

Sistema Modular de Conversão de Energia Aplicado a Acionamento de Máquinas Elétricas com Terminais de Enrolamentos Abertos

Orientador: Italo Roger Ferreira Moreno Pinheiro da Silva

1. Introdução

As topologias modulares de conversores multiníveis têm atraído grande interesse nos diversos segmentos de aplicações no contexto do processamento de energia (e.g., geração, transmissão, distribuição, tração elétrica e indústria), devido a capacidade de processar grandes quantidades de energia a partir de subsistemas de potência menor. Conversores multiníveis modulares (do inglês *modular multilevel converters* – MMCs) são compostos a partir da associação série ou paralela de submódulos (SMs) – células básicas de chaveamento configuradas, geralmente, em meia ponte e ponte completa conectadas a capacitores flutuantes utilizando chaves de potência de tecnologia consolidada e alta disponibilidade no mercado. Desde que idênticos, os SMs possuem mesma potência nominal e podem ser vistos como células de potência controladas pelas mesmas estratégias de controle e modulação. Na Figura 1, ilustra-se a topologia de MMC cujos SMs são configurados em meia ponte.

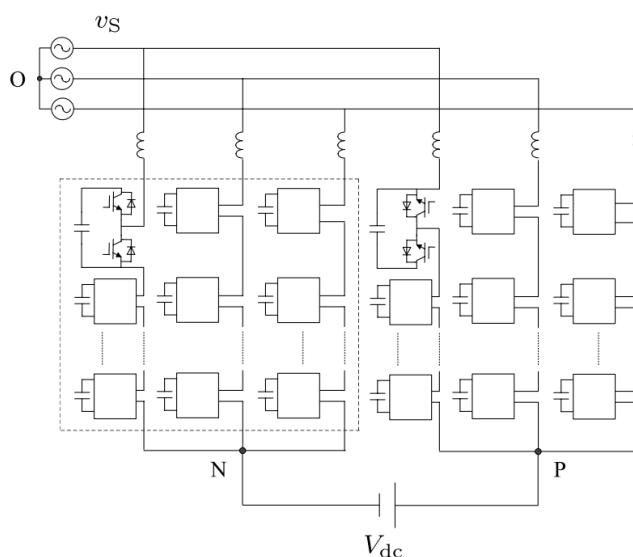


Figura 1. Topologia de MMC que utiliza SMs em meia ponte. Fonte: (AKAGI, 2017).

A depender do número de SMs, MMCs podem reproduzir um elevado número de níveis de tensão com expressiva redução na frequência de chaveamento sem comprometer a qualidade das formas de onda de saída. Obviamente, há um compromisso com o número de componentes das topologias modulares em relação a outras topologias multiníveis, o que pode elevar o custo inicial do projeto de um conversor. Todavia, em função do baixo custo operacional e de manutenção, MMCs têm-se mostrado economicamente viáveis em sistemas de transmissão de energia elétrica em corrente contínua (CC) (AHMED et al., 2012; GEMMELL et al., 2008), bem como competitivos para acionamentos de máquinas elétricas (KOURO et al., 2012; OKAZAKI et al., 2017).

No contexto de acionamento de máquinas elétricas, diversos sistemas multiníveis de conversão de energia têm sido propostos para acionamento de máquinas elétricas com terminais de enrolamentos abertos (do inglês *open-end windings* – OEW). Na configuração OEW, os enrolamentos do estator permitem a conexão de inversores (sejam convencionais, sejam multiníveis) em ambos os lados dos terminais da máquina. Esse tipo de configuração é bastante usual em motores de indução trifásicos, em que os enrolamentos estatóricos são projetados de modo a permitir o acionamento em delta ou estrela.

Em um sistema de acionamento OEW, cada inversor pode ser alimentado por uma fonte CC isolada, cuja tensão nominal é a metade da requerida por um sistema de acionamento tradicional, e.g., motor em estrela acionado por um único inversor. Desse modo, a associação série de inversores concede ao sistema uma capacidade de tolerância a faltas em virtude da redundância de inversores, sem mencionar que a qualidade da forma de onda de saída é superior. Com relação aos barramentos CC, a distribuição de tensão pode ser assimétrica (CORZINE; LU; FIKSE, 2006; DIXON et al., 2007; PEREDA; DIXON, 2011; REDDY; SOMASEKHAR, 2013) ou simétrica (JACOBINA et al., 2015; KALAISELVI; SRINIVAS, 2015; SILVA et al.,

2017). Sob esse aspecto, os inversores também podem compartilhar o mesmo barramento CC (EDPUGANTI; RATHORE, 2017; WU et al., 2016).

Em um cenário assimétrico, o número de níveis de tensão pode ser maximizado utilizando os estados de chaveamento para gerar níveis intermediários. Cada barramento CC pode ser alimentado por fontes CC isoladas (DIXON et al., 2007; PEREDA; DIXON, 2011; REDDY; SOMASEKHAR, 2013), mas também há a possibilidade do sistema operar com um barramento CC flutuante (CORZINE; LU; FIKSE, 2006). Se por um lado a operação com um barramento CC flutuante reduz o número de fontes CC isoladas, por outro, o valor máximo do índice de modulação é restrito para manter o balanço de tensão do capacitor flutuante. Em um cenário simétrico, o número de estados redundantes disponíveis é maior que em um cenário assimétrico, podendo ser utilizados para i) equilibrar tensões de capacitores CC em topologias multiníveis e ii) minimizar correntes de fugas e outros efeitos indesejáveis resultantes de um chaveamento em alta frequência.

Neste contexto, um ponto relevante é a tensão de modo comum, que se não minimizada, gera corrente nos rolamentos e tensão no eixo do motor, diminuindo a vida útil e comprometendo o desempenho ótimo da máquina (KALAISELVI; SRINIVAS, 2015). Em princípio, a tensão de modo comum é determinada pela combinação das tensões de polo do inversor e, conforme demonstrado por (WANG, 2000), a tensão gerada no eixo do motor é o reflexo da tensão de modo comum. No caso de sistemas de acionamento OEW, em que há dois inversores, duas componentes podem ser definidas a partir das tensões de modo comum individuais (i.e., de cada inversor): i) tensão de modo comum (resultante) e ii) tensão de modo diferencial. A primeira compreende a soma das tensões de modo comum individuais, enquanto a segunda compreende a diferença das mesmas. Além disso, tanto a tensão de modo comum e como a tensão de modo diferencial estão relacionados na forma com que os barramentos CC se encontram conectados, ou seja, se são separados ou compartilhados.

No caso de compartilhamento do barramento CC, elevadas correntes de sequência zero podem circular em um caminho de baixa impedância formado entre os terminais (positivo ou negativo) e o ponto central do barramento, levando à distorção das correntes de fase do motor. Essas correntes estão associadas à tensão de modo diferencial, mas podem ser suprimidas a partir da estratégia de modulação (EDPUGANTI; RATHORE, 2017; WU et al., 2016). No caso de barramentos CC separados, esse caminho de baixa impedância não existe, no entanto, é importante considerar a tensão de modo comum na implementação da estratégia de modulação, sejam os barramentos CC separados ou compartilhados.

Sob a perspectiva da estratégia modulação, vale destacar que a seleção ótima dos estados de chaveamento redundantes é uma solução para supressão, até eliminação, da tensão de modo comum, a qual também pode ser controlada por meio de um fator de distribuição de tensão. A utilização desse fator é recurso bastante utilizado para melhoria das formas de onda das tensões de fase, sendo determinado em função dos graus de liberdade do sistema, conforme avaliado em (JACOBINA et al., 2015; SILVA et al., 2017).

Apesar de proeminente no acionamento de máquinas elétricas, MMCs têm encontrado desafios no que concerne o aumento da magnitude das oscilações de tensão nos capacitores flutuantes em função da frequência de operação da máquina, principalmente, em aplicações que demandam conjugado constante e baixa velocidade. Em vista disso, associações série (como no caso da configuração OEW) ou paralela de conversores podem ser uma alternativa viável para sistemas de acionamento baseados em MMCs. Dessa forma, é possível conciliar a capacidade de tolerância a faltas e alta qualidade nas formas de onda de saída sob operação em uma larga faixa de frequência com os benefícios dos MMCs.

2. Objetivos

2.1 Geral

- Propor e avaliar um sistema modular de conversão de energia baseado em MMCs para acionamento OEW de máquinas elétricas.

2.1 Específicos

- Estudar o sistema proposto em um cenário flexível, com possibilidade de alternância da configuração (série ou paralela) dos inversores conforme a velocidade de operação da máquina (alta ou baixa);
- Avaliar o sistema proposto com barramentos CC separados e assimétricos e investigar os diversos cenários em razão dos valores do fator de distribuição de tensão entre os inversores;
- Avaliar o sistema proposto com um barramento CC flutuante, logo, definir uma estratégia de controle do fator de distribuição de tensão entre os inversores e implementar estratégia de modulação adequada;

- Incluir, na estratégia de modulação, a capacidade de eliminação da tensão de modo comum nos cenários propostos.

3. Metodologia

Em termos gerais, este projeto será desenvolvido seguindo interativamente os seguintes procedimentos: pesquisa e análise dos trabalhos bibliográficos no tema; identificação dos aspectos dos sistemas a serem melhorados (i.e., identificação do problema); elaboração de propostas de melhoramento (i.e., elaboração de soluções); desenvolvimento de modelos dinâmicos e de regime permanente; avaliação por simulação *offline* do sistema proposto; implementação prática do sistema em laboratório e realização de testes; documentação e elaboração de relatórios e artigos para divulgação e repasse do estudo desenvolvido.

O período de execução deste projeto é de 24 meses. As atividades desenvolvidas para cada etapa do projeto são descritas a seguir, como também apresentadas por meio de um cronograma de atividades apresentado na seção 6. Ao longo de todo o projeto, serão realizadas as seguintes etapas:

- Revisão bibliográfica: visa realizar uma avaliação do estado da arte que venha permitir a definição das topologias para o sistema de acionamento que interessa ao projeto e que deverá ser estudado nas etapas seguintes.
- Simulação: visa avaliar quantitativa e qualitativamente os trabalhos da revisão bibliográfica. As simulações serão conduzidas a partir dos modelos dinâmicos discretos, seja utilizando *softwares* de simulação matemática (e.g., Matlab e PSIM) ou ambientes de desenvolvimento integrado (e.g., Dev-C++).
- Desenvolvimento de protótipo e testes experimentais: visa desenvolver uma unidade de controle e de potência para obtenção de resultados experimentais.
- Validação: visa validar o modelo matemático com dinâmicas em tempo real, a partir do protótipo experimental à medida que a montagem esteja concluída para validação dos estudos por simulação.
- Elaboração de artigos para congressos nacionais e internacionais, e redação de relatório do projeto.

4. Resultados Esperados

- Estudo das topologias de conversores e de estratégias modulação que sejam apropriadas para um sistema de acionamento OEW, visando a maximização da qualidade de energia aliada a um elevado rendimento;
- Modelo matemático do sistema proposto com resultados de simulação e validação experimental;
- Relatórios de pesquisa e publicações científicas em congressos e periódicos de qualidade reconhecida.

5. Aderência aos Critérios de Priorização

- Reserva de bolsas para Cursos Novos: o programa de pós-graduação em Engenharia Física (PPG-ENGFIS), vinculado à Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA – UFRPE), está iniciando suas atividades em 2019.1. O PPG-ENGFIS foi aprovado na 181ª reunião do CTC-CAPES em dezembro de 2018.
- Apoio diferenciado à pós-graduação em Engenharias: o projeto está vinculado ao programa de pós-graduação em Engenharia Física, sediado na UACSAUFRPE, pertencente à grande área de Materiais da CAPES.

6. Cronograma de Atividades

Atividades	1º Semestre	2º Semestre	3º Semestre	4º Semestre
Revisão bibliográfica	X	X	X	X
Disciplinas	X	X		
Simulação	X	X	X	
Desenvolvimento de protótipo e testes		X	X	

experimentais				
Validação		X	X	X
Análise dos resultados			X	X
Elaboração de artigos			X	X
Elaboração da Dissertação		X	X	X
Defesa da Dissertação				X

7. Referências Bibliográficas

AHMED, N. et al. **HVDC SuperGrids with modular multilevel converters — The power transmission backbone of the future**. International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices. **Anais...IEEE**, mar. 2012Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6198119/>>

CORZINE, K. A.; LU, S.; FIKSE, T. H. Distributed Control of Hybrid Motor Drives. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 21, n. 5, p. 1374–1384, set. 2006.

DIXON, J. et al. High-Power Machine Drive, Using Nonredundant 27-Level Inverters and Active Front End Rectifiers. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 22, n. 6, p. 2527–2533, nov. 2007.

EDPUGANTI, A.; RATHORE, A. K. Optimal Pulsewidth Modulation for Common-Mode Voltage Elimination Scheme of Medium-Voltage Modular Multilevel Converter-Fed Open-End Stator Winding Induction Motor Drives. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 64, n. 1, p. 848–856, jan. 2017.

GEMMELL, B. et al. **Prospects of multilevel VSC technologies for power transmission**. 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. **Anais...Chicago, IL: IEEE**, abr. 2008Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4517192/>>. Acesso em: 4 jul. 2013

JACOBINA, C. B. et al. Flexible Series/Parallel AC-DC-AC Motor Drive System. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 51, n. 1, p. 259–270, jan. 2015.

KALAISELVI, J.; SRINIVAS, S. Bearing Currents and Shaft Voltage Reduction in Dual-Inverter-Fed Open-End Winding Induction Motor With Reduced CMV PWM Methods. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 62, n. 1, p. 144–152, jan. 2015.

KOURO, S. et al. Powering the Future of Industry: High-Power Adjustable Speed Drive Topologies. **IEEE Industry Applications Magazine**, v. 18, n. 4, p. 26–39, jul. 2012.

OKAZAKI, Y. et al. Experimental Comparisons Between Modular Multilevel DSCC Inverters and TSBC Converters for Medium-Voltage Motor Drives. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 32, n. 3, p. 1805–1817, mar. 2017.

PEREDA, J.; DIXON, J. High-Frequency Link: A Solution for Using Only One DC Source in Asymmetric Cascaded Multilevel Inverters. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 58, n. 9, p. 3884–3892, set. 2011.

REDDY, B. V.; SOMASEKHAR, V. T. A Dual Inverter Fed Four-Level Open-End Winding Induction Motor Drive With a Nested Rectifier-Inverter. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 9, n. 2, p. 938–946, maio 2013.

SILVA, I. R. F. M. P. DA et al. Hybrid Modular Multilevel DSCC Inverter for Open-End Winding Induction Motor Drives. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 53, n. 2, p. 1232–1242, mar. 2017.

WANG, F. Motor shaft voltages and bearing currents and their reduction in multilevel medium-voltage PWM voltage-source-inverter drive applications. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 36, n. 5, p. 1336–1341, 2000.

WU, D. et al. A Dual Three-Level Inverter Based Open-end Winding Induction Motor Drive with Averaged Zero-Sequence Voltage Elimination and Neutral-Point Voltage Balance. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 63, n. 8, p. 4783–4795, ago. 2016.