

## CLASSIFICAÇÃO DE INVERSORES FOTOVOLTAICO SEM TRANSFORMADOR DE ACORDO COM A TENSÃO DE MODO COMUM NO LADO DE CORRENTE CONTÍNUA

Andrei da Cunha Lima<sup>1</sup>, Lucas Vizzotto Bellinaso<sup>2</sup>, Leandro Michels<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Programa de pós graduação em Engenharia Elétrica, andrei@inriufsm.com.br.

<sup>2</sup>Programa de pós graduação em Engenharia Elétrica.

### RESUMO

Elevadas correntes de fuga à terra são uma característica dos sistemas fotovoltaicos que possuem inversores sem isolamento galvânica. Estas correntes circulam através da capacitância parasita existente entre os módulos fotovoltaicos e a terra, sendo proporcionais à componente c.a. da tensão de modo comum junto aos terminais c.c. de entrada dos inversores. Estas corrente, além de produzir risco de fogo em instalações elétricas, são prejudiciais em sistemas de proteção contra choque elétrico e contra faltas à terra. Frente a este problema, no decorrer dos anos surgiram na literatura diversos trabalhos que apresentam topologias e metodologias para mitigação de correntes de fuga. Contudo, não há estudos que contenham uma modelagem e classificação da tensão de modo comum com base na variação da tensão do barramento c.c. de entrada. Este trabalho tem por objetivo propor uma classificação de diferentes topologias de inversores fotovoltaicos de acordo com a tensão de modo comum de baixa frequência que estes geram. Considerou-se para a análise o uso de topologias de inversores genéricos, baseados em modulação por largura de pulso geométrica, para estender a análise para qualquer equipamento, independentemente do número de chaves e formas de interligação interna dos braços do conversor. Como resultados, foi possível obter a mínima tensão de modo comum em inversores fotovoltaicos com a variação de tensão do barramento c.c. Além disso, observou-se que inversores fotovoltaicos monofásicos apresentam uma maior tensão de modo comum em comparação a inversores trifásicos utilizando a mesma metodologia de modulação.

Palavras-chave: Corrente de fuga, tensão de modo comum, modulação geométrica.

### 1. INTRODUÇÃO

Inversores fotovoltaicos sem transformador têm sido utilizados devido à alta eficiência e custos reduzidos. Porém, devido à inexistência de isolamento galvânica entre os terminais c.c. e a rede, a operação do inversor produz uma tensão não-nula entre os terminais do lado c.c. e o terra, conhecida por tensão de modo comum. Devido a existência de uma elevada capacitância parasita entre os elementos internos dos módulos fotovoltaicos e a terra, forma-se um caminho condutor de corrente entre os terminais internos para a terra que são diretamente proporcionais à frequência e à magnitude das componente c.a da

tensão de modo comum. Esta corrente de modo comum circula através do circuito de aterramento, sendo por isso denominada de corrente de fuga.

A corrente de fuga, quando em elevados valores, pode produzir risco de incêndio em instalações elétricas. Além disso, elas tornam complexos os sistemas de detecção e proteção contra choque elétrico e contra faltas à terra. A importância deste tema é muito grande em sistemas fotovoltaicos, sendo abordados pela IEC 62109-2 e mais recentemente por uma norma específica, a norma IEC 63112 (2021), norma aplicável a equipamentos de proteção de sistemas fotovoltaicos contra faltas à terra de baixa tensão, especificando tipos e níveis das funções de proteção, natureza e momento das respostas à falta, métodos de testes e requisitos de segurança, dentre outros tópicos.

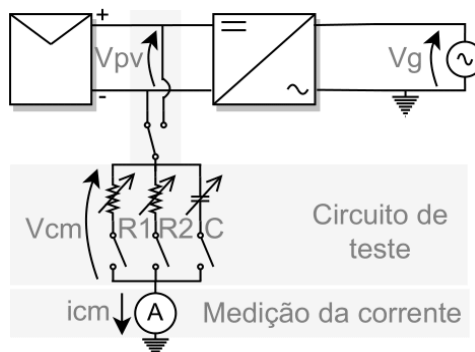
A IEC 63112 requer o ensaio das proteções contra fogo e choque elétrico considerando a presença de um caminho para corrente de fuga capacitiva permanente *baseline* na operação do inversor. Na IEC 63112, os ensaios de proteção contra faltas à terra são realizados utilizando uma carga RC, sendo que a corrente de fuga *baseline* é criada pela ligação da carga capacitiva, e a falta à terra (corrente residual) é simulada pela ligação de uma carga resistiva. Porém, a IEC 63112 define o valor de ensaio da corrente de fuga *baseline* sem considerar a topologia e as características do inversor. Em algumas topologias de inversores fotovoltaicos, a corrente de fuga capacitiva é próxima de zero. Nesses casos, a norma IEC 63112 requer o ensaio de corrente de fuga *baseline* resistiva. Para que seja tomada a decisão de qual tipo de carga podem ser realizados os ensaios da IEC 63112, é importante conhecer o valor da tensão de modo comum gerada pelo circuito do inversor fotovoltaico.

Na literatura científica, foram propostas topologias que não produzem tensão de modo comum com componente c.a. conforme X. Guo et al. (2016), e metodologias de minimização da tensão de modo comum com base na estratégia da modulação do inversor (CHEN e ZHAO, 2016). Esses trabalhos buscam a minimização da tensão de modo comum, porém nenhuma proposta de generalizar ou classificar os inversores de acordo com a tensão de modo comum (Bellinaso et al, 2019).

O objetivo deste trabalho é propor uma classificação das diferentes topologias de inversores fotovoltaicos sem transformador, de acordo com a tensão de modo comum de baixa frequência que estes geram.

A classificação proposta neste artigo é importante para laboratórios de ensaio que realizam os ensaios de proteção contra faltas à terra em inversores, de forma a mapear as tensões de modo comum características de cada equipamento. A Figura 1 apresenta o circuito de testes recomendado pela norma IEC 63112:2021.

Figura 1. Circuito de testes de corrente de fuga em inversores fotovoltaicos.



## 2. PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS SEM TRANSFORMADOR DE ACORDO COM A TENSÃO DE MODO COMUM

A corrente de modo comum, ou corrente de fuga, é a corrente que retorna pelo condutor terra de proteção, conectado ao neutro de redes TN. No lado c.c. de inversores fotovoltaicos, a componente alternada da tensão de modo comum  $v_{cm}$  cria uma corrente de fuga pela capacitância parasita existente entre os terminais positivo e negativo dos módulos fotovoltaicos e a carcaça de alumínio aterrada. É possível calcular o valor eficaz corrente de fuga a partir de:

$$i_{cm,rms} = 2\pi f C_{cm} v_{cm,rms} \quad (1)$$

Onde  $v_{cm,rms}$  é a tensão eficaz de modo comum com frequência fundamental  $f$ . Em inversores monofásicos, essa frequência fundamental é igual à frequência da rede. Em trifásicos, é geralmente 3 vezes a frequência da rede. É importante ressaltar que para formulação da Equação 1 foi tomada como base a premissa de que a frequência da fundamental é a componente causadora da corrente de fuga em inversores, devido a filtros em inversores que realizam a filtragem de componentes de alta frequência geradas pelo conversor, e as demais componentes de mais alta frequência foram desconsideradas.

O valor da componente alternada de  $v_{cm}$  depende da forma de conexão com a rede e da modulação do inversor fotovoltaico. A partir da análise de diversas possíveis topologias de inversores de tensão sem transformador e configurações de redes com neutro aterrado, foi feita uma classificação de acordo com o valor da tensão  $v_{cm}$  alternada de cada inversor. A Tabela 1 mostra a proposta de classificação, considerando a hipótese de que a parcela de alta frequência de  $v_{cm}$  gerada pelo PWM do inversor é completamente filtrada através dos filtros de saída logo após os braços do conversor em questão (filtro L, LCL, etc).

Tabela 1. Proposta de classificação de topologias de inversores sem transformador de acordo com a tensão de modo comum no lado c.c.

<b>Classe</b>	<b>Característica</b>	<b>Componente c.a. RMS</b> $v_{cm}$
<b>A</b>	Neutro conectado no lado c.c.	0
<b>B</b>	Fase conectada no lado c.c.	$v_g @ 60 \text{ Hz}$
<b>C</b>	2 braços sem conexão direta lado c.c. com c.a.	$v_g/2 - v_{o,inv} @ 60 \text{ Hz}$
<b>D</b>	> 3 braços sem conexão direta lado c.c. com c.a.	$v_{o,inv} @ 180 \text{ Hz}$

As Figuras 2 a 5 mostram as topologias de cada classe. Os braços foram mostrados como de 2 chaves semicondutoras, mas podem ser substituídos por outros tipos, como NPC, tipo T, dentre outros. Nas figuras,  $C_{cm}$  é a capacitância do circuito de modo comum, que pode ser a capacitância parasita de módulos fotovoltaicos ou a capacitância do ensaio da IEC 63112.

A Figura 2 mostra algumas topologias da classe A, cuja característica é a conexão direta do neutro ao lado c.c.. Por isso, a componente alternada de  $v_{cm}$  é nula. A Figura 3 mostra topologias da classe B, cuja característica é a conexão direta da fase ao lado c.c.. Assim, a componente alternada de  $v_{cm}$  é igual à tensão de fase.

Figura 2. Topologias de inversores sem transformador classe A: (a) Monofásico 1 braço e 2 fios; (b) Bifásico 2 braços e 3 fios; (c) Trifásico 3 braços e 4 fios.

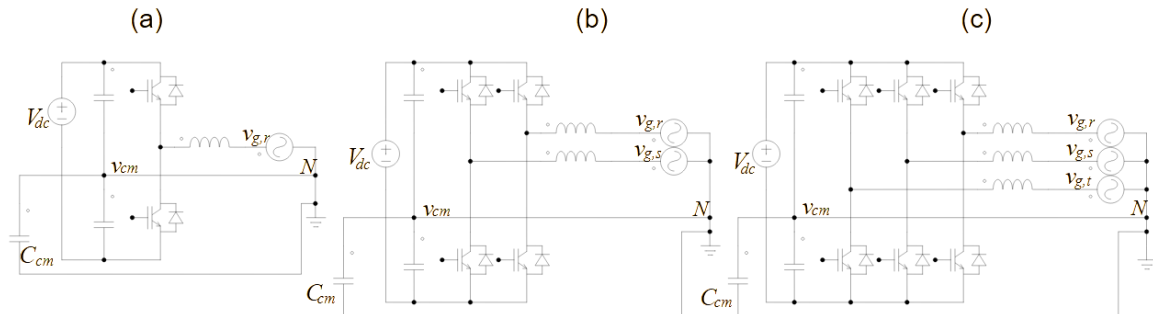
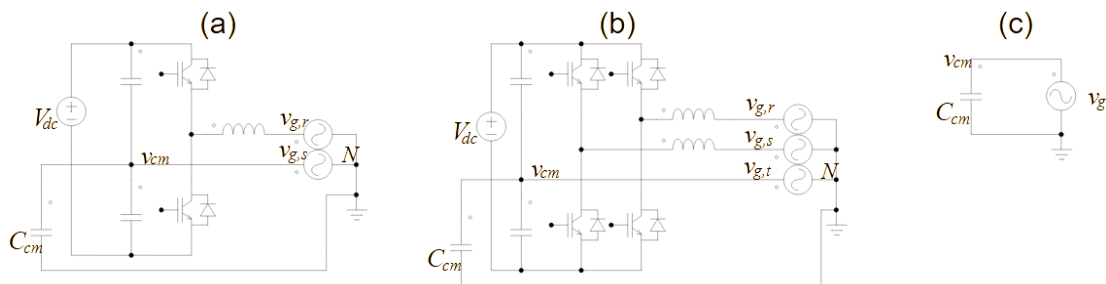
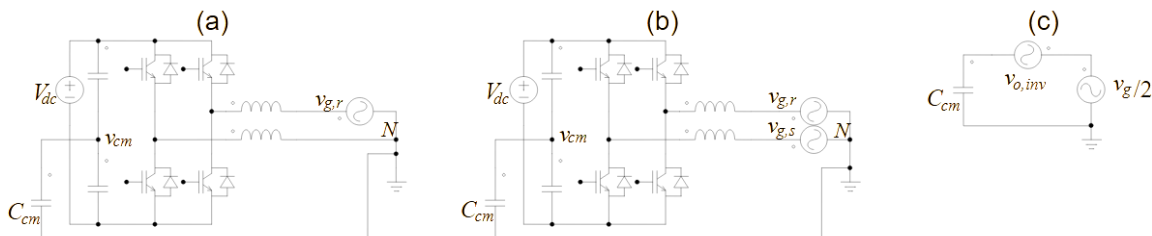


Figura 3. Topologias de inversores sem transformador classe B: (a) Bifásico 1 braço e 2 fios; (b) Trifásico 2 braços e 3 fios; (c) Circuito de modo comum equivalente.



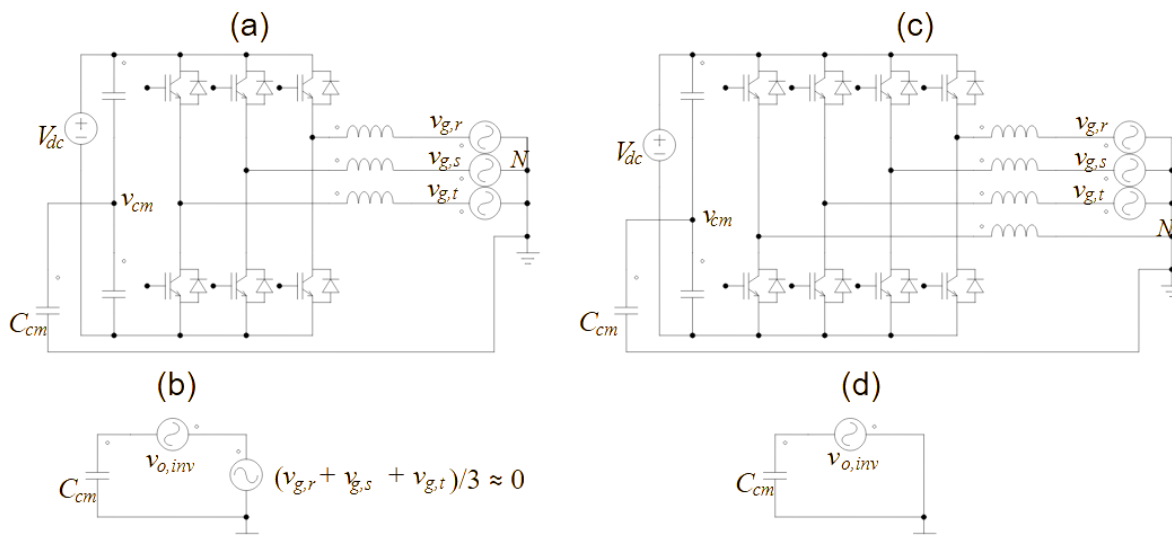
A Figura 4 mostra topologias da classe C, cuja característica é o inversor possuir 2 braços conectados à rede, sem conexão direta da rede c.a. com o lado c.c. Nesse caso, o circuito de modo comum equivalente é mostrado na Figura 4(c) (KHAN, Ahmad et al, 2017), (GAAFAR, Mahmoud A. et al, 2021). A tensão de modo comum produzida pelo inversor é dada por  $v_{cm} = v_g/2 - v_{o,inv}$  onde  $v_g$  é a tensão de fase da rede, e  $v_{o,inv}$  é a tensão de modo comum produzida pela modulação PWM do inversor (A. M. Nicolini et al, 2015), (A. M. Nicolini et al, 2016).

Figura 4. Topologias de inversores sem transformador classe C: (a) Monofásico 2 braços e 2 fios; (b) Bifásico 2 braços e 3 fios; (c) circuito de modo comum equivalente.



A Figura 5 mostra topologias da classe D, cuja característica é o inversor ser trifásico, sem conexão direta do lado c.c. com o lado c.a. A tensão de modo comum no lado c.c. é igual a  $v_{cm} = -v_{o,inv}$  onde  $v_{o,inv}$  é a tensão de modo comum gerada pela modulação PWM do inversor. Essa equação é sempre válida para inversores trifásicos com 3 braços, mas é válida para inversores trifásicos a três fio somente quando as fases são balanceadas, ou seja, a tensão média instantânea das fases é igual a 0. As Figuras 5(b) e 5(d) mostram os circuitos de modo comum equivalentes dos inversores de 3 e 4 braços, respectivamente.

Figura 5. Topologias de inversores sem transformador classe D: (a) Tri 3 braço e 3 fios; (b) circuito de modo comum equivalente; (c) Tri 4 braços e 4 fios; (d) circuito de modo comum equivalente.



### 3. MINIMIZAÇÃO DA TENSÃO DE MODO COMUM ATRAVÉS DA MODULAÇÃO DO INVERSOR

A modulação permite a criação de uma tensão de modo comum na modulação PWM do inversor. Em inversores da classe C, pode-se criar uma tensão contrária à tensão de modo comum da rede elétrica, minimizando assim a tensão de modo comum no lado c.c. Sabendo-se a equação que relaciona a tensão de modo comum na rede, é possível produzir uma tensão de referência defasada de  $180^\circ$  da tensão de modo comum, a fim de utilizá-la para sintetizar os sinais dos braços do conversor para eliminar a tensão de modo comum.

Em inversores trifásicos da classe D, a modulação geométrica possibilita reduzir a distorção harmônica em comparação a metodologias de modulação convencionais (A. M. Nicolini et al, 2015), (A. M. Nicolini et al, 2016) e operar com tensão do barramento c.c. inferior ao valor pico-a-pico da tensão de fase. Para obter a equação que representa as tensões que serão aplicadas aos braços, é preciso partir da obtenção das tensões de linha em função das tensões de fase. Posteriormente, é realizada a inversão da matriz que relaciona as tensões, e finalmente a tensão  $v_{o,inv}$ , tensão de interesse na modulação geométrica, que pode ser obtida através de um conjunto de inequações, representados na inequação (2).

$$K_1 \leq v_{o,inv} \leq K_2 \quad (2)$$

Onde  $K_1$  e  $K_2$  são constantes dependentes das tensões da rede e tensão do barramento c.c. A inequação (2) fornece um conjunto de valores de  $v_{o,inv}$  que podem ser utilizados para encontrar as tensões que serão aplicadas aos braços.

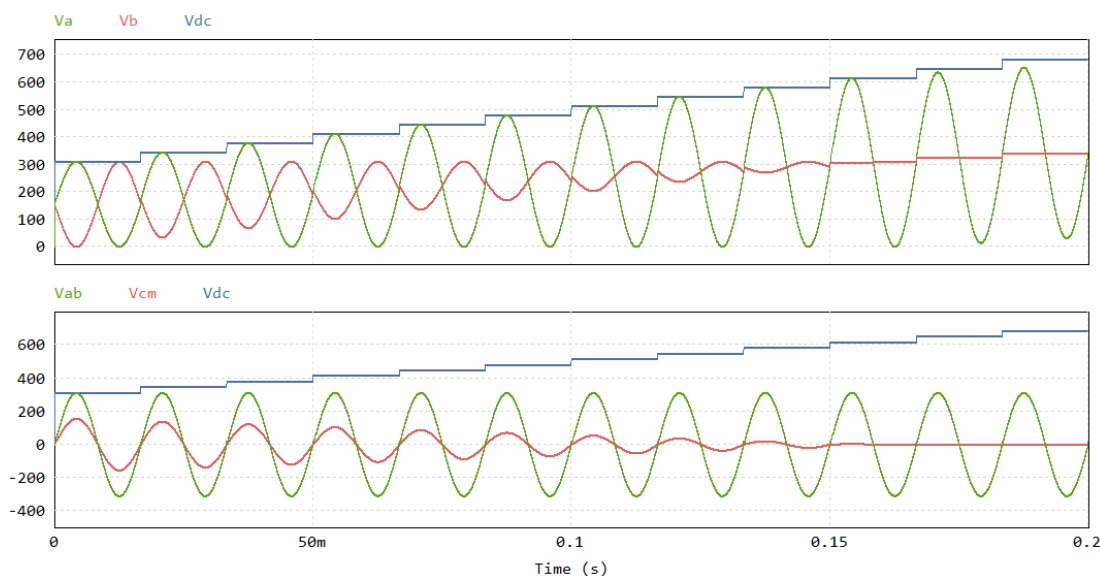
#### 4. IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Foram implementadas e simuladas no software PSIM estratégias para minimizar a tensão de modo comum  $v_{cm}$  de duas classes de inversores: inversor monofásico de 2 braços (classe C), e inversor trifásico de 3 braços (classe D).

##### 4.1 Classe C - Inversor genérico monofásico de 2 braços e 2 fios

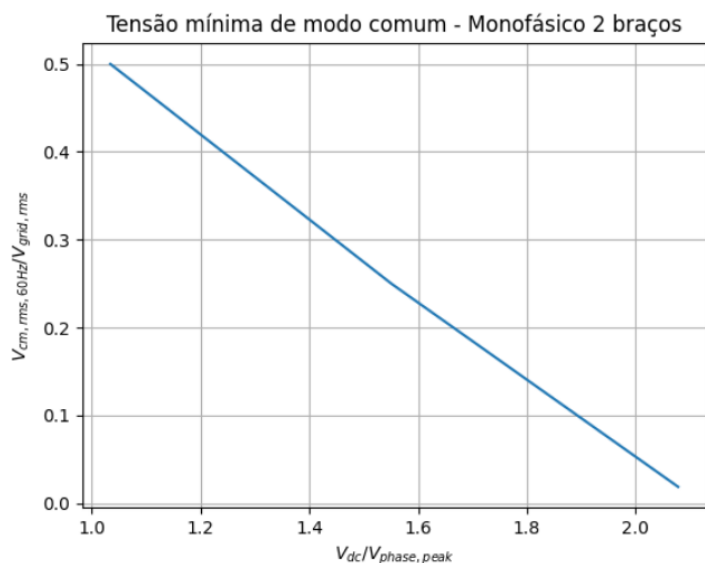
O inversor monofásico de 2 braços e 2 fios apresentado na Figura 4(a) foi simulado, e a Figura 6 apresenta os resultados de simulação para uma rede de 220 V, variando a tensão do barramento c.c. (Vdc) de 311 V até 680 V.

Figura 6. Minimização de  $v_{cm}$  em função de  $v_{dc}$  no inversor monofásico classe C.



A tensão de modo comum  $v_{cm}$  pode ser reduzida quando a tensão do barramento c.c. aumenta. Na Figura 7, observa-se a tensão mínima de modo comum normalizada em função da tensão eficaz da rede, que pode ser obtida com base na tensão do barramento normalizada em função da tensão de fase de pico. Como pode ser observado, quando a tensão do barramento c.c. é igual ao pico da tensão de fase, a tensão de modo comum deve ser igual à 50% da tensão da rede ( $v_g/2$ ). Porém, quando a tensão do barramento c.c. é aumentada, é possível gerar  $v_{o,inv}$  contrária à  $v_g/2$ , sendo permitido diminuir  $v_{cm}$  para 0 quando a tensão do barramento c.c.  $v_{dc}$  é superior a 2 vezes o pico da tensão da rede.

Figura 7. Tensão mínima de modo comum para inversor monofásico classe C.

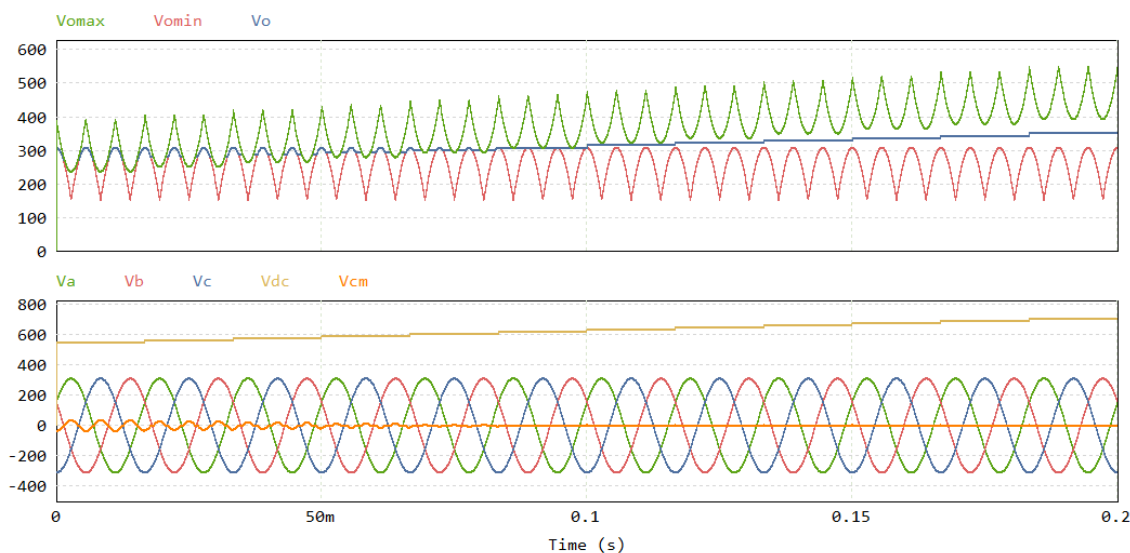




## 4.2 Classe D - Inversor genérico trifásico de 3 braços a 3 fios

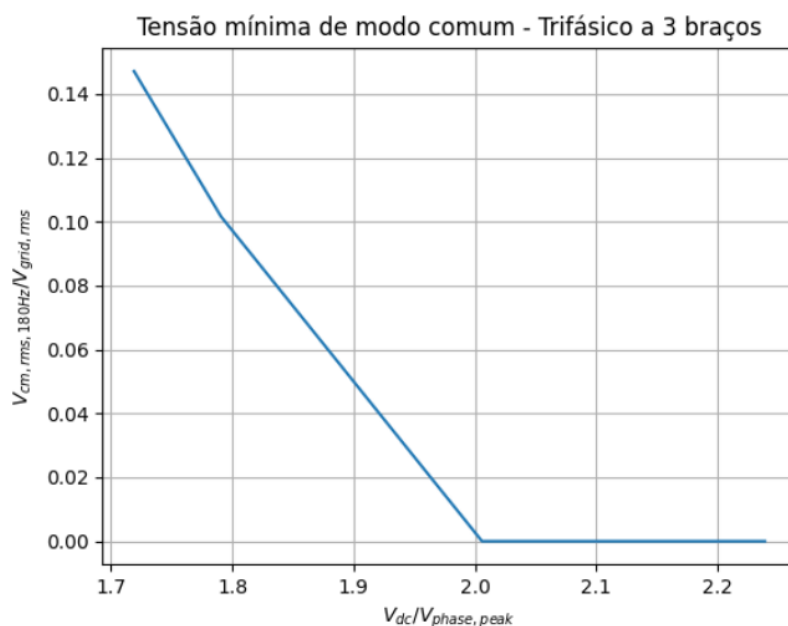
A modulação geométrica com minimização da tensão de modo comum foi implementada e simulada para um inversor trifásico com 3 braços a 3 fios como da Figura 5(a). Foi utilizado um resistor no lugar da fonte da rede elétrica. Neste tipo de conversor, a tensão de modo comum pode ser minimizada através de um algoritmo que escolhe o menor valor possível para a parcela alternada da tensão geométrica com base nos valores mínimos e máximos que podem ser sintetizados. A Figura 8 mostra as formas de onda obtidas variando a tensão do barramento c.c. de 1,73 a 2,26 vezes a tensão de pico da fase rede elétrica.

Figura 8. Formas de onda obtidas para o inversor trifásico classe D.



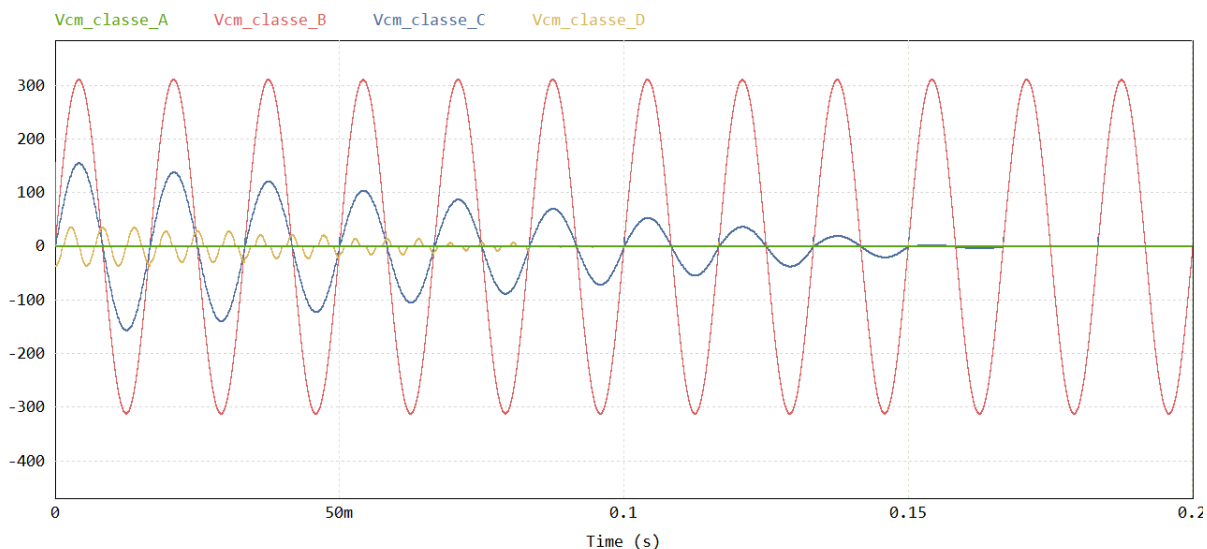
A amplitude da tensão de modo comum que deve ser gerada na região de sobremodulação é mostrada na Figura 9.

Figura 9. Tensão mínima de modo comum para inversor trifásico classe D.



Verifica-se pela Figura 9 o comportamento de uma reta decrescente da tensão de modo comum em conversores trifásicos a 3 braços. Nessa região, o inversor trabalha na região de sobremodulação, devendo injetar componentes de 3ª harmônica (180 Hz) para conseguir operar. No pior caso, quando a tensão do barramento c.c. é somente 1,73 vezes a tensão de fase de pico da rede, a tensão  $v_{cm}$  deve possuir amplitude mínima de em torno de 14% da tensão da rede, com frequência de 180 Hz. Porém, quando a tensão do barramento c.c. é superior a 2 vezes ao pico da tensão de fase, não é mais necessário injetar 3ª harmônica na tensão de modo comum, de forma que é possível obter  $v_{cm} = 0$ . A Figura 10 apresenta um comparativo entre as tensões de modo comum obtidas em cada uma das classes apresentadas no artigo.

Figura 10. Comparativo entre tensões de modo comum em função do barramento c.c. para todas as classes.



## 5. CONCLUSÃO

Neste estudo, foi proposta uma classificação de inversores fotovoltaicos de acordo com a tensão de modo comum no lado c.c. Nas classes A e B, a tensão de modo comum é definida somente pela rede. Nas classes C e D, o inversor também desempenha um papel nessa tensão. Variando a tensão do barramento c.c., pôde-se observar que é possível minimizar ou eliminar a tensão de modo comum no lado c.c. para tensões mais elevadas do barramento c.c. Em inversores monofásicos de 2 braços, a minimização é realizada reduzindo a tensão alternada modulada pelo braço conectado ao neutro. Já em inversores trifásicos, na região de sobremodulação é necessário injetar tensão de modo comum de 3ª harmônica para que o inversor possa operar. Este trabalho permite o cálculo da capacitância utilizada nos testes da norma IEC 63112, sendo que desta forma, a classificação da tensão de modo comum é de grande importância para normas e sistemas de testes em inversores fotovoltaicos, pois permite a criação de limites de proteção e segurança com valores base previamente classificados por este estudo.

## 6. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

IEC 63112 (2021), **Photovoltaic (PV) arrays - Earth fault protection equipment - Safety and safety-related functionality**, International Standard, v.1, 154p.

A. M. Nicolini, F. Carnielutti and H. Pinheiro (2015), **Carrier-based geometric modulation approach for inverters with interleaved legs**, 2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), p. 1-6.

A. Nicolini, F. Carnielutti, H. Pinheiro and A. Ricciotti (2016), **Geometric discontinuous modulation applied to inverters with three magnetically coupled legs**, IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, p. 3276-3281.

X. Guo, R. He, J. Jian, Z. Lu, X. Sun and J. M. Guerrero (2016), **Leakage Current Elimination of Four-Leg Inverter for Transformerless Three-Phase PV Systems**, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, no. 3, p. 1841-1846.

KHAN, Ahmad et al (2017). **Review and simulation of leakage current in transformerless microinverters for PV applications**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 74, p. 1240-1256.

GAAFAR, Mahmoud A. et al (2021). **Common-ground photovoltaic inverters for leakage current mitigation: Comparative review**. Applied Sciences, v. 11, n. 23, p. 11266.

BELLINASSO, L. V. et a (2019)l. **Strategies to deal with ground faults in grid-connected transformerless photovoltaic converters with battery energy storage system**. Eletrôn. Potên, v. 24, p. 314-322.

CHEN, Henglin; ZHAO, Huan (2016). **Review on pulse-width modulation strategies for common-mode voltage reduction in three-phase voltage-source inverters**. IET Power Electronics, v. 9, n. 14, p. 2611-2620.