

Proposta de um Filtro Ativo Trifásico baseado em Inversores Monofásicos do tipo Modular Multinível com Controle de Tensão de Capacitores

Felipe Gomes da Silva Souza * Guilherme Baumann Corrêa **
José Andrés Santisteban ***

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e
Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, RJ.

* e-mail:gomes_felipe@id.uff.br

** e-mail:gbcorreia@id.uff.br

*** e-mail:josesantisteban@id.uff.br

Abstract:

In three-phase active filtering, the voltage inverter is the key for successful mitigation of harmonic components. Dealing with medium and high voltage applications, multilevel inverters are more suitable. The presented proposal allows to analyse the performance of three-phase active filters composed by single-phase 5-Level H-bridge voltage Modular Multilevel Inverters and compare them with those that use single-phase 5-Level H-bridge voltage Neutral Point Clamped inverters. Furthermore, the developed control system includes a strategy to balance the twelve capacitors voltages of the three single-phase modular multilevel inverters. The results show the effectiveness of this strategy, as well as its filtering capacity, with the possibility of adjusting the control parameters to obtain a similar quality to that obtained with neutral point clamped filters.

Resumo: Na filtragem ativa trifásica, o inversor de tensão é peça chave para o sucesso da mitigação de componentes harmônicos. Para o caso de aplicações de média e alta tensão, os inversores multiníveis mostram-se mais adequados. A proposta apresentada permite analisar a performance dos filtros ativos trifásicos com inversores monofásicos do tipo modular multinível em ponte H com 5 níveis de tensão e comparar com aqueles que utilizam inversores monofásicos do tipo ponto neutro grampeado, também em ponte H com 5 níveis de tensão. Além disso, o sistema de controle implementado inclui uma estratégia de balanceamento das tensões dos doze capacitores que compõem os três inversores monofásicos do tipo modular multinível. A partir dos resultados da distorção harmônica total de corrente é mostrada a eficácia dessa estratégia, assim como a capacidade de filtragem, com a possibilidade de ajuste dos parâmetros de controle para obter uma qualidade similar à obtida com filtros do tipo ponto neutro grampeado.

Keywords: Active Power Filter, Instantaneous Power Theory, Power Quality, Multilevel Neutral Point Clamped Converter, Modular Multilevel Converter, Capacitor Voltage Balance

Palavras-chaves: Filtro Ativo de Potência, Teoria de Potência Instantânea, Qualidade de Energia, Conversor Multinível com Ponto Neutro Grampeado, Conversor Multinível Modular, Balanceamento da Tensão dos Capacitores

1. INTRODUÇÃO

O expressivo aumento do número de cargas não lineares na rede elétrica provocou, nos últimos tempos, um aparecimento de elevada distorção harmônica total tanto nas tensões como nas correntes. Conseqüentemente, visando mitigar este e outros problemas de qualidade de energia elétrica, as agências regulamentadoras nacionais e internacionais estipularam índices aceitáveis de diversos parâmetros do sistema elétrico, por exemplo o índice de distorção harmônica total de tensão, dentre outros. Estes

índices aparecem em normas como na IEEE Std 519 (2014) e o Módulo 8 - ANEEL (2022).

Para aplicações de média e alta tensão, a filtragem ativa trifásica com a utilização de inversores multiníveis do tipo Modular Multinível (MMC) destaca-se como alternativa interessante, como afirma Ghetti (2012). Por meio da teoria de potência instantânea, bastante difundida atualmente, é possível determinar as correntes de compensação que o inversor deve injetar ou drenar do sistema elétrico para reduzir o conteúdo harmônico, conforme apresentado nos trabalhos de Ghetti (2012), Baumann (2021), Gleydson (2018), Carvalho (2014) e Akagi (2017).

* Este trabalho foi parcialmente apoiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES

Quando se trata de reduzir as perdas por condução e chaveamento dos inversores, a substituição de um inversor trifásico convencional por três inversores monofásicos mostra-se promissora. Por outro lado, havendo falha num dos braços de um inversor trifásico convencional, a operação de compensação ou filtragem trifásica é impossibilitada. De forma contrária, utilizando três inversores monofásicos, a falha de um deles ainda permite a compensação ou filtragem desejada nas outras fases.

Assim sendo, o objetivo deste trabalho é analisar a performance dos filtros ativos trifásicos com inversores monofásicos do tipo MMC e compará-los com aqueles baseados em inversores monofásicos do tipo ponto neutro grampeado (NPC: Neutral Point Clamped), ambos em ponte H com 5 níveis de tensão. Além disso, expor as estratégias de balanceamento das tensões dos capacitores para ambas as estruturas.

Esse trabalho está organizada da seguinte forma: no item 1 foi apresentada uma breve introdução ao tema. No item 2 serão mostrados brevemente os conceitos referentes a teoria de potência instantânea. No item 3, por sua vez, consta a estrutura dos filtros ativos monofásicos. O item 4 compreenderá as simulações correspondentes a cada caso, com cargas não lineares balanceadas. Por fim, no item 5 serão mencionadas as principais conclusões obtidas.

2. TEORIA DE POTÊNCIA INSTANTÂNEA

A teoria de potência convencional, bastante difundida nos estudos de engenharia elétrica até hoje, não é suficiente para projetar conversores que realizam filtragem de harmônicos e compensação de reativos, caso o sistema elétrico analisado contenha cargas não lineares, conforme apresentado em Akagi (2017). Sendo assim, utiliza-se a teoria de potência instantânea desenvolvida em Akagi (1984) para efetuar tal filtragem e compensação.

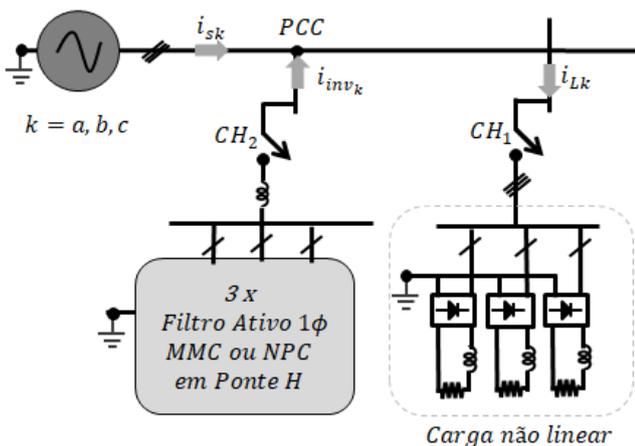


Figura 1. Diagrama unifilar de um sistema elétrico trifásico que utiliza três filtros ativos monofásicos em paralelo.

A filtragem ativa e a compensação de reativos é realizada corretamente quando o filtro ativo paralelo injeta ou drena corretamente as correntes de compensação no Ponto de Acoplamento Comum (PCC), conforme mostra a Fig. 1. A corrente na fonte de alimentação em cada fase (i_{sk}) é a soma da corrente injetada ou drenada por fase do inversor

(i_{invk}) com a corrente na carga por fase (i_{lk}), conforme mostra (1). As correntes de compensação somadas às correntes na carga devem resultar em uma corrente na fonte de alimentação mais próxima a forma senoidal e em fase com tensão de alimentação.

$$i_{sk} = i_{invk} + i_{lk} \quad (1)$$

O algoritmo de controle baseado na teoria de potência instantânea, feito por meio da leitura das tensões na fonte de alimentação ($v_{s_{abc}}$) e das correntes na carga ($i_{L_{abc}}$), gera as referências das correntes de compensação por fase (i_{ca} , i_{cb} e i_{cc}) que o filtro ativo paralelo deve injetar ou drenar do sistema trifásico, conforme mostra a Fig. 2.

Este algoritmo consiste em cinco etapas: transformação de Clarke, cálculo das potências instantâneas, seleção de potência a serem compensadas, cálculo das correntes de referência em $\alpha\beta 0$ e transformação inversa de Clarke. Nesse trabalho admite-se que a componente zero da tensão (v_0) é zero, pois as tensões de alimentação nas três fases são assumidas equilibradas.

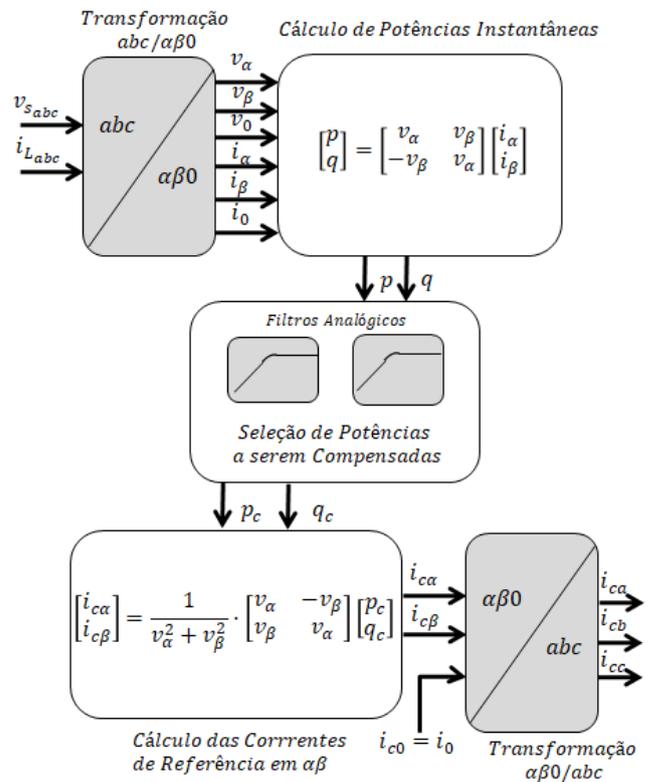


Figura 2. Teoria de potência instantânea.

A primeira etapa consiste em transformar as correntes na carga e as tensões na fonte de alimentação do referencial abc para o referencial $\alpha\beta 0$. A segunda etapa consiste no cálculo das potências instantâneas por meio de (2).

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ p_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta & 0 \\ -v_\beta & v_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & v_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

A equação 2 calcula a potência instantânea real (p), a potência instantânea imaginária (q) e a potência de sequência zero (p_0). Em casos de desbalanceamento e

presença de componentes harmônicas nas tensões e nas correntes, as potências p , q e p_0 apresentam componentes contínuas e componentes oscilantes, conforme mostram (3), (4) e (5).

$$p_0 = \overline{p_0} + \tilde{p}_0 \quad (3)$$

$$p = \overline{p} + \tilde{p} \quad (4)$$

$$q = \overline{q} + \tilde{q} \quad (5)$$

As componentes de potências contínuas representam a parte da energia por unidade de tempo que flui em um determinado sentido, enquanto as componentes de potências oscilantes representam a parte da energia por unidade de tempo que flui em ambos os sentidos, conforme apresentado em Freitas (2014).

A terceira etapa consiste em utilizar filtros analógicos em função das componentes de potências a serem eliminadas, mostradas em (3), (4) e (5). Em seguida, na quarta etapa calculam-se as referências das correntes de compensação no referencial $\alpha\beta 0$, de acordo com (6).

$$\begin{bmatrix} i_c \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_c \\ q_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

Por fim, na quinta etapa aplica-se a transformação inversa de Clarke para obter as correntes de referência de compensação no referencial abc , conforme mostrado em Akagi (1984) e Akagi (2017).

3. FILTROS ATIVOS MONOFÁSICOS

Os filtros ativos monofásicos implementados neste trabalho são compostos por três inversores de tensão multiníveis monofásicos do tipo 5 níveis de tensão em ponte H, três reguladores de corrente monofásicos por histerese multinível e um algoritmo de controle que gera referências de corrente baseadas na teoria pq trifásica, resumido na seção 2. Nesse trabalho, para verificar o desempenho desta proposta, será feita uma comparação com a estrutura multinível baseada em inversores monofásicos do tipo NPC.

3.1 Inversor Monofásico Multinível do tipo 5 níveis de tensão em Ponte H com Ponto Neutro Grampeado (NPC)

O inversor monofásico multinível do tipo 5 níveis de tensão em ponte H com ponto neutro grampeado é composto por dois capacitores e por oito chaves semicondutoras, por exemplo IGBT's, do Inglês *Insulated Gate Bipolar Transistor* e quatro diodos, conforme mostrado na Fig. 3. Os níveis de tensão (V_{dc} , $\frac{V_{dc}}{2}$; 0; $-\frac{V_{dc}}{2}$; $-V_{dc}$) podem ser impostos pelo inversor multinível, a depender do erro entre a referência de corrente de compensação e a corrente real imposta por cada inversor.

3.2 Inversor Monofásico Modular Multinível do tipo 5 níveis em Ponte H (MMC)

O inversor monofásico modular multinível do tipo 5 níveis é composto por dois submódulos por perna, ou seja, um

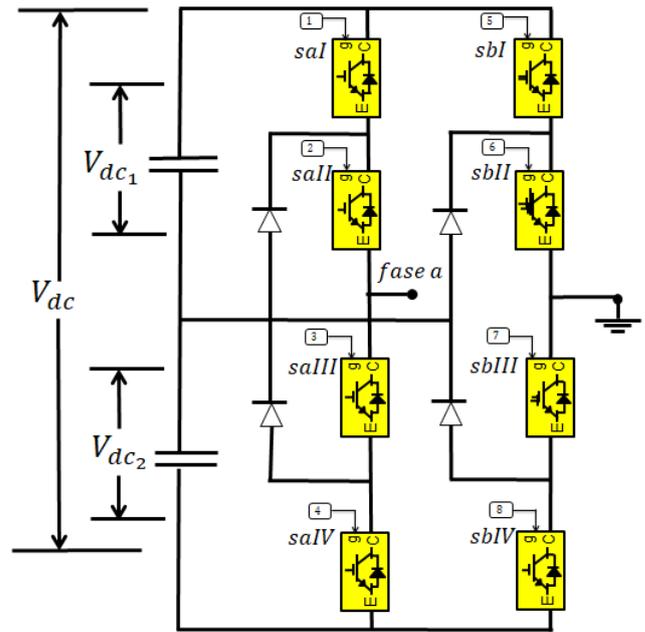


Figura 3. Inversor multinível do tipo 5 níveis em ponte H com ponto neutro grampeado.

submódulo por braço, conforme mostra a Fig. 4. Cada submódulo é composto por um capacitor e duas chaves semicondutoras do tipo IGBT.

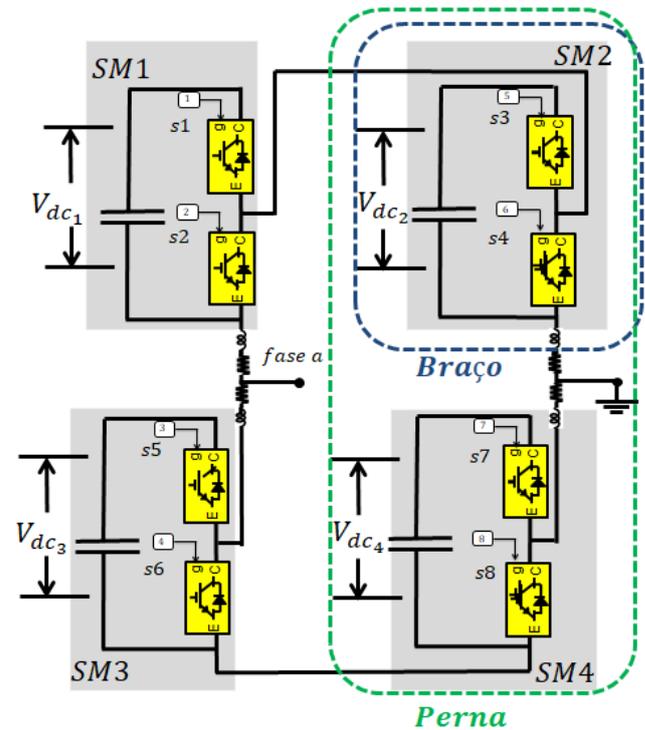


Figura 4. Inversor modular multinível do tipo 5 níveis em ponte H.

De forma semelhante ao que ocorre com o inversor NPC, este inversor consegue impor cinco níveis de tensão (V_{dc} , $\frac{V_{dc}}{2}$; 0; $-\frac{V_{dc}}{2}$; $-V_{dc}$), a depender do erro entre a referência de corrente de compensação e a corrente real imposta por cada inversor.

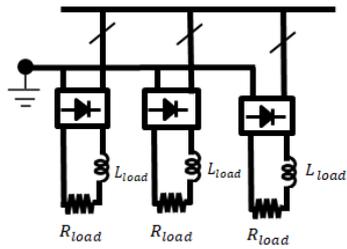


Figura 9. Carga não linear - retificador monofásico de ponte completa.

NPC e o segundo composto por inversores monofásicos MMC.

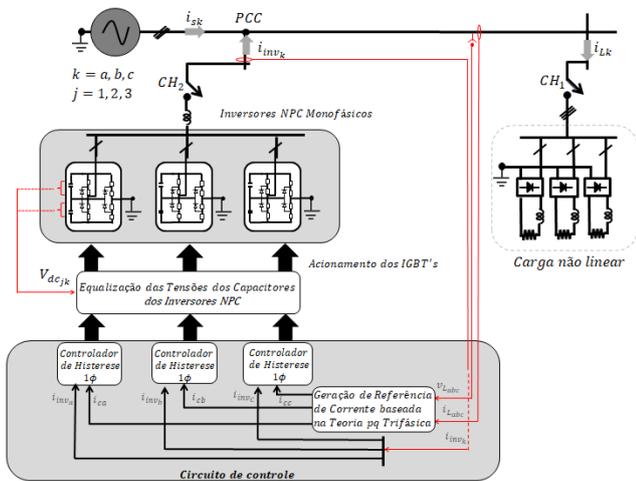


Figura 10. Diagrama de blocos do sistema elétrico com filtragem ativa usando inversores multiníveis monofásicos do tipo NPC.

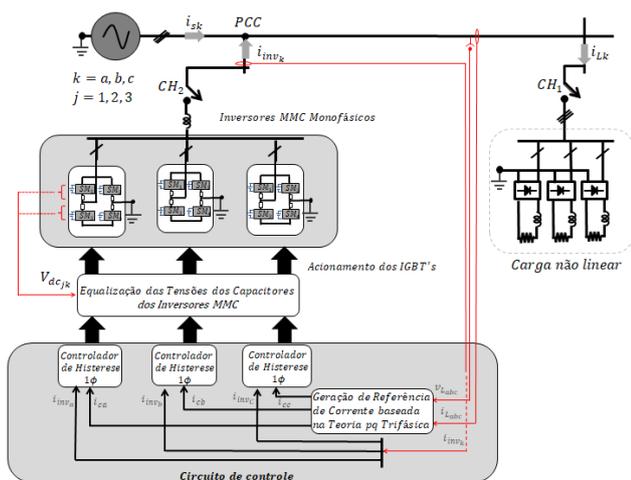


Figura 11. Diagrama de blocos do sistema elétrico com filtragem ativa usando inversores multiníveis monofásicos do tipo MMC.

A Fig. 12 ilustra as correntes nas cargas não lineares, mostrando a presença de elevadas componentes indutivas.

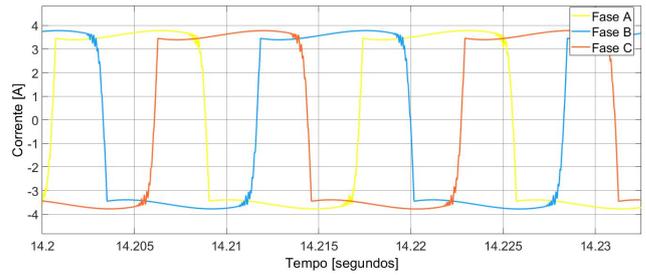


Figura 12. Correntes nas cargas não lineares.

As Figs. 13 e 14 comparam a corrente de referência para a compensação da fase *a* com a respectiva corrente entregue pelo inversor monofásico, no primeiro caso utilizando os NPC e no segundo caso utilizando os MMCs.

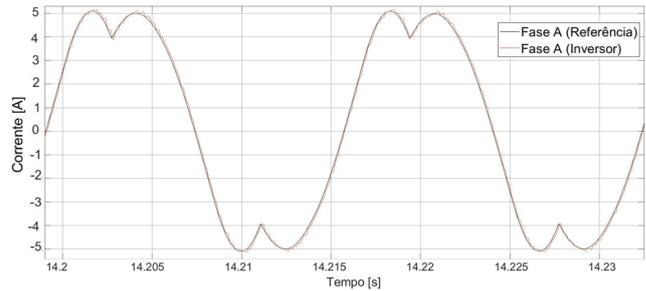


Figura 13. Corrente de referência de compensação e corrente injetada ou drenada pelo inversor NPC.

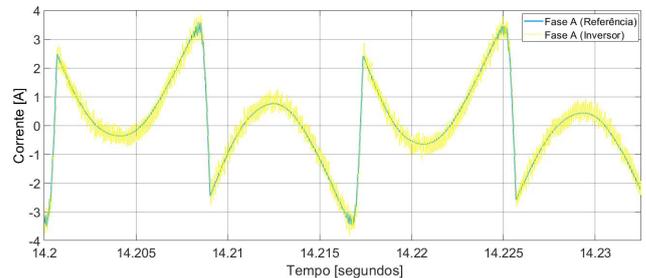


Figura 14. Corrente de referência de compensação e corrente injetada ou drenada pelo inversor MMC.

Observou-se que a corrente injetada pelo inversor MMC segue a referência como desejado, apresentando uma ondulação de no máximo 0,5 A em relação a sua referência. Os resultados obtidos na fase *b* e na fase *c* são semelhantes. Contudo, foi observado que ao modificar os ganhos dos controladores de tensão dos capacitores dos inversores MMC as correntes de referência de compensação sofrem alterações, justificando estudos futuros para uma melhor compreensão visando convergir as formas de onda das correntes de referência de compensação.

As Figs. 15 e 16 mostram a corrente e a tensão de alimentação da fase *a*, no PCC, para o caso do NPC e para o caso do MMC, respectivamente. Observa-se que a componente fundamental da corrente está em fase com a respectiva tensão de alimentação, evidenciando a correta compensação de reativos. Nota-se também, na Fig. 16, que a ondulação de tensão no PCC é maior do que o observado na Fig. 15. Isto ocorreu porque, com o intuito de reduzir a complexidade do sistema de controle, foi dispensada a utilização de um *Phase-Locked Loop* (PLL). Simulando o

mesmo sistema de controle com a inclusão do PLL, esta ondulação reduz significativamente, assemelhando-se ao mostrado na Fig. 15. Nas Figs. 15 e 16, as correntes foram multiplicadas por um fator igual a 10 para melhorar a compreensão dos resultados obtidos.

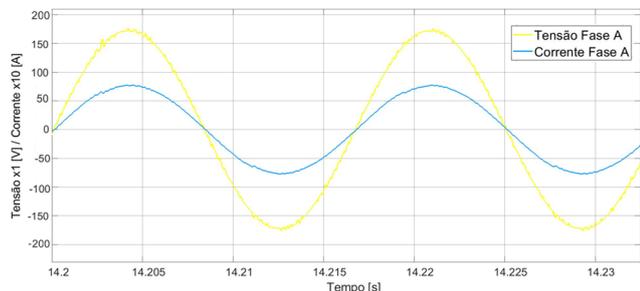


Figura 15. Corrente e tensão da fonte de alimentação da fase *a*, utilizando inversores NPC.

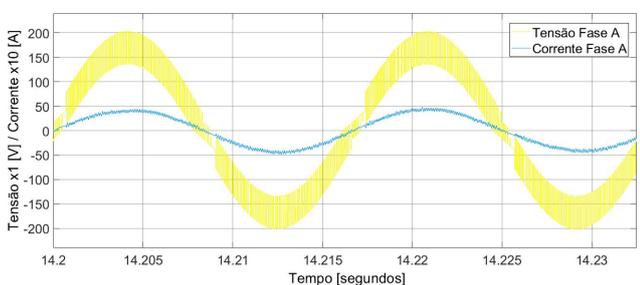


Figura 16. Corrente e tensão da fonte de alimentação da fase *a*, utilizando inversores MMC.

Na Fig. 17 são mostradas as tensões dos dois capacitores de um dos inversores NPC. Como observado, estas oscilam em torno da tensão de referência, que para este caso é de 800V, conforme informado na Tabela 3. Além disso, mostra-se a soma das duas tensões.

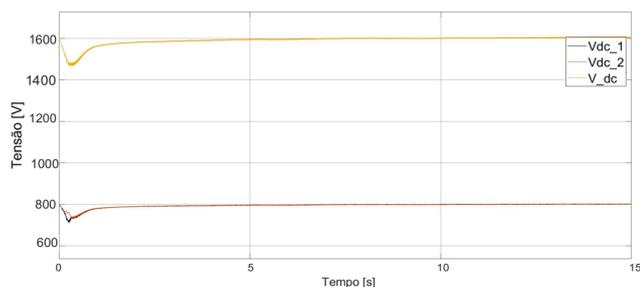


Figura 17. Tensões dos dois capacitores do inversor NPC ligado à fase *a*

Na Fig. 18 são mostradas as tensões dos quatro capacitores de um dos inversores MMC, as quais variam em torno da tensão de referência, que também é 800V, conforme informado na Tabela 3. Observou-se que o máximo valor de tensão obtido foi de aproximadamente 830V e o mínimo valor de tensão obtido foi de aproximadamente 780V, representando um erro percentual de 6,25%, após diversos ajustes dos parâmetros dos controladores PI. O emprego de outros controladores é um aspecto a ser explorado futuramente. Mesmo com a ondulação observada, para efeito da compensação e filtragem, tal resultado não prejudicou o objetivo almejado.

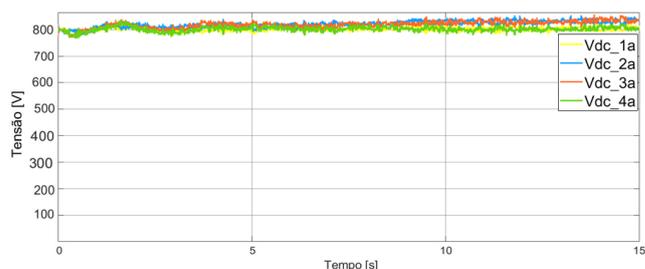


Figura 18. Tensões dos quatro capacitores do inversor MMC ligado à fase *a*.

Na tabela 4 são mostrados os percentuais das distorções harmônicas das correntes ($THDi$) da fonte de alimentação na fase *a* para cada caso (NPC e MMC).

Tabela 4. Resultados do percentual da Distorção Harmônica Total das correntes ($THDi$) na fase *a*.

| - | $THDi\%$ |
|----------------|----------|
| Sem Inversores | 24,41% |
| Inversores NPC | 1,20% |
| Inversores MMC | 4,8% |

Como se percebe, a distorção harmônica total é maior para o caso de utilizar MMCs, o que pode ser explicado pelo controle de tensão de um maior número de capacitores. Além disso, é possível que os controladores utilizados necessitem ser substituídos por outros mais sofisticados. Para ambos os casos, houve uma drástica redução no $THDi$ em relação ao $THDi$ sem filtragem ativa de potência.

5. CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi proposta a utilização de três inversores monofásicos do tipo MMC com controle de tensão de capacitores para um filtro ativo trifásico a quatro fios.

A partir dos resultados das simulações, verificou-se que estes foram semelhantes aos obtidos com aqueles que utilizam três inversores monofásicos do tipo NPC, ou seja, conseguem realizar a correta filtragem e compensação de reativos.

Para o caso de utilizar MMCs, o sistema de controle das tensões dos capacitores é mais complexo, uma vez que deve manter constante a tensão de quatro capacitores por fase, ao invés de dois capacitores, como ocorre no caso de utilizar inversores NPCs. Como consequência, as correntes de referência de compensação são distintas. Por outro lado, percebeu-se um incremento de THD de tensão no PCC, o que sugere um futuro aperfeiçoamento do sistema de controle das tensões dos capacitores dos MMCs. Apesar da complexidade do sistema proposto, a utilização de inversores MMC é atrativa por apresentar algumas vantagens, conforme já apontadas em Ghetti (2012), referidas à redução de componentes passivos e menores perdas de condução nas chaves semicondutoras.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro concedido a um dos autores pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES.

REFERÊNCIAS

- IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2014.
- F. Ghetti, A. A. Ferreira, H.A.C Braga and P.G. Barbosa A study of shunt active power filter based on modular multilevel converter (MMC). *2012 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications*, pages 1–6, 2012.
- Procedimentos de Distribuição Módulo 8–Qualidade da energia elétrica *Agência Nacional de Energia Elétrica–ANEEL*, 2022.
- G.C.Baumann and J.A. Santistebam Comparação de desempenhos de um Inversor Convencional e o de um Inversor Multinível na Filtragem Ativa Monofásica. *14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, pages 401–408, 2021.
- G. S. Neves and J.A. Santistebam A comparison between two single-phase static compensator methodologies—PQ theory and state feedback. *Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*, pages 1–6, 2018.
- H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. *IEEE Transactions on industry applications* ,no. 3, pages 625–630, 1984.
- H. Akagi, E.H Watanabe and M. Aredes. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. *John Wiley & Sons*, 2017.
- R.C.A. Carvalho. Análise de filtro ativo Shunt utilizando conversor Modular Multinível. *Universidade Federal do Rio de Janeiro*, 2014.
- C.M.Freitas Algumas Contribuições para Algoritmos de Controle de Filtros Ativos e Híbridos Conectados em Paralelo com Redes Elétricas Trifásicas a 3 ou a 4 Fios. *Universidade do Estado do Rio de Janeiro*, 2014.
- CORZINE, K. A. A hysteresis current-regulated control for multi-level drives *IEEE Transactions on Energy Conversion* vol. 15, no. 2, pp. 169-175, June 2000, doi: 10.1109/60.866995;
- K. Ogata and B. Severo. Engenharia de controle moderno. *Editora LTC*, 2011.
kathushiko2011engenharia, title=Engenharia de controle moderno. 5^o edição, author=Kathushiko, OGATA, journal=Editora LTC, year=2011