

ESTUDO E SIMULAÇÃO DE TÉCNICAS DE BALANCEAMENTO "SENSORLESS" PARA CONVERSORES MODULARES MULTINÍVEIS

Arthur Sacramento Pamplona¹ (IC), Wilson Cesar Sant'Ana (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá.

Palavras-chave: Eletrônica de Potência, Conversores Multiníveis, Modulação PWM, Open Source, Simulação Computacional.

Introdução

Em Rodriguez et al. (2002) é apresentada uma revisão de literatura sobre conversores multiníveis. Um conversor multinível pode ser entendido como um arranjo em série de chaves semicondutoras (IGBTs, MOSFETs, etc.) e capacitores, de forma que a tensão de saída seja a soma das tensões em cada estágio. Desta forma, podem ser obtidas altas tensões de saída utilizando chaves semicondutoras de baixa tensão - resultando em dv/dt reduzido nos chaveamentos e menores perdas por chaveamento (Poorfakhraei et al., 2021). Dentre as topologias multiníveis, as modulares como a CHB (cascata de pontes H) e a MMC (Modular Multilevel Converter) apresentam a vantagem de poderem atingir um número altíssimo de níveis pela simples repetição em série do número de submódulos. Exemplos de aplicação para ambas as topologias são apresentados em Sant'Ana et al. (2021).

Apesar das vantagens, as topologias multiníveis modulares, por terem seus submódulos conectados em série, estão susceptíveis a apresentar um desbalanço de tensão em seus capacitores DC. Visando o balanço das tensões dos submódulos, a literatura apresenta diferentes técnicas, normalmente necessitando de medidas da tensão em cada um dos capacitores dos submódulos - o que torna essas técnicas computacionalmente complicadas e inviáveis economicamente quando o número de submódulos é alto. Visando eliminar a necessidade de medições nos capacitores dos submódulos, técnicas "sensorless" estão sendo pesquisadas. Basicamente, a ideia é expor todos os submódulos às mesmas condições de carga, resultando em tensões nos capacitores balanceadas.

Em Elserougi et al. (2014) é apresentada uma técnica de balanceamento de tensão dos capacitores em MMC's sem o uso de sensores. A técnica proposta visa realizar esse controle de forma eficiente, sem a necessidade de sensores adicionais para medir diretamente as tensões dos capacitores, o que pode reduzir custos e aumentar a confiabilidade do sistema. O

método é investigado através de simulações e é avaliado seu desempenho em termos de manutenção da estabilidade do sistema e da tensão dos capacitores dentro de limites aceitáveis. A abordagem é testada e validada com resultados que mostram que o balanceamento de tensão é atingido de forma eficaz, contribuindo para a viabilidade da implementação prática de MMCs em aplicações industriais.

Já em Elserougi et al. (2016), o mesmo autor aborda o desenvolvimento de um gerador de pulsos de alta tensão bipolar baseado em MMC, utilizando uma técnica de balanceamento de tensão nos capacitores sem o uso de sensores. O foco do trabalho está na implementação de um sistema baseado em MMC para gerar esses pulsos de alta tensão com uma estrutura bipolar, o que permite a criação de tensões positivas e negativas de forma controlada. Um dos principais desafios desse tipo de sistema é o controle das tensões dos capacitores nos submódulos do conversor. A técnica proposta pelos autores resolve esse problema ao implementar um método de balanceamento sem a necessidade de sensores, o que simplifica o projeto e reduz custos. O artigo demonstra, por meio de simulações e resultados experimentais, que a técnica proposta consegue balancear eficientemente as tensões dos capacitores, garantindo o desempenho estável do gerador de pulsos.

Tanto em Elserougi et al. (2014) quanto em Elserougi et al. (2016) se propõe que os pulsos do modulador PWM sejam trocados entre os submódulos a cada ciclo da fundamental da tensão de saída. Dada sua simplicidade, essa será a técnica a ser utilizada neste trabalho.

Nesta iniciação científica, se trabalhou no uso dos softwares Open Source ngspice e Kicad como forma de realizar a simulação dos conversores multiníveis. Os sucessos e as dificuldades encontradas foram documentadas no relatório final (como forma de servir de material de referência para os alunos vindouros) e aqui são apresentados apenas os resultados mais relevantes.

Metodologia

Existem no mercado diversos softwares comerciais para simulação, sendo alguns deles próprios para simulação de conversores de eletrônica de potência (como o PSIM) ou simuladores muito mais completos e abrangentes (como o Matlab/Simulink). Entretanto, o custo de licença desses softwares é proibitivo para o grupo de pesquisas (e mesmo para empresas de pequeno e médio porte). Dessa forma, buscou-se por alternativas Open Source.

Uma das alternativas testadas nesse trabalho de iniciação científica foi o uso dos softwares Open Source ngspice e Kicad. Na realidade, o software que realiza a simulação é apenas o ngspice. O ngspice apenas realiza a simulação do circuito sob formato netlist. Essa netlist poderia ser escrita manualmente. Entretanto, dada a complexidade dos circuitos, é necessária alguma forma geração da netlist, com base no esquemático do circuito a ser simulado. Dessa forma, o software Kicad é utilizado para o desenho esquemático e conversão do esquemático em netlist, de forma que o ngspice possa simulá-lo.

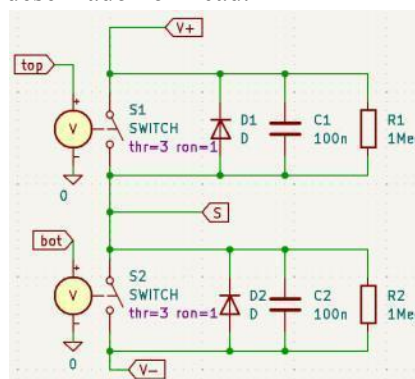
Diferentemente dos simuladores comerciais, as aplicações Open Source são quase sempre muito específicas para determinadas aplicações (por exemplo, o ngspice apenas simula e o Kicad apenas desenha - o que quase sempre requer o uso de diversos softwares menores para se obter o mesmo resultado de um único software comercial) e nem tão simples de se utilizar. Softwares como o Matlab/Simulink ou o PSIM possuem uma vasta gama de usuários e tutoriais diversos. Já o uso do ngspice é muito restrito e existe uma curva de aprendizado muito grande de forma a se conseguir os resultados esperados. Este trabalho se propôs a estudar os pormenores deste simulador e diminuir essa curva de aprendizagem aos alunos vindouros. A justificativa para a realização dessa pesquisa é diminuir a dependência em relação às ferramentas comerciais para simulação de conversores eletrônicos.

Foram utilizados os softwares Open Source Kicad (versão 8.99) e ngspice (versão 42), sob sistema operacional (também Open Source) Linux Ubuntu (versão 22.04). O discente aprendeu a converter circuitos esquemáticos do Kicad em arquivos netlist e sua reutilização em subcircuitos. Aprendeu o básico de modulação PWM. Foram feitos testes com chaves controladas, testes de inversores em meia ponte, ponte H, ponte H em cascata e MMC. Com base no conversor MMC com 3 SMs por braço, foram realizados os testes de balanceamento “sensorless” das tensões. Os principais resultados são apresentados a seguir.

Resultados e discussão

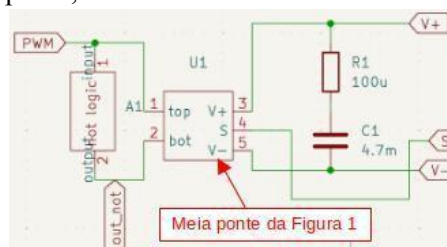
A Figura 1 apresenta o circuito esquemático de uma meia ponte (que será a célula básica do conversor multinível). Note-se que foram utilizadas chaves controladas (S1 e S2) ao invés de IGBTs ou MOSFETs. Foi feita uma tentativa com IGBTs/MOSFETs reais (com os respectivos gate-drivers), entretanto a simulação não apresentou bons resultados (inclusive o computador começava a travar, dada a complexidade). Deve-se ressaltar que o uso de chaves ideais é uma opção bastante utilizada no Matlab e no PSIM, portanto deu-se prosseguimento dessa forma. Os diodos D1 e D2 têm a função de oferecer um caminho para corrente reversa e, normalmente, IGBTs comerciais já têm esses diodos integrados. Já os capacitores C1 e C2 e os resistores R1 e R2 funcionam para amortecer as transições rápidas de tensão durante os chaveamentos.

Figura 1 – Circuito esquemático de uma meia ponte, desenhado no Kicad.



Com base na meia ponte da Figura 1, é criado um circuito de submódulo (SM), tal qual apresentado na Figura 2. Notar que existe um capacitor de valor 4,7mF (cujo valor pode ser alterado) para armazenamento de energia no SM. É a tensão sobre esses capacitores que será balanceada posteriormente.

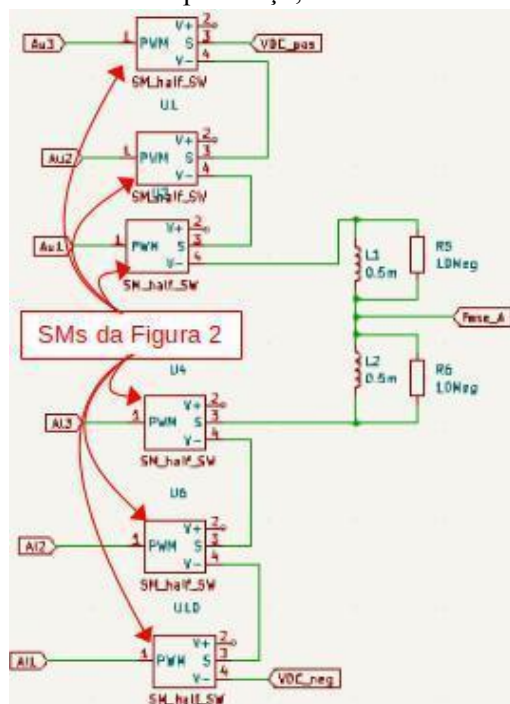
Figura 2 – Circuito esquemático de um SM em meia ponte, desenhado no Kicad.



Com base na repetição dos SMs da Figura 2, o conversor MMC é gerado, tal qual apresentado na

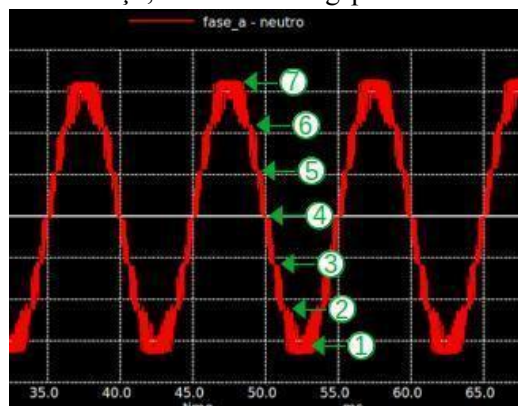
Figura 3. Nesse conversor da Figura 3, foram utilizados 3 SMs no braço superior e 3 SMs no braço inferior. Com $N=3$ SMs por braço, e com a modulação PWM apropriada, espera-se uma tensão de saída com 7 níveis ($2*N+1$). Nesse caso, com $N=3$, as defasagens para as portadoras precisam ser: 0° em Au1 e em Al1, 120° em Au2 e em Al2 e 240° em Au3 e em Al3.

Figura 3 – Circuito esquemático de um conversor MMC com N=3 SMs por braço, desenhado no Kicad.



A Figura 4 apresenta o resultado de simulação no ngspice para um conversor MMC monofásico com 3 SMs por braço (da Figura 3), gerando 7 níveis de tensão na saída.

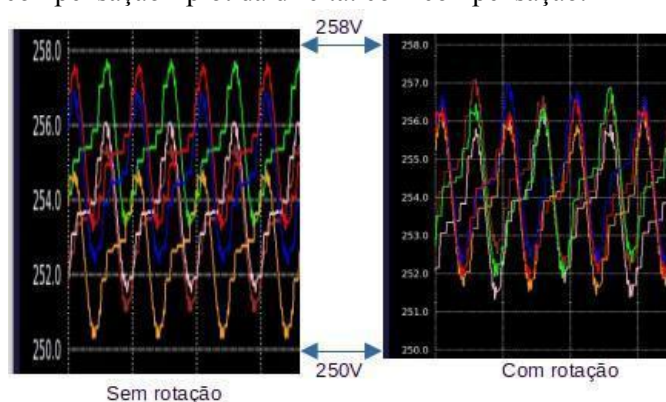
Figura 4 – Tensão de saída do conversor MMC com 3SMs/braço, simulada no ngspice.



Parte do objetivo deste trabalho é, além da simulação de conversores no software ngspice, contribuir com a pesquisa na área, realizando balanceamento “sensorless” das tensões nos capacitores dos SMs. Dessa forma, uma carga parasita foi intencionalmente colocada em paralelo com um dos capacitores de SM. Como se esperava, após um transitório inicial, as tensões dos capacitores se estabilizaram em valores diferentes uns dos outros (tal qual apresentado na parte esquerda da Figura 5). De forma a tentar balancear essas tensões (e de forma “sensorless”), foi implementada a técnica apresentada nos trabalhos de Elserougi et al. (2014 e 2016). Esta técnica consiste em uma rotação das portadoras a cada ciclo da fundamental. Os artigos não apresentam a forma prática como isso foi realizado pelos autores, mas conseguimos obter o mesmo efeito através do uso de multiplexadores (MUXes). Na entrada de cada PWM foi utilizado um MUX 3x1 (3 entradas, cada uma com uma das portadoras - 1 saída). A cada período de fundamental, os MUXes trocam as portadoras. Dessa forma em um período de fundamental, têm-se as defasagens: 0° em Au1 e em Al1, 120° em Au2 e em Al2 e 240° em Au3 e em Al3. Passado um período de fundamental, os MUXes irão trocar as portadoras: 120° em Au1 e em Al1, 240° em Au2 e em Al2 e 0° em Au3 e em Al3. Passado mais um período de fundamental, os MUXes irão trocar as portadoras novamente: 240° em Au1 e em Al1, 0° em Au2 e em Al2 e 120° em Au3 e em Al3. Passado mais um período de fundamental, o ciclo se repete.

A Figura 5 apresenta uma comparação das tensões nos capacitores sem (esquerda) e com (direita) rotação das portadoras - em ambos os casos havia a carga parasita instalada propositalmente em um dos SMs, visando forçar o desbalanço das tensões.

Figura 5 – Tensões nos capacitores dos SMs (com uma carga parasita instalada propositalmente em um deles), simulada no ngspice - plot da esquerda: sem compensação - plot da direita: com compensação.



Observa-se nitidamente que o caso com rotação apresenta menor variação (de 251V a 257V) contra o caso sem rotação (de 250V a 258V). Melhor do que isso: observa-se que não foi apenas a variação que reduziu com a rotação de portadoras - o valor médio das tensões tende a se equilibrar no caso com rotação (todas as ondas estão umas em cima das outras) - o que não ocorre no caso sem rotação de portadoras, onde o valor médio da tensão em verde está nitidamente maior do que o da tensão em laranja (por exemplo).

Obviamente, esses resultados precisam ser melhor investigados, e outras condições exploradas, mas entende-se que para um primeiro ano de trabalho de iniciação científica (considerando todas as limitações encontradas) os resultados foram satisfatórios.

Conclusões

Este trabalho apresentou resultados preliminares da compensação “sensorless” de desbalanço nas tensões de submódulos em conversores MMC. A técnica utilizada foi a rotação das portadoras na geração dos pulsos PWM. De forma a se obter esses resultados de forma segura (sem danificar SMs reais), foram realizadas simulações computacionais. Visando eliminar a dependência tecnológica de ferramentas de simulação comerciais (cujas licenças são proibitivas), este trabalho trilhou o caminho dos simuladores Open Source (Kicad para gerar arquivo netlist baseado em circuito esquemático e ngspice para a simulação em si).

Deve-se ressaltar que este foi um trabalho pioneiro no grupo de pesquisa com o simulador ngspice para simulação de conversores. Quando se utilizam softwares comerciais, tudo fica facilitado. No caso do simulador Open Source, houve uma curva de aprendizado bastante íngreme e diversas dificuldades apareceram - muitas foram solucionadas (às custas do tempo do cronograma) mas outras ainda ficaram sem solução: por exemplo, a simulação fica muito pesada e tende a travar o computador quando o tempo de simulação é grande.

Este trabalho agregou imensamente ao autor e lhe deu experiência sobre simuladores e desenvolvimento de circuitos com simuladores nas ferramentas utilizadas, algo extremamente importante na indústria em geral durante o desenvolvimento de um protótipo.

Agradecimentos

Não teria chegado até aqui sem o acompanhamento, trabalho e sabedoria do meu orientador, Prof. Wilson Sant’Ana, que, com toda paciência, me proporcionou conhecimento e amizade, mesmo diante das dificuldades. Agradeço também à minha avó, Maria Lúcia Nogueira do Sacramento, que, em um ano de tantas mudanças, desde o primeiro dia, criou um ambiente calmo e repleto do amor necessário para que eu pudesse trabalhar.

Além disso, não teria sido possível desenvolver esta pesquisa sem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).

Por fim, agradeço à Virgem Maria, que, através do seu “sim”, nos possibilitou conhecer o Evangelho.

Referências

Elserougi et al. (2014) A. Elserougi, M. I. Daoud, A. M. Massoud, A. S. Abdel-Khalik e S. Ahmed. Investigation of sensorless capacitor voltage balancing technique for modular multilevel converters. Em IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, páginas 1569–1574. doi: 10.1109/IECON.2014.7048711.

Elserougi et al. (2016) Ahmed A. Elserougi, Ahmed M. Massoud e Shehab Ahmed. Modular multilevel converter-based bipolar high-voltage pulse generator with sensorless capacitor voltage balancing technique. IEEE Transactions on Plasma Science, 44(7):1187–1194. doi: 10.1109/TPS.2016.2575861.

Poorfakhraei et al. (2021) Amirreza Poorfakhraei, Mehdi Narimani e Ali Emadi. A review of modulation and control techniques for multilevel inverters in traction applications. IEEE Access, 9:24187–24204. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3056612.

Rodriguez et al. (2002) Jose Rodriguez, Jih-Sheng Lai e Fang Z. Peng. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications. IEEE Transactions on industrial electronics, 49(4):724–738. doi: 10.1109/TIE.2002.801052.

Sant’Ana et al. (2021) Wilson C. Sant’Ana, Bruno R. Gama, Germano Lambert-Torres, Erik L. Bonaldi, Levy E. L. Oliveira, Frederico O. Assuncao, Daniel A. Arantes, Isac A. S. Areias, Luiz E. Borges-Da-Silva e Fabio M. Steiner. Development of a modular educational kit for research and teaching on power electronics and multilevel converters. IEEE Access, 9:127496–127514. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3112531.