

Modelagem, Controle e Análise de Conversor Multinível Modular em Sistema Fotovoltaico

Samelius S. Oliveira*. Isaac R. Machado*. Joham L. D. S. Albuquerque**
Alan R. S. Silva **

*PPGEEC, Universidade Federal do Ceará, Sobral, CE
(e-mail: samelius1@gmail.com, isaacmachado@ufc.br).

**Faculdade de engenharia elétrica, Universidade Federal do Ceará, Sobral, CE
(e-mail: joham_lucas@hotmail.com, alanrsilva@alu.ufc.br)

Abstract: This paper presents a study of modular multilevel converter (MMC) to link a photovoltaic plant to medium voltage. The topology is based in multistrings where a PV array are connected on submodules (SM's) of the converter. The methodology was use arm average model to represent arm dynamics of the converter. The loop output currents and virtual DC bus voltage control are performed using classical control techniques based on frequency response and PI controllers. Furthermore, the behavior of the MMC was analyzed and discussed during unbalance in power generation (power mismatch) whose compensation is made through the differential currents. Computational simulations are performed to show system operation under standard conditions and evaluate performance of the control strategy in relations to disturbances. The results proved the effectiveness of the control techniques used as well as ability of differential currents to handle with internal power mismatches of the MMC

Resumo: Este artigo apresenta um estudo do conversor multinível modular (CMM) para conectar um sistema fotovoltaico (FV) a média tensão. A topologia é baseada em multistrings onde os arranjos FV são conectados nos submódulos (SM's) do conversor. A metodologia consistiu em utilizar um modelo médio para representar a dinâmica dos braços do conversor. O controle das malhas de corrente de saída e do barramento CC virtual é realizado utilizando técnicas clássicas de controle baseados em resposta em frequência e controladores PI. Ademais, foi analisado e discutido o comportamento do CMM na ocorrência de desbalanços na geração energia cuja compensação é feita por meio do controle das correntes diferenciais. Simulações computacionais foram realizadas para mostrar a operação do sistema em condições nominais e avaliar o desempenho do controle em relação aos distúrbios. Os resultados comprovaram eficácia das técnicas de controle empregadas bem como a capacidade das correntes diferenciais em lidar com os desbalanços de potência internos do CMM.

Keywords: Modular multilevel converter; photovoltaic system; average model; power mismatch.

Palavras-chaves: Conversor multinível modular; sistema fotovoltaico; modelo médio; desbalanço de potência.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas fotovoltaicos (FV) conectados à rede vêm sendo muito difundidos principalmente em uso doméstico e comercial bem como em grandes plantas de geração. Uma parte essencial de qualquer sistema de geração desse tipo é o inversor responsável por converter a corrente contínua produzida nos módulos em corrente alternada para rede elétrica.

O conversor multinível modular (CMM) é a tecnologia de conversores mais recentes para integrar médias e altas tensões. Suas características construtivas e de operação proporcionam algumas vantagens sobre estruturas multiníveis convencionais as quais se destacam a modularidade e escalabilidade (Elsanabary et al., 2020). Originalmente proposto por Lesnicar e Marquardt (2003), sua aplicação era voltada para sistemas

HVDC, contudo nos últimos anos o interesse de pesquisadores nessa topologia expandiu seus estudos para outras aplicações tais como STATCOM e drivers para média tensão e integração de energias renováveis (Debnath et al., 2015).

No contexto de aplicações em grandes plantas FV, o CMM pode ser empregado em duas configurações. A primeira como inversor central onde todo o arranjo FV é conectado ao barramento CC do CMM. Na segunda, com múltiplos arranjos distribuídos entre os submódulos do CMM. Esta última foi empregada em (Rivera et al., 2013) onde os autores utilizaram submódulos tipo *H-Brigde* e algoritmos de MPPT em cada SM. É válido destacar que a topologia com multistrings vem ganhando mais destaque. Um estudo comparativo do desempenho do CMM nas duas configurações foi realizado por Acharya et al. (2019) onde a configuração multistring

apresentou melhor eficiência, em grande parte devido à possibilidade de utilização do controle MPPT distribuído.

Em (Bayat and Yazdani, 2018) e (Elsanabary et al., 2021) são utilizados o CMM com submódulos *Half-bridge*. Neste sistema FV, cada SM é energizado por múltiplos arranjos FV, que são conectados aos barramentos CC's por meio de conversores CC/CC isolados que fazem a implementação dos algoritmos MPPT. Cada arranjo FV conectado a seu correspondente submódulo injeta diferentes perfis de potência ativa, gerando desbalanços de potência ativa entre pernas e braços do conversor MMC. Porém, apesar dos desbalanços de potência do lado CC, a estratégia de controle proposta garante a conexão à rede principal injetando correntes balanceadas do lado CA. A estratégia proposta emprega o controle das componentes CC e CA da corrente circulante para equalizar as potências entre as pernas do conversor e para estabilizar as tensões dos submódulos, respectivamente. Em ambos trabalhos a eficácia da estratégia é demonstrada por simulações no domínio do tempo.

No contexto apresentado, este artigo visa analisar o comportamento da topologia de CMM com os arranjos FV distribuídos nos SM's empregando um modelo médio do conversor. O artigo se divide da seguinte maneira: seção 2 são abordados a estrutura básica do CMM e sua análise matemática das correntes e potência. Na seção 3 é feita a descrição e o projeto das malhas de controle do conversor. Na seção 4 são mostrados os resultados de simulação do sistema proposto.

2. ESTRUTURA E MODELO MATEMÁTICO

A estrutura do CMM trifásico é mostrada na Figura 1. Ele é composto por um conjunto de N submódulos (SM's) conectados em série que formando um braço superior e inferior de estruturas idênticas. Esse conjunto é chamado de perna ou fase.

Cada SM é composto por um par de IGBT's e diodos conectados a um capacitor numa configuração *Half bridge*. Aos terminais do capacitor é acoplado um conjunto formado por um conversor CC-CC e arranjo fotovoltaico.

A operação do CMM se dá por meio da inserção das tensões do SM de modo a sintetizar uma onda de tensão multinível nos terminais de saída de acordo com um sinal modulante. O número de níveis é determinado pela quantidade de SM's inseridos em cada braço em um instante de tempo.

Nesse sistema a função do CMM é injetar a potência produzida pelo sistema FV diretamente na rede de média tensão. Para isso são estabelecidos dois objetivos principais de controle:

- Injeção de correntes trifásicas senoidais equilibradas na tensão da rede com fator de potência unitário
- Controle da tensão nos capacitores dos SM's

Além dos objetivos citados, devido ao grande número de arranjos FV distribuídos entre os braços do CMM, eventuais

diferenças na geração de energia (sombreamento parcial, defeitos nos módulos, etc) podem causar um desbalanceamento de potência entre as fases ou braços do CMM e consequentemente gerar desequilíbrio nas correntes de saída. Para mitigar esse efeito, o CMM é capaz de compensar esse desbalanço interno por meio da corrente circulante, como será demonstrado nas seções seguintes

De acordo com a Figura 1, as correntes nos braços superior e inferior de uma fase podem ser definidas como:

$$i_U = \frac{i_g}{2} + i_c \quad (1)$$

$$i_L = -\frac{i_g}{2} + i_c$$

Onde i_c é denominada corrente circulante. Essa corrente é comum a perna do conversor, e definida por:

$$i_c = \frac{i_U + i_L}{2} \quad (2)$$

Na operação nominal do CMM essa corrente surge devido as variações de tensão nos capacitores dos SM's e apresentam diversas componentes harmônicas sendo predominante as senoides com dobro da frequência fundamental e sequência negativa. Essas correntes circulam internamente no CMM sem ser injetada na rede, ou seja, não contribuem na transferência de potência à rede, apenas gerando perdas e aumentando o *ripple* dos capacitores (Bahrani et al., 2016). Por isso, é comum em trabalhos envolvendo o CMM projetar uma malha de controle para mitigar essa componente (Tu et al., 2010).

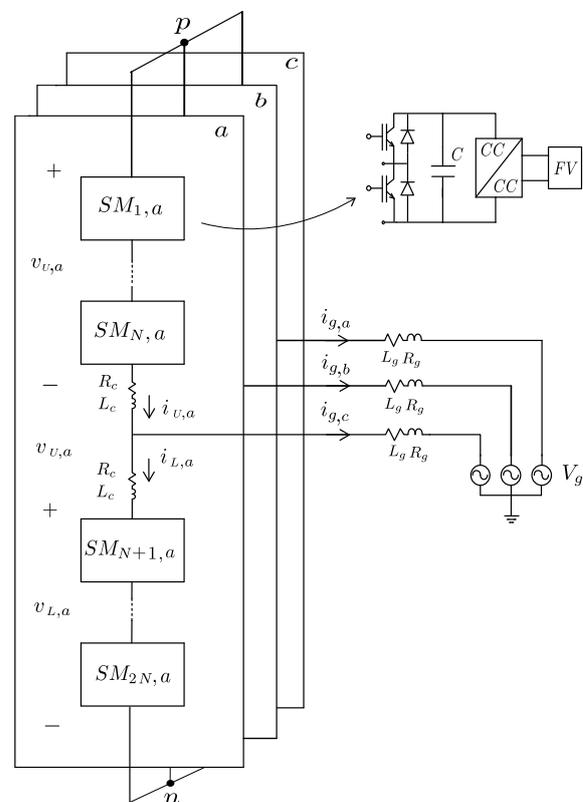


Fig. 1 Estrutura do CMM.

2.1 Modelo médio de braço

Como visto na seção anterior, o CMM é composto por uma ligação de várias chaves e capacitores, sua complexidade torna-se proporcional ao número de SM's empregados. Assim, um conversor de muitos níveis requer grande esforço computacional para ser simulado. Dessa forma, pode-se modelar o conversor com o grau de detalhamento adequado aos objetivos de estudo.

Nesse sentido, o modelo adotado nesse trabalho foi o modelo médio por braço. Ele consiste em substituir o conjunto dos SM's de cada braço por uma fonte de tensão equivalente que permita representar o comportamento de todo conjunto. Neste trabalho foi proposta uma adaptação incluindo uma fonte de corrente CC para representar a dinâmica da geração de energia dos arranjos FV e do conversor CC-CC.

A derivação desse modelo pressupõe dois pontos: Todos os capacitores são idênticos e suas tensões entre si já estão balanceadas (Zama, 2017).

Embora as equações mostradas a seguir apresentem o índice 'u', referente aos braços superiores, elas representam o comportamento de qualquer braço, visto que todos eles possuem a mesma dinâmica. Assim, a tensão em um braço de uma fase j é dada por (3).

$$v_{U,j} = m \cdot v_{ceq} \quad (3)$$

Onde m é o sinal de chaveamento definida pelo bloco de modulação, que será mostrado na seção 2.2. v_{ceq} é a tensão na capacitância equivalente do braço dada por:

$$v_{ceq} = v_c(0) + \frac{1}{C_{eq}} \int (mi_u + I_{FV}) dt \quad (4)$$

Onde I_{FV} é a corrente do modelo de arranjo FV e C_{eq} é a capacitância equivalente cujo valor é dado pela equação (5) visto que as capacitâncias individuais, C , estão ligadas em série no braço:

$$C_{eq} = \frac{C}{N} \quad (5)$$

O valor inicial da capacitância equivalente $v_c(0)$ será considerado como o valor médio nominal em regime permanente, ou seja, os capacitores já estarão devidamente carregados.

Baseado em (3), (4) e (5) o circuito equivalente da tensão de braço é mostrado na Figura 2.

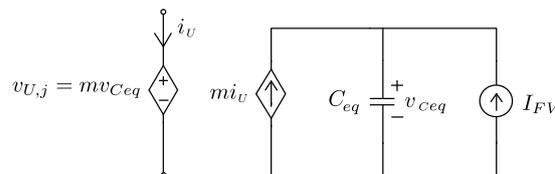


Fig. 2 – Modelo equivalente médio de braço

2.2 Estratégia de Modulação

Há diversas técnicas de modulação que podem ser aplicadas para o controle do CMM. Elas podem ser divididas basicamente em técnicas baseadas em alta e baixa frequência. Para o modelo analisado nesse trabalho a modulação empregada foi a técnica em baixa frequência denominada NLM (Nearest Level Modulation) cuja implementação é baseada no cálculo da quantidade de SM's a serem inserido num instante de tempo usando o sinal de controle 'u' proveniente da malha de controle da corrente (Hu and Jiang, 2015).

$$m_u = \text{round} \left(\frac{N}{2} \left(1 - \frac{u}{V_{pn}} \right) \right) \quad (6)$$

$$m_L = \text{round} \left(\frac{N}{2} \left(1 + \frac{u}{V_{pn}} \right) \right)$$

Onde m_u e m_L representa a número de SM's a serem inseridos no braço superior e inferior respectivamente, round uma função matemática que arredonda o resultado de sua entrada para o número inteiro mais próximo e N o número de SM's total de cada braço.

2.3 Dinâmica das correntes de saída

O controle da potência injetada na rede é feito gerando as correntes de saída do conversor. A característica das correntes é senoidal na frequência fundamental da rede elétrica. A Figura 3 mostra o circuito equivalente por fase do conversor em regime CA.

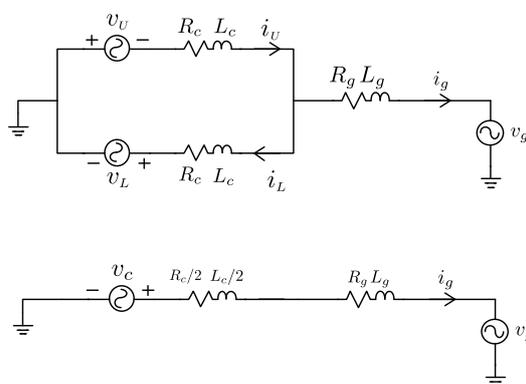


Fig. 3 – Modelo equivalente da corrente de saída

Os ramos referentes aos braços do conversor estão em paralelo, e podem ser substituídos pelo seu equivalente Thévenin. Assim, é possível escrever a dinâmica da corrente de saída para uma fase:

$$v_c - \left(\frac{L_c}{2} + L_g\right) \frac{di_g}{dt} - \left(\frac{R_c}{2} + R_g\right) i_g = v_g \quad (7)$$

Percebe-se que dinâmica é similar de conversores fonte de tensão convencionais de dois níveis. Ademais, (7) mostra que a corrente injetada na rede é controlada por v_c , definida como tensão interna gerada pelo conversor dada por:

$$v_c = \frac{1}{2}(-v_U + v_L) \quad (8)$$

2.4 Fluxo de potência no CMM

Nesta seção será discutida a dinâmica das potências internas do CMM para compreender o fenômeno do desbalanço de energia a que o conversor está suscetível.

Na operação normal considerando uma irradiância uniforme em todo sistema FV, a potência média nos braços superior e inferior de uma fase do CMM é:

$$\begin{aligned} p_U &= \overline{v_U i_U} \\ p_L &= \overline{v_L i_L} \end{aligned} \quad (9)$$

Expandindo (9) tem-se:

$$\begin{aligned} p_U &= \overline{\left(-v_c + \frac{v_{pn}}{2}\right) \left(\frac{i_g}{2} + i_c\right)} \\ p_L &= \overline{\left(v_c + \frac{v_{pn}}{2}\right) \left(-\frac{i_g}{2} + i_c\right)} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} p_U &\cong -v_c \frac{i_g}{2} + \frac{v_{pn} i_g}{2} + \frac{\overline{v_{pn}}}{2} i_c - \overline{v_c i_c} \\ p_L &\cong -v_c \frac{i_g}{2} - \frac{v_{pn} i_g}{2} + \frac{\overline{v_{pn}}}{2} i_c + \overline{v_c i_c} \end{aligned} \quad (11)$$

Assumindo que v_{pn} seja constante e v_c seja aproximadamente senoidal, os dois últimos termos de (11) mostram que se pode controlar fluxo de potência interno do conversor por meio da corrente circulante i_c . O terceiro termo de (11) mostra que uma parcela CC de i_c compensa o desbalanço entre fases, visto que a soma das correntes circulantes de cada fase é nula.

Já no quarto termo, os sinais invertidos dos termos evidenciam que uma componente de frequência fundamental de i_c é capaz de compensar desbalanço de energia entre os braços de uma fase

3. CONTROLE DO CONVERSOR

Nesta seção será descrito os procedimentos para determinação dos compensadores para as malhas de controle do CMM.

3.1 Malha de controle das correntes de saída

A estratégia de controle das correntes de saída é baseada no eixo síncrono d-q. Reescrevendo (7) nas três fases para o eixo d-q tem-se :

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{gd} \\ i_{gq} \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} i_{gd} \\ i_{gq} \end{bmatrix} = \omega L \begin{bmatrix} i_{gq} \\ -i_{gd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{cd} \\ v_{cq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{gd} \\ v_{gq} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Onde $L = L_g + L_c/2$ e $R = R_g + R_c/2$

Passando (12) para o domínio da frequência pode-se derivar a função de transferência da planta de corrente

$$G_i(s) = \frac{1}{R + sL} \quad (13)$$

A Figura 4 mostra o esquemático do controle das correntes no eixo dq. A referência de corrente I_{gd}^* é proveniente da malha de controle da tensão e I_{gq}^* é definido em zero.

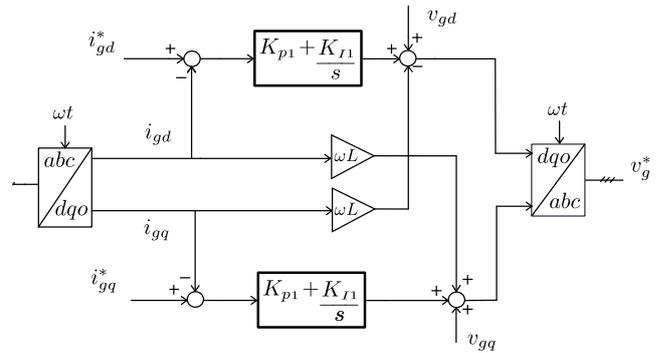


Fig 4 – Malha de controle das correntes

3.2 Malha de tensão da capacitância equivalente

A referência produzida para malha de corrente de saída deve ser a mesma produzida por todo sistema fotovoltaico, caso contrário, haverá desbalanceamento de energia nos capacitores e a tensão na capacitância de braço desviará de seu valor nominal. Como não existe um link CC provido por fonte externa, é necessária uma malha de controle que garanta o valor de tensão constante entre os pontos n e p. Para isso, desconsiderando as perdas no conversor, o balanceamento da potência em todos os braços do CMM é dado por:

$$\sum \frac{1}{2} C_{eq} \frac{d}{dt} v_{ceq}^2 = P_{FV} - P_g \quad (14)$$

Onde P_{FV} é a potência total gerada pelo sistema FV e P_g a potência ativa instantânea injetada na rede. Aplicando a transformada de Laplace em (14) e considerando P_{FV} como uma perturbação em regime permanente, a função de transferência da planta de tensão é:

$$\frac{V_{Ceq}^2(s)}{P_g(s)} = \frac{2}{sC_{eq}} \quad (15)$$

A Figura 5 mostra a malha de controle da tensão, onde a soma dos quadrados das tensões das capacitâncias dos seis braços é comparada ao valor de referência do barramento CC. A saída do compensador PI gera referência sinal de corrente da malha de controle da Figura 4

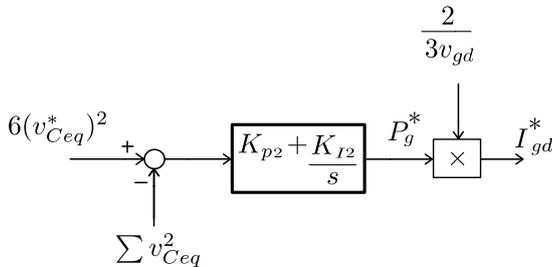


Fig. 5 – Malha de controle do link CC

3.3 Projeto dos controladores

O método de projeto dos compensadores foi baseado na resposta em frequência com auxílio da ferramenta SISOTOOL do software MATLAB. A Tabela 1 resume os ganhos dos compensadores e as informações das frequências de cruzamento e margem de fase da função de transferência de malha aberta compensada.

Tabela 2. Ganhos dos compensadores

Malha de controle	Compensadores	Frequência de cruzamento e margem de Fase
Correntes de saída	$k_{p1} = 4$ $k_{i1} = 800$	$f_c = 264 \text{ rad/s}$ $MF = 61^\circ$
Tensão link CC	$k_{p2} = 0,0528$ $k_{i2} = 1,1429$	$f_c = 45,1 \text{ rad/s}$ $MF = 64,3^\circ$

4. RESULTADOS E SIMULAÇÕES

Para verificar a efetividade da modelagem do conversor bem como as técnicas de controles empregadas, foram realizadas simulações no software PSIM. Os valores dos componentes passivos do CMM foram projetados conforme a metodologia mostrada em (Rohner et al., 2010) e Zama (2017). Os parâmetros da simulação do sistema são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros do sistema

Parâmetro	Valor
Tensão de linha da rede	13,8 kV
Frequência da rede	60 Hz
Tensão SM	3 kV
Capacitância do SM	13 mF
Indutância de braço	1,6 mH
Resistencia de braço	0,1 Ohms
Indutância de filtro	19 mH
Resistência de filtro	0,630 Ohms
Número de SM's por braço	10
Potência Nominal	15 MW

4.1 Operação nominal do CMM

A Figura 6 mostra algumas formas de onda características de grandezas internas do CMM operando em condições nominais. Nota-se em 6(a) a onda multinível resultante de 11 níveis de tensão.

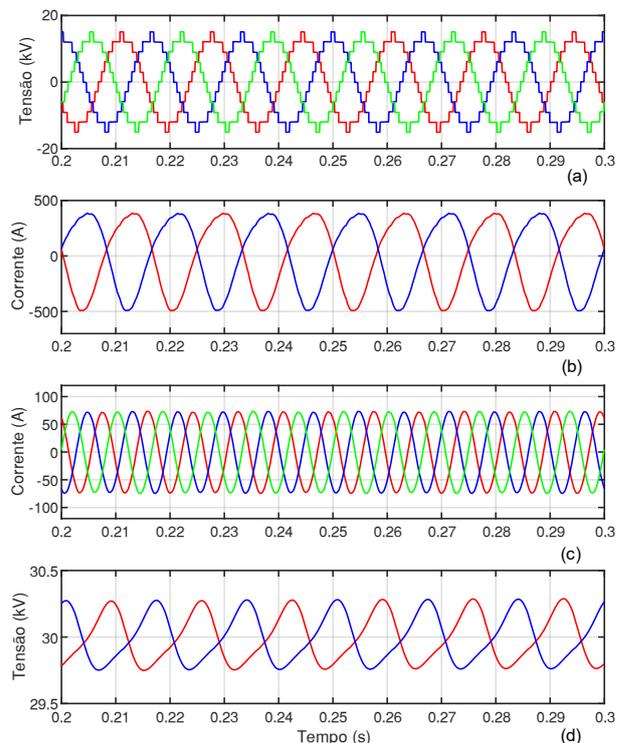


Fig. 6 Operação nominal do conversor. (a) Tensões produzidas pelo conversor (b) Correntes nos braços da fase 'a' (c) Correntes circulantes (d) Tensão nas capacitâncias da fase 'a'.

Em 6(b) são mostradas as correntes em um braço superior e inferior do conversor. Observa-se que estão na frequência fundamental, contudo, seu formato não está perfeitamente

senoidal devido a presença de componentes harmônicas de segunda ordem, que são mostradas em 6(c). Essas componentes são originárias da ondulação na tensão nos capacitores dos braços mostradas em 6(d). É possível notar que a tensão média na capacitância igual se mantém em 30 kV e *ripple* de tensão é de apenas 1,6 %.

4.2 Resposta dinâmica do CMM

A Figura 7 mostra desempenho das estratégias de controles aplicadas. Foi simulado funcionamento do sistema entregando aproximadamente 15 MW quando, no instante 0,4 s, a irradiância em todo o sistema FV é reduzido pela metade. Como se vê em 7(a), potência instantânea injetada da rede também caiu pela metade com rápida resposta transitória e com baixo sobressinal. Em 7(b) as correntes de saída permanecem equilibradas e senoidais.

Nota-se em 7(c) que o controle foi capaz de prover o rastreamento satisfatório e resposta rápida às mudanças de potência gerada. A resposta da tensão do barramento CC virtual apresentou boa resposta dinâmica com pequeno sobressinal e rápido assentamento.

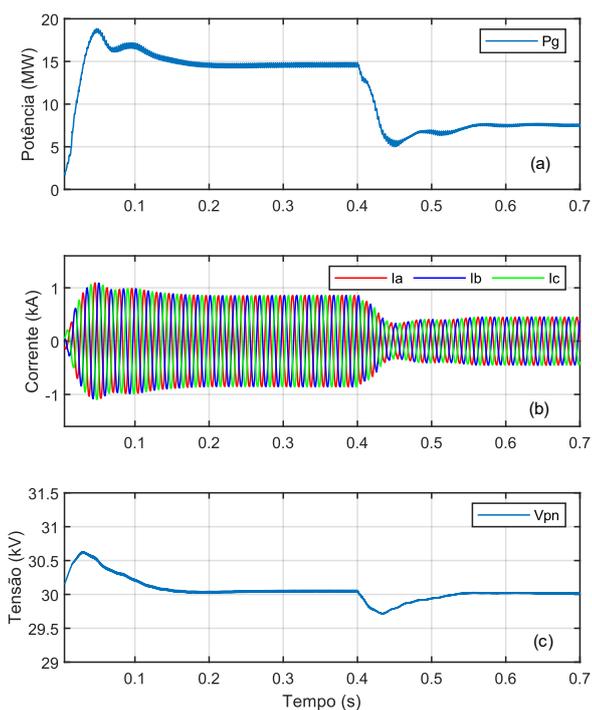


Fig. 7 Resposta do CMM na redução de nível de geração: (a) Potência injetada, (b) Correntes de saída, (c) Tensão no link cc virtual.

4.3 Resposta ao desbalanços de energia

Foi realizada uma nova simulação com intuito de verificar o comportamento do conversor na presença de desbalanços internos de energia.

A Figura 8 mostra as correntes de saída e as correntes diferenciais. No instante 0,3 s a irradiância nos arranjos FV dos dois braços da fase A diminuem em 80 %. Nesse momento ocorre uma diferença de energia produzida entre as fases e assim há o surgimento de componente CC nas correntes diferenciais das três fases do conversor cuja soma é igual a zero.

Na Figura 9 são mostradas as mesmas correntes para outra situação. Nesse caso, no instante 0,3 s a irradiância nos arranjos de todos os braços superiores do CMM é reduzida em 80 %. Nesse momento ocorre um desbalanço de energia entre braços de uma mesma fase sem haver diferença de energia entre as fases. Assim, surgem componentes de frequência fundamental nas correntes circulantes. A análise das duas figuras mostra que apesar da ocorrência de desbalanços internos, as correntes de saída em nada são afetadas.

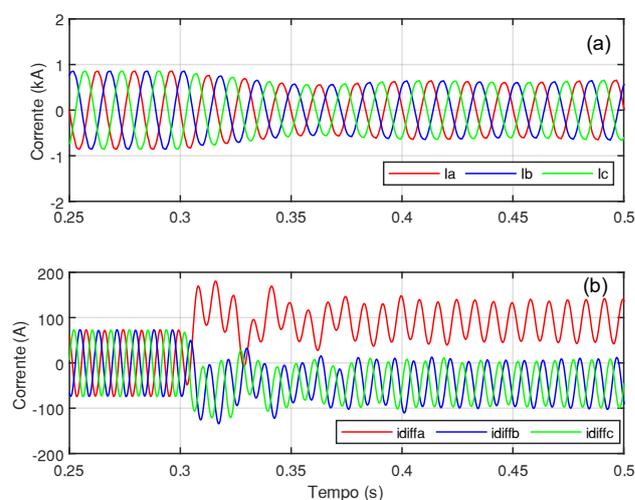


Fig. 8 Resposta ao desbalanço de energia entre fases: (a) correntes de saída (b) correntes diferenciais

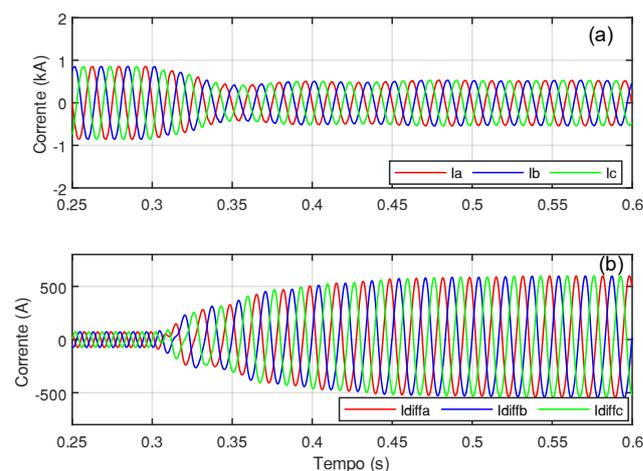


Fig. 9 Resposta na ocorrência de desbalanço de energia entre braços das fases: (a) correntes de saída (b) correntes diferenciais

5. CONCLUSÕES

Esse trabalho apresentou uma análise de CMM de topologia multistring para sistemas fotovoltaicos conectado à rede. Os resultados mostraram que o modelo médio de braço é adequado para representar a dinâmica do CMM em análise envolvendo fluxo de potência na rede. Além disso, foi verificado a eficácia dos controladores PI em manter a operação do sistema estável. Por último, foi constatada a capacidade da corrente circulante em regular o balanço de energia entre as fases do CMM, tornando essa topologia de conversor multinível mais robusta às características intermitentes da geração fotovoltaica.

REFERÊNCIAS

- Acharya, A.B., Ricco, M., Sera, D., Teoderscu, R., Norum, L.E., 2019. Performance Analysis of Medium-Voltage Grid Integration of PV Plant Using Modular Multilevel Converter. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 34 (4), 1731–1740.
- Bahrani, B., Debnath, S., Saeedifard, M., 2016. Circulating Current Suppression of the Modular Multilevel Converter in a Double-Frequency Rotating Reference Frame. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31 (1), 783–792.
- Bayat, H., Yazdani, A., 2018. A Power Mismatch Elimination Strategy for an MMC-Based Photovoltaic System. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 33 (3), 1519–1528.
- Debnath, S., Qin, J., Bahrani, B., Saeedifard, M., Barbosa, P., 2015. Operation, Control, and Applications of the Modular Multilevel Converter: A Review. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30 (1), 37–53.
- Elsanabary, A., Mekhilef, S., Seyedmahmoudian, M., Stojcevski, A., 2021. An energy balancing strategy for modular multilevel converter based grid-connected photovoltaic systems. *IET power electron.* 14 (12), 2115–2126.
- Elsanabary, A.I., Konstantinou, G., Mekhilef, S., Townsend, C.D., Seyedmahmoudian, M., Stojcevski, A., 2020. Medium Voltage Large-Scale Grid-Connected Photovoltaic Systems Using Cascaded H-Bridge and Modular Multilevel Converters: A Review. *IEEE Access*, 8, 223686–223699.
- Hu, P., Jiang, D., 2015. A Level-Increased Nearest Level Modulation Method for Modular Multilevel Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30 (4), 1836–1842.
- Lesnicar, A., Marquardt, R., 2003. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range, in: 2003 *IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*., Presented at the 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, p. 6 pp. Vol.3-.
- Rivera, S., Wu, B., Lizana, R., Kouro, S., Perez, M., Rodriguez, J., 2013. Modular multilevel converter for large-scale multistring photovoltaic energy conversion system, in: 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Presented at the 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, pp. 1941–1946.
- Rohner, S., Bernet, S., Hiller, M., Sommer, R., 2010. Modulation, Losses, and Semiconductor Requirements of Modular Multilevel Converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57 (8), 2633–2642.
- Tu, Q., Xu, Z., Zhang, J., 2010. Circulating current suppressing controller in modular multilevel converter, in: IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Presented at the IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 3198–3202.
- Zama, M. (2017). Modeling and control of Modular Multilevel Converters (MMCs) for HVDC applications. Université Grenoble Alpes.