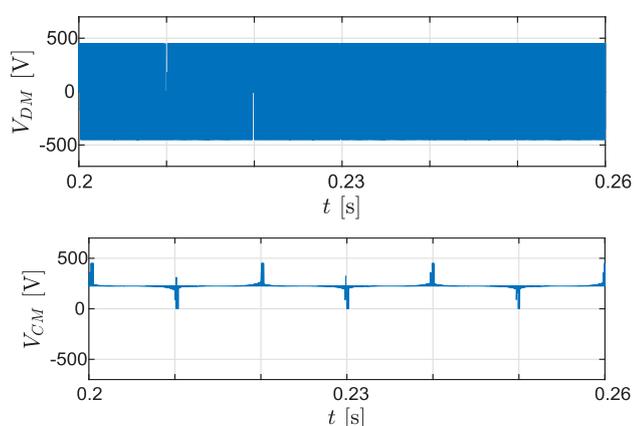


Figura 20. Tensão de saída diferencial V_{DM} e Tensão de modo comum V_{CM} da topologia HERIC.

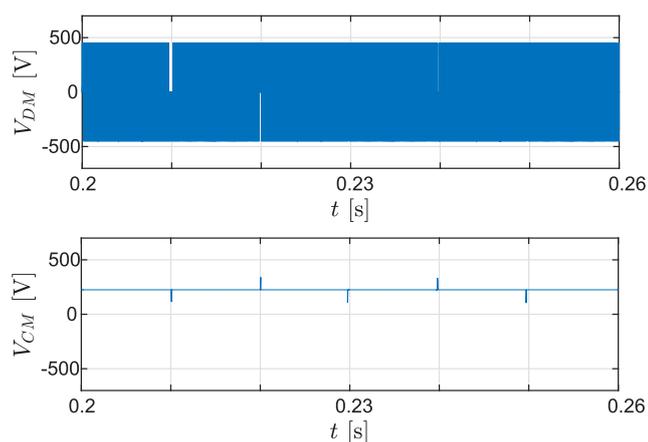


Figura 21. Tensão de saída diferencial V_{DM} e Tensão de modo comum V_{CM} da topologia HB-ZVSCR.

diferencial V_{DM} não apresenta características exatamente iguais a uma onda resultante de um PWM unipolar, visto que uma inversão na polaridade da tensão diferencial ocorre durante o tempo morto onde nenhuma chave é ativa, como explicitado na Fig. 10 e 11. Enquanto que a topologia HERIC apresenta variações periódicas na tensão de modo comum, as demais topologias exibem uma tensão

constante, demonstrando que o objetivo de reduzir as variações na tensão de modo comum, e assim reduzir a corrente de fuga no sistema, foi alcançado.

7. CONCLUSÃO

Neste artigo, uma topologia de inversor sem transformador para sistemas fotovoltaicos foi proposta. A topologia proposta utiliza as técnicas de desacoplamento CA e grampeamento ao ponto central do barramento CC para eliminar as flutuações na tensão de modo comum e, assim, reduzir a corrente de fuga. Resultados de simulação apresentados confirmaram a viabilidade da topologia proposta. Comparado com topologias convencionais de inversor sem transformador apresentadas, o conversor proposto se estabelece como uma opção com menores perdas em comparação a topologias com performance igualmente satisfatórias na redução da corrente de fuga.

AGRADECIMENTOS

Este artigo contou com o apoio do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e do Laboratório de Eficiência Energética e Ambiental (LABEFEA) da Universidade Federal da Bahia, em acordo com a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

- Europe, S.P. (2021). Global market outlook for solar power 2021—2025.
- Freddy, T.K.S., Rahim, N.A., Hew, W.P., and Che, H.S. (2013). Comparison and analysis of single-phase transformerless grid-connected pv inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(10), 5358–5369.
- Khan, M.N.H., Forouzesh, M., Siwakoti, Y.P., Li, L., Kerekes, T., and Blaabjerg, F. (2019a). Transformerless inverter topologies for single-phase photovoltaic systems: A comparative review. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 8(1), 805–835.
- Khan, M.N.H., Siwakoti, Y.P., Li, L., and Blaabjerg, F. (2019b). H-bridge zero-voltage switch-controlled rectifier transformerless midpoint-clamped inverter for

- photovoltaic applications. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 8(4), 4382–4394.
- Schmidt, H., Siedle, C., and Ketterer, J. (2003). Wechselrichter zum umwandeln einer elektrischen gleichspannung in einen wechselstrom oder eine wechselfspannung. *EP Patent 2086102A2*.
- Zhou, D., Song, Y., and Blaabjerg, F. (2018). Control of power electronic converters and systems.