REPRESENTAÇÃO DA TENSÃO DE SAÍDA DE UM INVERSOR ATRAVÉS DAS CÉLULAS UNITÁRIAS

Umberto Sampaio Madeiro Junior [1], Ranoyca Nayana Alencar Leão e Silva Aquino [2]

RESUMO

O seguinte projeto de pesquisa tem como objeto de estudo um inversor multinível híbrido simétrico de cinco níveis baseado nas topologias meia ponte e inversor com grampeamento ativo do neutro (HB-ANPC), propício para operações elétricas com alta tensão e alta potência, e sua finalidade justifica-se em representar a sua tensão de saída para diferentes técnicas de modulações existentes na área de eletrônica de potência, através de um método de representação gráfica denominada célula unitária. Os inversores são equipamentos com variadas aplicações no ramo de eletrônica de potência, destacando-se o seu uso para a utilização em sistemas de média e alta potência, como por exemplo o acionamento de motores em corrente alternada, compensação reativa, atividades essenciais para grandes consumidores de energia e que exigem métodos eficientes de qualidade de energia em seus processos. Nestes casos, os equipamentos causam maiores esforços nos semicondutores, assim como a inevitabilidade de agregar maior qualidade de energia com a redução do conteúdo harmônico (BRÜCKNER, 2005). A célula é formulada através das funções que descrevem o comportamento das formas de ondas das portadoras e moduladora. As portadoras e moduladoras, por sua vez, são responsáveis pela modulação da tensão de saída do inversor, aproximando assim uma tensão contínua de entrada (CC) a um comportamento senoidal na saída do sistema (CA). De posse das equações que descrevem as portadoras e moduladoras, é possível formular a célula unitária com as manipulações matemáticas detalhadas no trabalho. Nesta pesquisa executou-se as simulações dos circuitos eletrônicos a fim de se obter os níveis de tensão em pontos específicos para a obtenção dos resultados desejados. Com ferramentas de simulação, o software PSIM mais especificamente, é possível recriar as condições de funcionamento do inversor e atestar os fundamentos teóricos comparando os resultados alcançados com os demonstrados no programa.

Palavras-chave:

Inversor. Célula Unitária. Modulação.

[1] UNILAB, IEDS, Discente, e-mail: jr.umberto@gmail.com
[2] UNILAB, IEDS, Docente, e-mail: ranoyca@unilab.edu.br

INTRODUÇÃO

Os sistemas inversores multiníveis são objetos de inúmeros estudos, apresentando-se como uma área ampla para pesquisas, uma vez que possuem inúmeras topologias, havendo inclusive a possibilidade de combinações entre si para as mais diversas aplicações. Outro fator que justifica o crescimento deste ramo de estudo são as diferentes propostas de modulações já conhecidas, estimulando uma constante busca para a melhor opção para cada topologia, assim como o desenvolvimento de novas técnicas de modulação. Em suma, a motivação norteadora desses estudos são o aprimoramento das tecnologias existentes, aperfeiçoamento das topologias, melhoramento nos índices de distorções harmônicas, estratégias de modulação, balanceamento da tensão nos capacitores e no barramento de comutação e a redução da ondulação de corrente (KSAZRAEI, 2012).

1. TOPOLOGIA

Como evidenciado em sua denominação (HB-ANPC) e apresentado na figura 1, a topologia do inversor proposto é do tipo híbrido, ou seja, trata-se da junção de duas topologias já difundidas, meia ponte (Half Bridge - HB) conforme a figura 2, e com grampeamento ativo do neutro (ANPC), demonstrado na figura 3. A topologia ANPC contribui para uma melhor distribuição das perdas nos semicondutores, enquanto que a parte HB permite atingir os 5 níveis de tensão desejado.
Essa topologia permite a comutação dos semicondutores em baixa frequência, fator este contribuinte para a redução de perdas por comutação.
Apresenta como vantagens alimentação por barramento único para cada fase, redução do numero de semicondutores conduzindo no mesmo instante, flexibilidade para a implementação de diferentes modulações de alto desempenho, ainda que tais implementações sejam relativamente dificultosas de se desenvolver.
Figrua 1: Topologia do inversor proposto (HB-ANPC).

Fonte: Silva, 2012.
Figrua 2: Topologia do inversor com grampeamento ativo do neutro (ANPC).

Fonte: Silva, 2012.
Figrua 3: Topologia do inversor em Meia Ponte (Half Bridge - HB)

Fonte: Silva, 2012.

2. TÉCNICAS DE MODULAÇÕES

A implementação de modulações para um inversor híbrido multiníveis é parte essencial para o seu funcionamento de forma eficiente, apresentando-se como um desafio à parte em seu desenvolvimento e implementação. A literatura conta com uma vasta lista de opções de técnicas, e assim como as topologias, umas podem ser originadas a partir de outras, como também haver combinações. O trabalho tomado como referência para esta pesquisa apresenta uma modulação derivada da PD-PWM (figura 4), contando com duas fontes de sinais triangulares como portadoras em alta frequência e um sinal de referência cossenoidal deslocado em baixa frequência (moduladora).
Figura 4: Modulação derivada da PD-PWM.

Fonte: Elaborado pelo autor.
Já a técnica de modulação apresentada neste trabalho é a própria PD-PWM (figura 6), contendo 4 sinais triangulares portadores e um sinal cossenoidal como moduladora. Essa opção exigiu uma análise minuciosa em todo o circuito lógico modulante para o sucesso de sua implementação no inversor proposto.
Figura 6: Modulação PD-PWM implementada.

Fonte: Holmes, 2009.

METODOLOGIA

Foram reproduzidas as técnicas utilizadas em trabalho anterior, permitindo assim: a obtenção dos resultados, familiarização com o conteúdo necessário para o entendimento das atividades, familiarização com softwares e demais ferramentas fundamentais para execução e alcance dos resultados esperados. Executou-se também plotagens das funções portadoras e moduladoras no software MATLAB separadamente, e posteriormente a junção das plotagens para cada técnica diferente. Este passo contribui para a visualização, ajustes e definição das funções utilizadas para a reprodução da célula unitária utilizada para a modulação derivada da PD-PWM, e posteriores ajustes para a formulação da segunda célula para a segunda modulação PD-PWM, proposta e implementada neste estudo.
Determinou-se as funções portadoras e moduladoras, bem como seus intervalos de análise através do software MATHCAD. O software tem uma interface simples de trabalho e facilita as manipulações para a determinação de cada função da nova portadora.
Os equacionamentos das funções que descrevem as portadoras e moduladoras foram realizadas através de manipulações matemáticas para se obter as expressões que descrevem cada curva de nível que compõe a célula unitária e seus limites de integração no eixo "y". Após as devidas manipulações, formulou-se a célula unitária com a plotagem simultânea das equações alcançadas no software MatLab.
Para o desenvolvimento do circuito lógico modulador foi necessário o desenvolvimento de uma tabela lógica, permitindo assim a dispor as portas lógicas de forma a atender às condições de funcionamento do inversor para a técnica proposta. Exigiu-se ainda análises minuciosas em cada trecho do circuito, a fim de se observar o comportamento da onda de saída a cada modificação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante os estudos foram realizadas tentativas de implementação de algumas técnicas de modulação para o Inversor. No entanto, o mesmo circuito demonstrou ser sensível a essas variações de modulação, de forma que a cada alteração para modulações semelhantes à implementada, ocasionasse assimetria e formas de onda da tensão de saída incoerentes, exigindo uma análise complexa da lógica de acionamento para cada nova implementação, uma vez que o inversor conta com 8 chaves, sendo 4 em alta frequência (1020 Hz) e 4 em baixa frequência (60 Hz). A combinação de acionamento e desligamento dessas chaves de forma controlada, a impossibilidade de repetição de acionamento de uma ou mais das chaves de alta frequência no decorrer de um ciclo completo da tensão de referência, e a comparação das mesmas com os sinais de baixa frequência, apresentaram-se como as maiores dificuldades para implementação de diferentes modulações para o inversor, sobre tudo nas transições dos níveis de metade da tensão do barramento (ciclo positivo e negativo) para o nível zero de tensão, demandando um tempo considerável para essas análises. Assim sendo, o seguinte tópico abordará os resultados da modulação implementada com sucesso no inversor e representada na figura 6, a modulação com portadoras dispostas em fase (PD-PWM).

Definida a modulação a ser utilizada, deve-se então comprovar o seu funcionamento no inversor. Para tal validação é simulado o circuito equivalente do inversor, bem como o circuito lógico para a modulação (Figura 7).

Figura 7: Inversor HB-ANPC e circuito lógico.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise da tensão de saída é o ponto crucial para atestar o funcionamento do inversor sob determinada

técnica de modulação. Deve-se observar os níveis de tensão alcançados e também a simetria entre o semiciclo positivo e semiciclo negativo da curva. Após os ajustes inerentes à implementação de uma técnica de modulação a inversores, observou-se o alcance de um comportamento satisfatório para o sistema (Figura 8), permitindo então fazer a análise teórica para a obtenção da célula unitária para esta modulação.

Figura 8: Tensão de saída no inversor multinivel sob a modulação PD-PWM proposta.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise do comportamento gráfico da tensão de saída obtido via simulação no PSIM permite então prosseguir para a obtenção da célula unitária, a qual apresentará uma aproximação gráfica da simulada. Definida as funções que descrevem as curvas das portadoras, que totalizam 8 funções, e da moduladora, iguala-se cada função portadora com a moduladora, isola-se a variável dada pelo produto da frequência angular pelo tempo. Desta forma, resultará em 8 novas funções que quando plotadas simultaneamente representam as curvas de nível de tensão da célula unitária, demonstrada na figura 9.

Figura 9: Célula unitária.



Fonte: Holmes, 2009.

A próxima etapa consiste em dispor a célula unitária 17 vezes (Figura 10), pois a frequência das portadoras é 17 vezes maior do que o sinal de referência, e determinar a tensão de saída para o inversor pelo método proposto pela pesquisa, conforme os procedimentos explanados na literatura e adotados no período de pesquisa, e em seguida compará-la com a tensão de saída do inversor simulada no PSIM, atestando sua aproximação do valor teórico com o real.

Figura 10: Representação da tensão de saída para o inversor multinível pelo método da célula unitária.



Fonte: Próprio autor.
Conforme análise comparatória das imagens 8 e 10, comprovou-se a validação do método para a modulação proposta.

CONCLUSÕES

As discussões contidas neste trabalho são frutos de uma pesquisa de um período de um ano, aliando estudos matemáticos sobre as funções que compõe um sistema de modulação e simulações dos circuitos operando em condições aproximadas às reais. Foram realizadas inúmeras tentativas de experimentos com novas modulações. No entanto, por razões diversas, algumas foram sendo descartadas pela alta complexidade de implementação, fator natural à natureza da pesquisa e dos circuitos utilizados. Dentre as técnicas de modulações adotadas, obteve-se exito com a técnica de modulação de disposição de fases das portadoras (PD-PWM), onde que, apesar da semelhança designativa entre esta e a modulação original do inversor (derivada da PD-PWM), essas são bem distintas, exigindo uma reanalise inteira do circuito lógico e nova elaboração da célula unitária. Os parametros deste estudo, em relação ao material adotado como base, foram mantidos, concluindo-se então que uma nova técnica de modulação poderia ser adotada para o mesmo inversor, sem a necessidade de redimensionamento dos barramentos, fontes e interruptores.

AGRADECIMENTOS

PIBIC/UNILAB/CNPq

REFERÊNCIAS

SILVA, R. N. A. L. Inversor multinível híbrido simétrico trifásico de cinco níveis baseado nas topologias half-bridge e ANPC. 2013.
125 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de
Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza. 2013.
BATSCHAUER, A. L. Inversor multiníveis híbrido trifásico baseado em módulos meia-ponte. 2011. Tese (Doutorado em
Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica,
Florianópolis. 2011.
JOCA, D. R. Técnica de modulação para redução de DHT em inversor multinível com capacitor flutuante de três níveis.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.
HOLMES, D. G.; LIPO, T. A. Pulse width modulation for power converters – principles and practice. United States of America:
Wiley-IEEE Press, 1ª Edição, 2003.
BAKER, R. H., Switching circuit, U. S. Patent nº 4 210 826, to Exxon Research & Engineering Co., 1980.
RASHID, M. H. Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações, São Paulo: Makron Books, 1ª Edição, 1999.