v7.n11.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

ANÁLISE DE ESTABILIDADE E CONTROLE *GRID-FORMING* EM CONVERSORES *MMC-HVDC* PARA INTEGRAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS EM REDES ELÉTRICAS DE BAIXA INÉRCIA

STABILITY ANALYSIS AND GRID-FORMING CONTROL IN MMC-HVDC CONVERTERS FOR RENEWABLE ENERGY INTEGRATION INTO LOW-INERTIA ELECTRICAL GRIDS

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y CONTROL *GRID-FORMING* EN CONVERTIDORES *MMC-HVDC* PARA LA INTEGRACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES EN REDES ELÉCTRICAS DE BAJA INERCIA

Thiago Rafael de Oliveira[1], Ronaldo Gomes Figueira[2], Fabiana Florian[3]

e7119727
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i11.9727

PUBLICADO: 11/2026

RESUMO

Este trabalho analisa, por revisão bibliográfica e abordagem qualitativa, a aplicação de estratégias *Grid-Forming (GFM)* em conversores *MMC-HVDC* conectados a redes elétricas de baixa inércia. São discutidas as diferenças funcionais entre *Grid-Following (GFL), GFM* por estatismo (*droop*) e Máquina Síncrona Virtual *(VSM),* considerando a formação das referências de tensão e frequência, a resposta de potência ativa, a interação com a impedância da rede e a dinâmica energética dos submódulos. A metodologia não inclui simulações próprias concluídas no *MATLAB/Simulink* nem resultados experimentais. Os resultados consistem em uma síntese crítica da literatura e na proposição de cenários e indicadores para validação futura, incluindo frequência, *ROCOF*, tensão, potência e variáveis internas do *MMC*. Conclui-se que o *GFM* pode ampliar a contribuição do conversor ao suporte dinâmico, desde que sejam respeitados os limites de corrente, energia, potência e coordenação dos controles.

PALAVRAS-CHAVE: Baixa inércia. Controle de formação de rede. Estabilidade dinâmica. Fontes renováveis. Máquina síncrona virtual. Transmissão em corrente contínua em alta tensão.

ABSTRACT

This study analyzes, through a qualitative literature review, the application of Grid-Forming (GFM) strategies in MMC-HVDC converters connected to low-inertia power grids. It discusses the functional differences among Grid-Following (GFL), droop-based GFM, and the Virtual Synchronous Machine (VSM), considering voltage and frequency reference formation, active-power response, interaction with grid impedance, and the internal energy dynamics of MMC submodules. No original MATLAB/Simulink simulations or experimental results are presented. The results consist of a critical synthesis of the literature and a proposal of scenarios and indicators for future validation, including frequency, ROCOF, voltage, power, and internal MMC variables. GFM may increase the converter's contribution to dynamic grid support, provided that current, energy, power, and control-coordination limits are respected.

KEYWORDS: *Dynamic stability. Grid-forming control. High-voltage direct-current transmission. Low inertia. Renewable energy. Virtual synchronous machine.*

[1] Universidade de Araraquara (UNIARA), graduando em Engenharia Elétrica.
[2] Universidade de Araraquara (UNIARA), especialista em Engenharia Elétrica, ênfase no Sistema Elétrico de Potência (SEP).
[3] Universidade de Araraquara (UNIARA), pesquisadora nas áreas de Ciências Econômicas, Administração e metodologia, além de coordenar e orientar Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

RESUMEN
Este trabajo analiza, mediante una revisión bibliográfica cualitativa, la aplicación de estrategias Grid-Forming (GFM) en convertidores MMC-HVDC conectados a redes eléctricas de baja inercia. Se examinan las diferencias funcionales entre Grid-Following (GFL), GFM por estatismo (droop) y Máquina Síncrona Virtual (VSM), considerando la formación de referencias de tensión y frecuencia, la respuesta de potencia activa, la interacción con la impedancia de red y la dinámica energética interna de los submódulos. No se presentan simulaciones propias concluidas en MATLAB/Simulink ni resultados experimentales. Los resultados consisten en una síntesis crítica de la literatura y en la propuesta de escenarios e indicadores para una validación futura, incluidos frecuencia, ROCOF, tensión, potencia y variables internas del MMC. Se concluye que el GFM puede ampliar la contribución del convertidor al soporte dinámico, siempre que se respeten los límites de corriente, energía, potencia y coordinación de los controles.

PALABRAS CLAVE: *MMC-HVDC. Grid-Forming. Baja inercia. Estabilidad de sistemas eléctricos. Máquina síncrona virtual.*

INTRODUÇÃO

A expansão das fontes renováveis conectadas por conversores eletrônicos altera a dinâmica dos sistemas elétricos de potência. À medida que unidades síncronas são substituídas ou deslocadas na composição da geração, diminui a parcela de energia cinética diretamente acoplada à frequência da rede. Em consequência, após um desequilíbrio entre geração e demanda, a frequência pode apresentar maior taxa inicial de variação e exigir respostas mais rápidas dos controles e dos recursos de suporte. Esse efeito não deve ser atribuído exclusivamente à redução da inércia: a intensidade e a evolução da perturbação também dependem da reserva de potência, da resposta das cargas, dos reguladores e da topologia do sistema (KUNDUR, 1994; LOURENÇO *et al.*, 2021).

A redução da inércia eletromecânica não significa, isoladamente, que todo sistema com alta participação renovável seja instável. O risco depende da combinação entre baixa inércia, força elétrica do ponto de conexão, controles dos conversores, disponibilidade de potência e características da perturbação. Por isso, a avaliação deve distinguir estabilidade de frequência, estabilidade de tensão e interações de controle, evitando tratar esses fenômenos como um único problema.

Os sistemas de transmissão em corrente contínua de alta tensão baseados em conversores modulares multiníveis (*MMC-HVDC*) são relevantes para a integração de geração renovável, inclusive em conexões de longa distância e em sistemas CA com características distintas. A topologia MMC utiliza submódulos em série nos braços do conversor, permitindo sintetizar tensões multiníveis e controlar o intercâmbio de potência entre os lados CA e CC.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Entretanto, sua dinâmica não se limita ao controle da potência entregue à rede: correntes circulantes, energia armazenada nos capacitores, equilíbrio das tensões dos submódulos e coordenação entre os terminais também condicionam a operação (DEBNATH *et al.*, 2015; RAJU *et al.*, 2019).

Diante desse cenário, estratégias *Grid-Forming* (GFM) vêm sendo estudadas para permitir que conversores estabeleçam referências internas de tensão e frequência e participem ativamente do suporte à rede. Essa característica distingue o GFM do controle *Grid-Following* (GFL), que normalmente acompanha a tensão existente no ponto de conexão para sincronizar e injetar correntes controladas. A capacidade de formar referência, contudo, não equivale a uma fonte ideal: a resposta do GFM permanece limitada pela corrente máxima, pela potência disponível, pela energia interna e pela coordenação com os demais controles (LOURENÇO *et al.*, 2021).

O objetivo geral é analisar, com base na literatura técnico-científica, as condições em que estratégias *Grid-Forming* aplicadas a conversores *MMC-HVDC* podem contribuir para a estabilidade de redes elétricas de baixa inércia, considerando as interações entre controles externos, dinâmica interna do conversor e características da rede.

Para alcançar esse objetivo, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

Caracterizar a topologia *MMC-HVDC* e as variáveis internas relevantes à sua operação, incluindo correntes de braço e energia dos submódulos.

Discutir os efeitos da redução da inércia sobre a resposta de frequência e a taxa de variação da frequência (*Rate of Change of Frequency - ROCOF*).

Examinar a relação potencial entre o suporte dinâmico do GFM e a atuação do Esquema Regional de Alívio de Carga (ERAC), sem pressupor substituição das funções de proteção.

Comparar conceitualmente GFL, GFM por estatismo e VSM, identificando limitações e requisitos para validação computacional.

Organizar cenários e indicadores que permitam, em etapa futura, comparar as estratégias sob condições iniciais e perturbações equivalentes (KUNDUR, 1994; LOURENÇO *et al.*, 2021).

A redução da inércia nos sistemas elétricos representa um dos principais desafios técnicos associados à transição energética. Redes com alta penetração de conversores eletrônicos apresentam maior suscetibilidade a variações de frequência e oscilações eletromagnéticas (KUNDUR, 1994; LOURENÇO *et al.*, 2021).

A avaliação da estabilidade de conversores *MMC-HVDC* sob estratégias *grid-forming* torna-se relevante tanto do ponto de vista científico quanto tecnológico, pois contribui para o

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

desenvolvimento de soluções que assegurem maior robustez operacional em sistemas com elevada participação de fontes renováveis (LOURENÇO *et al.*, 2021; RAJU *et al.*, 2019).

Diante desse contexto, formula-se a seguinte questão de pesquisa: em quais condições de rede e de operação as estratégias GFM aplicadas a conversores *MMC-HVDC* podem oferecer suporte relevante à estabilidade de frequência e tensão, sem comprometer o balanço energético interno e os limites operacionais do conversor?

A hipótese de trabalho é que estratégias GFM adequadamente parametrizadas podem ampliar a contribuição do *MMC-HVDC* ao suporte dinâmico de tensão e frequência. Essa contribuição, entretanto, depende da margem de potência, dos limites de corrente, da energia disponível nos submódulos, da força da rede e da interação entre os controles dos terminais CA e CC. A hipótese é discutida com base na literatura e não é apresentada como resultado experimental ou computacional próprio (LOURENÇO *et al.*, 2021).

A operação GFM pode dispensar a dependência de uma malha de captura de fase (Phase Locked Loop – PLL) para formar a referência interna de fase, mas a estabilidade resultante depende da estrutura de controle, da impedância da rede e dos limites do conversor. O balanço de energia dos capacitores dos submódulos também deve ser considerado (DEBNATH *et al.*, 2015; SAAD *et al.*, 2014).

A pesquisa adota abordagem bibliográfica, qualitativa e exploratória. O escopo e os procedimentos de análise são detalhados na seção de metodologia; não são apresentados ensaios experimentais, simulações próprias concluídas ou dados operacionais de uma instalação específica.

Foi realizada avaliação bibliográfica da modelagem dinâmica dos conversores e das estratégias de controle utilizadas em sistemas modernos de potência. Foram definidos cenários operacionais para uma futura avaliação computacional, considerando perturbações na rede elétrica e variações das condições de operação. A comparação quantitativa desses cenários dependerá da execução e validação do modelo no *MATLAB/Simulink*.

As informações da literatura foram organizadas segundo variáveis relevantes à estabilidade de frequência e tensão, incluindo frequência, taxa de variação da frequência (ROCOF), potência ativa, tensão no ponto de conexão e energia dos submódulos. Como não há arquivos de simulação ou séries temporais próprias, não se calculam métricas numéricas de desempenho neste artigo.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

1.1. Conversores MMC-HVDC

Os sistemas *HVDC* baseados em conversores de fonte de tensão (*VSC-HVDC*) permitem controlar, de forma desacoplada dentro dos limites do conversor, o intercâmbio de potência ativa e reativa no terminal CA. A topologia MMC tornou-se relevante para aplicações de alta potência porque distribui a tensão entre submódulos, produz formas de onda multiníveis e oferece flexibilidade de expansão. Essas vantagens vêm acompanhadas de maior complexidade de controle, pois o conversor precisa regular simultaneamente as grandezas externas de conexão e as variáveis internas de energia (DEBNATH *et al.*, 2015; RAJU *et al.*, 2019).

Em sua configuração trifásica convencional, o MMC possui três pernas, cada uma formada por um braço superior e um inferior. Cada braço reúne submódulos em série e uma indutância de braço. A inserção e a retirada controlada dos submódulos sintetizam os níveis de tensão necessários à conversão. A tensão dos capacitores precisa ser equilibrada, enquanto as correntes de braço devem respeitar limites térmicos e elétricos. Além do componente associado à corrente CA, existe um componente interno relacionado ao intercâmbio de energia entre os braços; por isso, o controle de corrente circulante e o balanceamento de energia são partes essenciais da estrutura de controle do MMC (DEBNATH *et al.*, 2015; SAAD *et al.*, 2014).

Assim, a avaliação de estabilidade de um *MMC-HVDC* deve considerar dois níveis acoplados. No nível externo, avaliam-se potência ativa e reativa, tensão do ponto de conexão, frequência e regulação do elo CC. No nível interno, avaliam-se energia total e por braço, dispersão das tensões dos capacitores, correntes circulantes e capacidade de modulação. Uma estratégia GFM pode melhorar a interação externa com a rede, mas não dispensa a regulação interna necessária para manter os submódulos em condições seguras (DEBNATH *et al.*, 2015; SAAD *et al.*, 2014).

1.2. Redes elétricas de baixa inércia

A crescente participação de recursos conectados por conversores reduz a contribuição direta das massas girantes para a resposta inercial do sistema. Em uma perturbação de potência, a frequência passa a depender mais intensamente da resposta dos controles, da reserva disponível e das características das cargas. A inércia equivalente é, portanto, um indicador importante, mas não deve ser usada isoladamente para classificar a segurança operativa: a localização da perturbação, a distribuição da geração e a força elétrica das conexões também influenciam a resposta (KUNDUR, 1994; LOURENÇO *et al.*, 2021).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Em redes de baixa inércia, um mesmo desequilíbrio inicial pode produzir uma variação mais rápida da frequência. A taxa de variação da frequência (Rate of Change of Frequency – ROCOF) caracteriza a inclinação inicial dessa resposta, enquanto o nadir (valor mínimo) ou o zênite (valor máximo) da frequência representa o extremo atingido durante o evento. A recuperação posterior depende da resposta primária da reserva de potência, dos controles de conversores e, quando aplicável, de ações de proteção e alívio de carga. Esses indicadores de*scr*evem aspectos distintos e devem ser avaliados em conjunto.

A força da rede no ponto de conexão também influencia a interação entre o conversor e o sistema CA. Uma rede fraca apresenta maior impedância equivalente vista pelo conversor, de modo que a corrente injetada pode produzir variações mais pronunciadas de tensão e alterar a dinâmica das malhas de sincronização e controle. A razão de curto-circuito (Short Circuit Ratio – SCR) é um indicador simplificado dessa condição, mas em sistemas com múltiplos conversores pode não representar sozinho os acoplamentos entre terminais e modos de oscilação. Por isso, estudos de estabilidade podem combinar análise de impedância, autovalores e resposta temporal, conforme o objetivo e o modelo disponível (DADJO TAVAKOLI *et al.*, 2020; PRIETO-ARAUJO *et al.*, 2017).

Diante desse cenário, torna-se necessário o desenvolvimento de estratégias de controle capazes de fornecer suporte dinâmico equivalente ao das máquinas síncronas convencionais.

1.3. Controle Grid-Forming

As estratégias *GFM* são estudadas porque permitem que o conversor estabeleça uma referência interna de tensão e frequência, em vez de depender exclusivamente de uma referência imposta pela rede. Em termos funcionais, o conversor é controlado como uma fonte de tensão atrás de uma impedância equivalente, com resposta condicionada pelas malhas internas e pelos limitadores. Essa característica pode favorecer a operação em redes com menor força elétrica, mas não elimina problemas de estabilidade: a impedância de saída, a sintonia dos controles, a limitação de corrente e a interação com outros equipamentos precisam ser considerados (LOURENÇO *et al.*, 2021).

Diferentemente das estratégias convencionais baseadas em sincronização com a rede elétrica, o controle *grid-forming* permite que o conversor opere como fonte de tensão controlada, estabelecendo frequência e tensão de referência para o sistema (LOURENÇO *et al.*, 2021).
Entre as principais abordagens utilizadas destacam-se:

- controle por característica de inclinação potência-frequência;
- máquina síncrona virtual;
- controle baseado em balanço energético.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Essas estratégias possibilitam maior robustez operacional em redes de baixa inércia, contribuindo para a estabilidade dinâmica do sistema elétrico (KUNDUR, 1994; LOURENÇO *et al.*, 2021).

O Esquema Regional de Alívio de Carga (ERAC) é um recurso de proteção que atua mediante condições de subfrequência definidas no sistema. O suporte de potência oferecido por um controle GFM pode alterar a trajetória da frequência, mas não substitui a proteção sistêmica nem permite afirmar, sem simulações e critérios reais de ajuste, que a atuação do ERAC será evitada. Neste trabalho, a relação entre GFM e ERAC é tratada como hipótese de análise que deverá ser validada em estudos computacionais com parâmetros e estágios de proteção explicitamente definidos (KUNDUR, 1994).

1.4. Estabilidade de frequência, ROCOF e inércia equivalente

Em sistemas elétricos convencionais, a energia cinética armazenada nas massas girantes contribui para limitar a velocidade inicial de variação da frequência após um desequilíbrio entre geração e carga. Em sistemas com participação crescente de recursos conectados por conversores, a resposta inercial depende cada vez mais das características de controle e da disponibilidade de energia dos equipamentos. Por esse motivo, a baixa inércia deve ser analisada em conjunto com o tamanho e a duração da perturbação, a reserva de potência e os controles primários disponíveis (KUNDUR, 1994; LOURENÇO *et al.*, 2021).

1.5. Controle Grid-Following e Grid-Forming

O controle *Grid-Following (GFL)* normalmente utiliza uma malha de captura de fase *(Phase Locked Loop – PLL) para estimar* o ângulo da tensão no ponto de conexão. A partir dessa referência, as malhas de corrente regulam a injeção de potência ativa e reativa. Em condições de rede suficientemente rígida, essa arquitetura oferece desempenho consolidado; em redes fracas, porém, a dinâmica da PLL e a interação entre a impedância da rede e as malhas de corrente podem reduzir as margens de estabilidade. Isso não significa que o GFL seja inadequado em qualquer rede fraca, mas que sua aplicação requer avaliação das condições e dos parâmetros do sistema (LOURENÇO *et al.*, 2021).

A taxa de variação da frequência, conhecida como *ROCOF* (*Rate of Change of Frequency*), expressa a rapidez com que a frequência muda ao longo do tempo. Em uma representação agregada simplificada, a relação entre desequilíbrio de potência e variação de frequência é inversamente proporcional à inércia equivalente. Essa relação é útil para interpretar a resposta inicial, mas não de*scr*eve sozinha toda a dinâmica do sistema: reguladores, cargas

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

dependentes da frequência, controles de conversores e limites de corrente também influenciam a evolução do evento (KUNDUR, 1994).

1.6. Controle por estatismo (droop) e máquina síncrona virtual (VSM)

No GFM por estatismo, a potência ativa medida participa do ajuste da frequência de referência, enquanto a potência reativa participa do ajuste da amplitude de tensão. Esse mecanismo permite compartilhar variações de carga entre unidades sem exigir comunicação rápida entre todos os conversores. O estatismo, entretanto, não define sozinho a dinâmica transitória: filtros de medição, atrasos, malhas internas, impedância de saída e limitadores de corrente influenciam a resposta. Em geral, a recuperação exata da frequência e da tensão nominais pode exigir uma camada secundária de controle.

A diferença entre GFL e GFM deve ser entendida como uma diferença na formação da referência e na interação com a rede. No GFL, o conversor acompanha uma referência de fase estimada a partir da tensão externa; no GFM, a referência interna é gerada pela própria lei de controle. Em ambos os casos, o conversor continua sujeito a limites de corrente e potência. Durante faltas ou afundamentos de tensão, a prioridade entre suporte de tensão, injeção de corrente reativa, manutenção da potência ativa e proteção dos semicondutores deve ser definida explicitamente (LOURENÇO *et al.*, 2021; PRIETO-ARAUJO *et al.*, 2017).

1.7. Dinâmica interna do MMC e energia dos submódulos

A dinâmica interna do MMC é particularmente relevante quando se utiliza GFM, pois a resposta de potência solicitada pelo controle externo precisa ser compatível com a energia armazenada nos capacitores e com as correntes admissíveis nos braços. A energia dos submódulos varia com o balanço entre potência que entra e sai do conversor; desequilíbrios entre braços ou entre submódulos podem aumentar a dispersão das tensões e comprometer a margem de modulação. Assim, o controle de energia e o balanceamento das tensões não são funções auxiliares; são requisitos para que a resposta externa do conversor seja sustentável (DEBNATH *et al.*, 2015; SAAD *et al.*, 2014).

A máquina síncrona virtual (VSM) incorpora equações de controle inspiradas na dinâmica de uma máquina síncrona, incluindo termos associados à inércia e ao amortecimento.

Em estudos comparativos, a VSM pode apresentar resposta de frequência diferente daquela obtida com controle droop (por estatismo) puro; contudo, o resultado depende da parametrização e do sistema avaliado. Lourenço *et al.* (2021) analisam modelos e cenários com diferentes tecnologias GFM e demonstram que a interoperabilidade entre controladores é parte

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

relevante da análise de estabilidade. Não se deve generalizar um resultado de simulação para todas as redes sem reproduzir as condições do estudo (LOURENÇO *et al.*, 2021).

1.8. Razão de curto-circuito, redes fracas e proteção sistêmica

A razão de curto-circuito (Short Circuit Ratio – SCR) é utilizada como indicador simplificado da força elétrica de um ponto de conexão, embora sua interpretação dependa da definição adotada e da configuração da rede. Em sistemas com vários conversores, o *SCR* isolado pode não representar todas as interações relevantes; por isso, análises mais completas consideram impedâncias, controles, modos de oscilação e contingências. A estabilidade deve ser verificada para os cenários e parâmetros efetivamente modelados (LOURENÇO *et al.*, 2021; PRIETO-ARAUJO *et al.*, 2017).

A energia armazenada nos capacitores dos submódulos influencia a dinâmica interna do MMC e a resposta transitória. Essa energia não constitui uma reserva ilimitada: sua utilização provoca variações de tensão que devem permanecer dentro dos limites operacionais dos submódulos (SAAD *et al.*, 2014; DEBNATH *et al.*, 2015).

2. METODOLOGIA

Trata-se de pesquisa bibliográfica, de abordagem qualitativa e caráter exploratório, voltada à análise da estabilidade de conversores *MMC-HVDC* dotados de estratégias de controle *Grid-Forming* (GFM) em redes elétricas com baixa inércia. A investigação possui natureza teórico-conceitual, busca compreender os mecanismos de controle e as interações dinâmicas descritas na literatura, identificar condições que podem favorecer ou limitar a atuação dos conversores e organizar uma proposta de avaliação computacional futura. Não se caracteriza como revisão sistemática, uma vez que não foi adotado protocolo exaustivo de busca, triagem e avaliação quantitativa de publicações.

O estudo foi delimitado à aplicação de conversores de fonte de tensão em sistemas *HVDC*, com ênfase na topologia *Modular Multilevel Converter* (MMC), e à comparação entre três abordagens de controle: *Grid-Following* (GFL), *Grid-Forming* baseado em estatismo (*droop*) e *Grid-Forming* baseado no conceito de Máquina Síncrona Virtual (VSM). A avaliação considera a conexão do conversor à rede CA, a dinâmica do elo CC e o comportamento energético interno dos braços e submódulos. Não foram considerados como objeto central os conversores LCC-HVDC (Line-Commutated Converter – High Voltage Direct Current), pois suas características de comutação e controle são distintas das estruturas VSC-MMC discutidas neste trabalho (DEBNATH *et al.*, 2015; LOURENÇO *et al.*, 2021; RAJU *et al.*, 2019).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

O material bibliográfico foi organizado em quatro eixos complementares. O primeiro reúne fundamentos da topologia MMC, incluindo a estrutura dos braços, a síntese multinível de tensão, o balanceamento das tensões dos capacitores e o controle das correntes circulantes. O segundo aborda estabilidade de sistemas elétricos, com atenção à resposta de frequência, à inércia equivalente e à influência da força da rede. O terceiro contempla os princípios de sincronização e controle GFL, bem como as estratégias GFM por *droop* e VSM. O quarto eixo examina a integração desses controles em sistemas *MMC-HVDC*, considerando a interação entre terminais CA, barramento CC, limites de corrente e disponibilidade de energia. Essa organização permite relacionar os fundamentos do conversor às questões de estabilidade que motivam a pesquisa (KUNDUR, 1994; DEBNATH *et al.*, 2015; SAAD *et al.*, 2014; RAJU *et al.*, 2019).

A seleção do conteúdo priorizou publicações técnicas e científicas diretamente relacionadas à modelagem, operação, controle ou estabilidade de conversores MMC e sistemas *HVDC*, além de referências fundamentais para a avaliação de sistemas de potência.

Foram considerados a pertinência temática, a contribuição para a compreensão dos mecanismos físicos e de controle e a possibilidade de relacionar as conclusões dos estudos ao problema investigado. A bibliografia utilizada não representa um levantamento estatístico de toda a produção científica sobre o tema; portanto, as conclusões são apresentadas como síntese interpretativa do conjunto consultado, e não como consenso universal ou prova de superioridade de uma estratégia em qualquer condição de operação.

A leitura das fontes foi conduzida de forma analítica e comparativa. Inicialmente, foram identificados os objetivos, a estrutura de conversão e as variáveis de controle discutidas em cada trabalho. Em seguida, as informações foram agrupadas por assunto, distinguindo-se os aspectos externos de conexão à rede dos aspectos internos do MMC. No domínio externo, foram observadas as referências de tensão e frequência, a sincronização com a rede, a resposta de potência ativa e reativa e a sensibilidade à impedância equivalente do sistema. No domínio interno, foram considerados o balanço de energia dos submódulos, o equilíbrio das tensões dos capacitores, as correntes dos braços e circulantes e a capacidade do conversor de atender às solicitações sem ultrapassar seus limites operacionais (DEBNATH *et al.*, 2015; SAAD *et al.*, 2014).

Para comparar as estratégias de controle, foram adotadas dimensões qualitativas comuns. Na abordagem GFL, examinou-se a dependência de uma referência de sincronismo obtida a partir da tensão da rede e a forma como as malhas de corrente regulam a injeção de potência. Nas estratégias GFM, a atenção foi direcionada à capacidade de estabelecer referências internas de tensão e frequência, à resposta de potência associada ao estatismo e à

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

representação de características de uma máquina síncrona por meio da VSM. Também foram considerados os requisitos de estabilidade do controle, a interação com redes de menor força elétrica e a necessidade de limitar a corrente durante perturbações. Essa comparação não atribui notas ou classificação numérica, pois os estudos consultados empregam modelos, parâmetros e condições de teste que não são necessariamente equivalentes (LOURENÇO *et al.*, 2021).

A avaliação da baixa inércia foi realizada relacionando a resposta de frequência à magnitude do desequilíbrio de potência e à disponibilidade de recursos capazes de modificar rapidamente a potência ativa. A frequência e a taxa de variação da frequência (*ROCOF*) foram tratadas como indicadores conceituais da resposta do sistema, sem cálculo de valores próprios. A força da rede foi considerada uma condição relevante para a interação entre o conversor e o sistema CA, uma vez que a impedância equivalente no ponto de conexão pode alterar o comportamento das malhas de controle e a estabilidade. Assim, a baixa inércia e a baixa força da rede foram tratadas como características distintas, embora possam ocorrer simultaneamente e ampliar a complexidade do controle (KUNDUR, 1994; LOURENÇO *et al.*, 2021; PRIETO-ARAUJO *et al.*, 2017).

No caso específico do *MMC-HVDC*, a interpretação dos benefícios potenciais do GFM foi condicionada à avaliação conjunta das variáveis externas e internas. Uma resposta de potência ativa destinada a apoiar a frequência pode exigir energia dos capacitores dos submódulos e alterar as correntes dos braços. De modo semelhante, o suporte de tensão por meio de potência reativa precisa respeitar a capacidade de corrente e a prioridade de controle definida para situações normais ou de falta. Também foi considerada a coordenação entre os terminais do sistema *HVDC*, pois a variação da potência no lado CA pode repercutir no balanço energético do elo CC e nas responsabilidades de regulação atribuídas a cada terminal (DADJO TAVAKOLI *et al.*, 2020; DEBNATH *et al.*, 2015; RAJU *et al.*, 2019).

Com base nessa avaliação, foram definidos cenários conceituais para orientar uma etapa posterior de modelagem e simulação. A proposta consiste em comparar GFL, GFM-*droop* e GFM-VSM sob uma mesma topologia *MMC-HVDC*, mantendo constantes, em cada comparação, a potência de operação, as condições iniciais, os limites físicos do conversor e a perturbação aplicada. Em etapas distintas, poderão ser modificadas a força da rede, a inércia equivalente e a intensidade ou localização da perturbação. Essa separação das variáveis é importante para que eventuais diferenças de resposta possam ser relacionadas ao parâmetro efetivamente alterado, evitando atribuir ao tipo de controle efeitos provocados por mudanças simultâneas na rede ou no ponto de operação (DADJO TAVAKOLI *et al.*, 2020; LOURENÇO *et al.*, 2021).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Para uma futura implementação no *MATLAB/Simulink*, recomenda-se representar o MMC por um modelo compatível com o objetivo e a escala temporal da avaliação, explicitando a estratégia de representação dos submódulos e os controles externos e internos considerados.

O modelo deverá incluir, no mínimo, as malhas de corrente e potência pertinentes, a sincronização ou formação de referência, a regulação do barramento CC, o balanceamento de energia dos submódulos e as limitações de corrente e modulação. Os parâmetros dos controladores, as condições iniciais, a frequência de amostragem, o passo de integração e os eventos de perturbação deverão ser documentados para permitir a repetição dos testes. A escolha entre modelo detalhado e modelo médio deverá ser justificada conforme o fenômeno investigado e o custo computacional (BERGNA-DIAZ; SUUL; D'ARCO, 2018; DEBNATH *et al.*, 2015; SHARIFABADI *et al.*, 2016).

A avaliação quantitativa futura deverá observar, de maneira conjunta, a frequência, o *ROCOF* e o valor mínimo ou máximo atingido após a perturbação; a tensão no ponto de conexão; as potências ativa e reativa; a tensão do barramento CC; as correntes dos braços; e a energia ou tensão dos capacitores dos submódulos. Quando aplicável, também deverão ser examinados o tempo de acomodação, o amortecimento das oscilações e a recuperação do equilíbrio energético. A análise conjunta evita considerar satisfatória uma resposta externa que, embora melhore temporariamente a frequência ou a tensão, provoque sobrecorrente ou desvio excessivo de energia no conversor. Esses indicadores são propostos como critérios para estudos futuros e não como resultados já obtidos neste artigo (KUNDUR, 1994; DEBNATH *et al.*, 2015; SAAD *et al.*, 2014; LOURENÇO *et al.*, 2021).

2.1. Procedimento de análise e organização dos resultados

O procedimento analítico foi desenvolvido em etapas encadeadas. Primeiro, foram caracterizadas a topologia *MMC-HVDC* e as variáveis que condicionam sua operação, separando-se grandezas do lado CA, do elo CC e dos circuitos internos dos braços. Segundo, foram de*scri*tos os princípios de funcionamento dos controles GFL, GFM-*droop* e GFM-VSM, com atenção à origem das referências de sincronismo, tensão e frequência e aos mecanismos de resposta de potência. Terceiro, foram discutidas as relações entre baixa inércia, força da rede, resposta dinâmica e limites energéticos do conversor. Por fim, os mecanismos identificados foram relacionados a cenários de perturbação e a indicadores que poderão ser utilizados em uma validação computacional (KUNDUR, 1994; DEBNATH *et al.*, 2015; LOURENÇO *et al.*, 2021).

A organização dos resultados seguiu os mesmos eixos utilizados na leitura bibliográfica, de modo a manter correspondência entre o problema, os objetivos e a discussão.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

As afirmações foram tratadas de acordo com seu alcance: resultados numéricos apresentados pelos autores consultados não foram reproduzidos como se fossem medições ou simulações desta pesquisa; conclusões dependentes de condições específicas foram descritas como condicionais; e aspectos ainda não demonstrados foram indicados como questões para investigação futura. Essa distinção é especialmente importante ao discutir a contribuição de inércia virtual, pois a capacidade de resposta depende da energia e da potência disponíveis, da estratégia de limitação de corrente e da coordenação dos controles (KUNDUR, 1994; LOURENÇO *et al.*, 2021).

2.2. Limitações e delimitação dos resultados

A principal limitação metodológica é a ausência de um modelo computacional próprio implementado e validado, de parâmetros completos dos controladores e de séries temporais geradas em ambiente de simulação ou obtidas experimentalmente. Consequentemente, este artigo não apresenta resultados próprios de *MATLAB/Simulink*, ensaios de laboratório, dados operacionais de uma instalação específica, valores calculados de *ROCOF* ou nadir de frequência, margens numéricas de estabilidade ou análise de autovalores. A proposta de cenários e indicadores constitui uma orientação metodológica para trabalhos posteriores, não devendo ser interpretada como comprovação quantitativa do desempenho das estratégias comparadas.

Adicionalmente, as conclusões dependem do escopo das publicações consultadas e das condições de operação nelas consideradas. A adoção de GFM não garante, isoladamente, maior estabilidade em qualquer sistema; o desempenho depende da força da rede, do ajuste dos controladores, dos limites de corrente e potência, da energia disponível nos submódulos e da coordenação entre os terminais CA e CC. Por essa razão, os resultados deste trabalho são apresentados como uma síntese crítica e qualitativa, adequada à natureza bibliográfica da pesquisa, e indicam os aspectos que precisam ser verificados antes de qualquer aplicação em sistemas reais (LOURENÇO *et al.*, 2021; DADJO TAVAKOLI *et al.*, 2020).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados desta pesquisa são apresentados como síntese qualitativa da literatura e comparação conceitual das estratégias de controle. Não correspondem a resultados de simulação própria. A discussão concentra-se nos mecanismos físicos e de controle que relacionam a baixa inércia, a força da rede e a dinâmica interna do *MMC-HVDC*, identificando as

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

condições que precisam ser consideradas em uma validação quantitativa (KUNDUR, 1994; DEBNATH *et al.*, 2015; LOURENÇO *et al.*, 2021).

As fontes consultadas apontam como variáveis relevantes a frequência, o *ROCOF*, a tensão no ponto de conexão, as potências ativa e reativa, a tensão do barramento CC, as correntes dos braços e a energia armazenada nos capacitores dos submódulos. Essas grandezas representam dimensões complementares: as variáveis CA descrevem a interação com a rede, enquanto as variáveis internas permitem verificar se o conversor consegue sustentar a resposta solicitada sem violar seus limites operacionais (KUNDUR, 1994; DEBNATH *et al.*, 2015; SAAD *et al.*, 2014; LOURENÇO *et al.*, 2021).

A escolha dessas variáveis decorre do acoplamento entre o comportamento externo e interno do conversor. Uma resposta rápida de potência ativa pode contribuir para limitar a excursão de frequência, mas também altera o balanço energético dos submódulos e pode elevar as correntes dos braços. Da mesma forma, a injeção de potência reativa pode apoiar a tensão no ponto de conexão, mas sua prioridade durante uma falta deve ser coordenada com os limites de corrente e com a capacidade de modulação. Portanto, avaliar apenas frequência ou potência ativa é insuficiente para caracterizar a viabilidade da resposta do MMC (DEBNATH *et al.*, 2015; SAAD *et al.*, 2014; LOURENÇO *et al.*, 2021).

No *MMC-HVDC*, a resposta do terminal conectado à rede CA depende também da coordenação com o terminal remoto e com a regulação do elo CC. Em uma ligação ponto a ponto, um terminal pode ser responsável por regular a tensão CC, enquanto o outro controla a potência transmitida; a definição exata depende da arquitetura do sistema. A aplicação de GFM em um terminal não deve ser analisada isoladamente, pois alterações na potência CA repercutem no balanço de energia do elo e podem exigir ajustes coordenados nos controles dos dois terminais (DADJO TAVAKOLI *et al.*, 2020; LOURENÇO *et al.*, 2021).

3.1. Resposta de frequência e baixa inércia

A frequência constitui uma das principais grandezas utilizadas para avaliação da estabilidade de sistemas elétricos. Quando ocorre uma perturbação que provoca desequilíbrio entre potência gerada e potência demandada, a diferença entre essas grandezas produz uma alteração na frequência do sistema (KUNDUR, 1994; LOURENÇO *et al.*, 2021).

A relação física entre inércia equivalente e resposta inicial de frequência indica que, para um mesmo desequilíbrio de potência, uma menor energia cinética sincronizada tende a produzir uma variação inicial mais rápida da frequência. Essa interpretação é válida como aproximação agregada do comportamento inicial; a trajetória completa depende também da resposta dos

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

reguladores, das cargas, dos controles dos conversores e das reservas disponíveis (KUNDUR, 1994).

Diante desse cenário, o GFM pode contribuir ao estabelecer uma referência interna de frequência e ajustar sua potência ativa em resposta às condições elétricas locais. A contribuição efetiva, contudo, depende de existir margem de potência ou energia disponível para alterar a injeção. Se o conversor já estiver operando próximo de seu limite de corrente ou potência, a capacidade de resposta adicional será reduzida. A formação de referência, portanto, não deve ser confundida com disponibilidade ilimitada de reserva (LOURENÇO *et al.*, 2021).

A frequência interna de um GFM é determinada por sua lei de controle e pelas variáveis utilizadas na realimentação, e não exclusivamente pela estimativa de fase obtida por *PLL*. Essa característica pode reduzir a dependência de uma referência externa em redes fracas. Ainda assim, o conversor precisa manter sincronismo e compartilhamento estável de potência com os demais equipamentos, o que exige coordenação de impedâncias, ganhos de controle e estratégias de limitação de corrente (LOURENÇO *et al.*, 2021).

3.2. Controle por estatismo (droop)

No controle por estatismo, a variação da potência ativa medida modifica a referência de frequência, estabelecendo uma característica de compartilhamento entre conversores. De forma complementar, a relação entre potência reativa e amplitude de tensão permite participar da regulação de tensão. O mecanismo é relativamente direto e pode facilitar o compartilhamento de potência entre unidades em paralelo; entretanto, o estatismo isolado não determina toda a resposta transitória, que depende dos filtros, atrasos, malhas internas e limitadores do conversor (LOURENÇO *et al.*, 2021).

Quando a potência ativa demandada aumenta, o controle por estatismo ajusta a referência interna de frequência de acordo com a inclinação definida pelo controlador. A intensidade dessa resposta depende do coeficiente de estatismo e da filtragem da potência medida. Coeficientes mais agressivos podem aumentar a participação do conversor, mas também podem intensificar interações com outros controladores se não forem coordenados. Por isso, a sintonia deve considerar a impedância da rede e a resposta dos demais equipamentos (LOURENÇO *et al.*, 2021).

Na regulação de tensão, o controle pode ajustar a amplitude da referência interna conforme o desvio de potência reativa. A efetividade desse mecanismo depende da relação entre resistência e reatância da rede, da impedância do transformador e das condições do ponto de

conexão. Por isso, a sintonia deve ser verificada no modelo elétrico específico (LOURENÇO *et al.*, 2021; PRIETO-ARAUJO *et al.*, 2017).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A utilização conjunta das características de estatismo permite ao *MMC-HVDC* participar do compartilhamento de potência ativa e reativa. Para que esse suporte seja operacionalmente viável, é necessário coordená-lo com os controles de corrente, de energia dos braços, de tensão CC e com os limitadores de corrente. A resposta externa não pode exigir uma potência que o elo ou o conversor não consiga transferir (DEBNATH *et al.*, 2015; SAAD *et al.*, 2014; RAJU *et al.*, 2019).

3.3. Máquina síncrona virtual (VSM)

A Máquina Síncrona Virtual (VSM) reproduz, por meio do controle, características dinâmicas associadas a uma máquina síncrona, principalmente a relação entre desequilíbrio de potência, variação de frequência interna e amortecimento. Diferentemente do *droop* estático, a VSM incorpora estados dinâmicos que influenciam a evolução temporal da frequência e do ângulo interno. Essa característica pode modificar o amortecimento e a resposta inicial, mas o resultado depende dos parâmetros escolhidos e da interação com a rede (LOURENÇO *et al.*, 2021).

Na VSM, a referência de frequência é ajustada dinamicamente em função do desequilíbrio entre a potência de referência e a potência elétrica medida, com uma ação de amortecimento. O controle emula uma resposta inercial, mas não cria energia; a potência adicional precisa estar disponível no sistema e respeitar os limites do elo *HVDC* e do MMC (LOURENÇO *et al.*, 2021).

A principal diferença em relação ao *droop* convencional é que a VSM incorpora uma dinâmica explícita de inércia virtual e amortecimento, enquanto o *droop* estabelece uma relação estática entre desvios de potência e referências de frequência ou tensão. Isso não significa que a VSM seja sempre superior: uma inércia virtual elevada pode tornar a resposta mais lenta ou aumentar a exigência de potência durante determinados eventos; amortecimento insuficiente pode favorecer oscilações. A comparação deve ser realizada com parâmetros e condições equivalentes.

O material de referência utilizado no trabalho apresenta a VSM como uma das principais estratégias de GFM e destaca sua capacidade de fornecer resposta de frequência baseada em medições locais, podendo ser implementada sem depender de uma malha de captura de fase para a formação da referência.

3.4. Comparação conceitual entre GFL, droop e VSM

A comparação conceitual entre as estratégias evidencia diferenças na forma de interação com a rede. No controle *Grid-Following* (GFL), o conversor utiliza a tensão do ponto de conexão

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

como referência de sincronização, normalmente por meio de uma *PLL*, e regula a corrente injetada. No controle *Grid-Forming* por estatismo (GFM-*Droop*), o conversor estabelece referências internas de tensão e frequência e ajusta sua resposta de potência conforme as características de estatismo. Na Máquina Síncrona Virtual (GFM-VSM), além da formação de referência, são incorporadas dinâmicas de controle associadas à inércia virtual e ao amortecimento. Essas características descrevem princípios funcionais, não uma classificação quantitativa de desempenho.

A comparação indica que a principal diferença está na forma de interação com a rede. O GFL depende de uma tensão externa suficientemente definida para sincronização, enquanto as estratégias GFM geram uma referência interna de tensão e frequência. Em redes fracas, essa característica pode ser vantajosa, mas a resposta depende da impedância de saída, da sintonia dos controladores, da coordenação entre conversores e do comportamento dos limitadores. Portanto, a comparação deve ser interpretada como síntese funcional, não como demonstração de superioridade universal (LOURENÇO *et al.*, 2021).

3.5. Influência da baixa inércia

A redução da inércia equivalente aumenta a sensibilidade da frequência ao desequilíbrio instantâneo entre geração e demanda. Entretanto, a avaliação da resposta de um sistema com *MMC-HVDC* precisa distinguir a resposta inercial inicial, o suporte primário de potência e a recuperação em regime subsequente. O GFM pode participar dessas etapas de maneiras diferentes, conforme a estrutura de controle, a reserva disponível e a coordenação com os demais recursos.

Mantido o mesmo desequilíbrio inicial, uma menor inércia tende a elevar o *ROCOF* inicial. A evolução posterior, contudo, depende da resposta dos controles e da disponibilidade de potência. Por essa razão, a avaliação não deve se limitar ao *ROCOF*: também precisa considerar o nadir de frequência, o tempo de recuperação, a potência fornecida pelo conversor e a manutenção das variáveis internas dentro de seus limites.

Essa relação explica o interesse pelo GFM em sistemas com baixa inércia, mas não demonstra por si só que uma estratégia específica reduzirá o *ROCOF* ou elevará o nadir em qualquer rede. Para demonstrar esse efeito seria necessário comparar simulações ou ensaios sob condições iniciais, perturbações, reservas e limites equivalentes. Neste artigo, a relação é discutida em termos conceituais (DADJO TAVAKOLI *et al.*, 2020; PRIETO-ARAUJO *et al.*, 2017).

A contribuição de potência associada ao controle GFM depende da disponibilidade energética, da margem de potência e dos limites de corrente do conversor. Por isso, seu efeito

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

deve ser quantificado em estudos futuros, sem presumir que o suporte será suficiente para eliminar a perturbação.

A hipótese de que o GFM possa reduzir a severidade da variação de frequência deve ser testada considerando a energia disponível no elo, a margem de potência do terminal, a limitação de corrente e a resposta dos controles de energia do MMC. Caso a potência adicional solicitada não possa ser sustentada pelo sistema CC ou pelos submódulos, o suporte pode ser limitado ou transitório (DADJO TAVAKOLI et al., 2020; LOURENÇO et al., 2021).

3.6. Redes fortes, redes fracas e SCR

A razão de curto-circuito (*SCR*) é utilizada como indicador simplificado da força da rede no ponto de conexão. Valores menores indicam, em termos gerais, uma impedância equivalente maior em relação à potência de referência do conversor. Contudo, o *SCR* convencional não captura integralmente sistemas com múltiplos conversores, redes com acoplamentos fortes ou interações dependentes da frequência. Nesses casos, a avaliação pode exigir modelos de impedância, análise modal ou estudos de estabilidade de pequena e grande perturbação (DADJO TAVAKOLI *et al.*, 2020; PRIETO-ARAUJO *et al.*, 2017).

Para uma validação computacional futura, recomenda-se comparar inicialmente as três estratégias em uma rede forte, aplicando um degrau de carga e registrando tensão e frequência. Em seguida, a mesma comparação deverá ser repetida em uma rede fraca, utilizando uma perturbação equivalente, como a perda de geração, e registrando frequência, tensão e *ROCOF*.

Por fim, em condição de baixa inércia, deverá ser avaliada a resposta do GFM-VSM a uma perturbação de maior magnitude, observando o nadir de frequência, o *ROCOF*, a estabilidade e os limites operacionais do MMC. Esses casos são propostas de estudo, e não resultados simulados.

A matriz de cenários organiza uma proposta de comparação futura. Para que os resultados sejam interpretáveis, cada par de cenários deve manter inalterados o ponto de operação, a potência de referência, a perturbação e os limites de corrente, alterando apenas a estratégia de controle ou a condição de rede que se deseja estudar. A matriz não contém resultados calculados nem define limites universais de *SCR*; os valores e critérios deverão ser especificados a partir do sistema de referência escolhido.

3.7. Energia dos submódulos do MMC

A energia armazenada nos capacitores dos submódulos é parte da dinâmica interna do MMC. Durante variações de potência, o balanço entre energia que entra e sai do conversor altera as tensões dos capacitores. O controle deve manter essas tensões equilibradas entre

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

submódulos e braços, evitando sobretensões, subtensões e perda de capacidade de modulação. A energia interna pode participar de respostas transitórias por intervalos limitados, mas não equivale a uma fonte primária de energia nem deve ser tratada como reserva ilimitada (DEBNATH *et al.*, 2015; SAAD *et al.*, 2014).

Em termos qualitativos, a energia total disponível depende do número de submódulos em operação, da capacitância e do nível de tensão de cada capacitor. A capacidade de utilizar essa energia durante uma perturbação depende da faixa admissível de variação de tensão e da estratégia de balanceamento. Como os parâmetros específicos do conversor não foram definidos neste estudo, não é possível quantificar a reserva energética nem estimar a duração de um suporte de potência.

Essa característica demonstra que os capacitores influenciam a dinâmica transitória e a capacidade de manter a operação do conversor durante variações de potência. Entretanto, a energia efetivamente utilizável é apenas uma parcela da energia armazenada, pois as tensões dos submódulos devem permanecer dentro das faixas operacionais e o balanceamento precisa ser mantido.

A literatura sobre MMC destaca que o controle da energia interna e o balanceamento das tensões dos capacitores devem operar em coordenação com as malhas de corrente e potência. Em aplicações GFM, essa coordenação é particularmente importante porque a resposta de tensão e frequência pode solicitar variações de potência que repercutem diretamente no balanço energético do conversor (DEBNATH *et al.*, 2015; SAAD *et al.*, 2014).

Entretanto, essa energia não deve ser interpretada como uma fonte ilimitada de potência.

A variação das tensões dos capacitores precisa permanecer dentro das condições de operação definidas para os submódulos.

3.8. Oscilações e amortecimento

Durante uma perturbação, a resposta do sistema pode apresentar oscilações de potência, tensão e corrente. A avaliação dessas oscilações busca identificar se os desvios diminuem ao longo do tempo ou se permanecem, crescem ou interagem com outros modos do

sistema. Em estudos lineares, os modos podem ser investigados por autovalores do modelo em torno de um ponto de operação; em estudos temporais, a observação das séries de frequência, potência e tensão permite avaliar o amortecimento da resposta.

A estabilidade dinâmica de pequena perturbação pode ser examinada pela localização dos autovalores do modelo linearizado: modos com parte real negativa correspondem a componentes que decaem no tempo, enquanto modos com parte real positiva indicam crescimento local da perturbação. A taxa de amortecimento e a frequência de oscilação ajudam

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

a caracterizar cada modo. Como este trabalho não apresenta uma matriz de estados nem autovalores calculados, esses conceitos são apresentados como critérios para estudos futuros, não como resultados próprios.

A avaliação modal pode identificar os modos dominantes e a participação de estados associados a controladores, correntes e energia dos submódulos. Para um estudo reprodutível, é necessário informar o ponto de operação, o modelo linearizado, os estados considerados e os parâmetros dos controladores. A avaliação temporal complementa essa abordagem ao verificar a resposta a perturbações de maior amplitude, nas quais a linearização pode deixar de representar adequadamente os limitadores e as não linearidades.

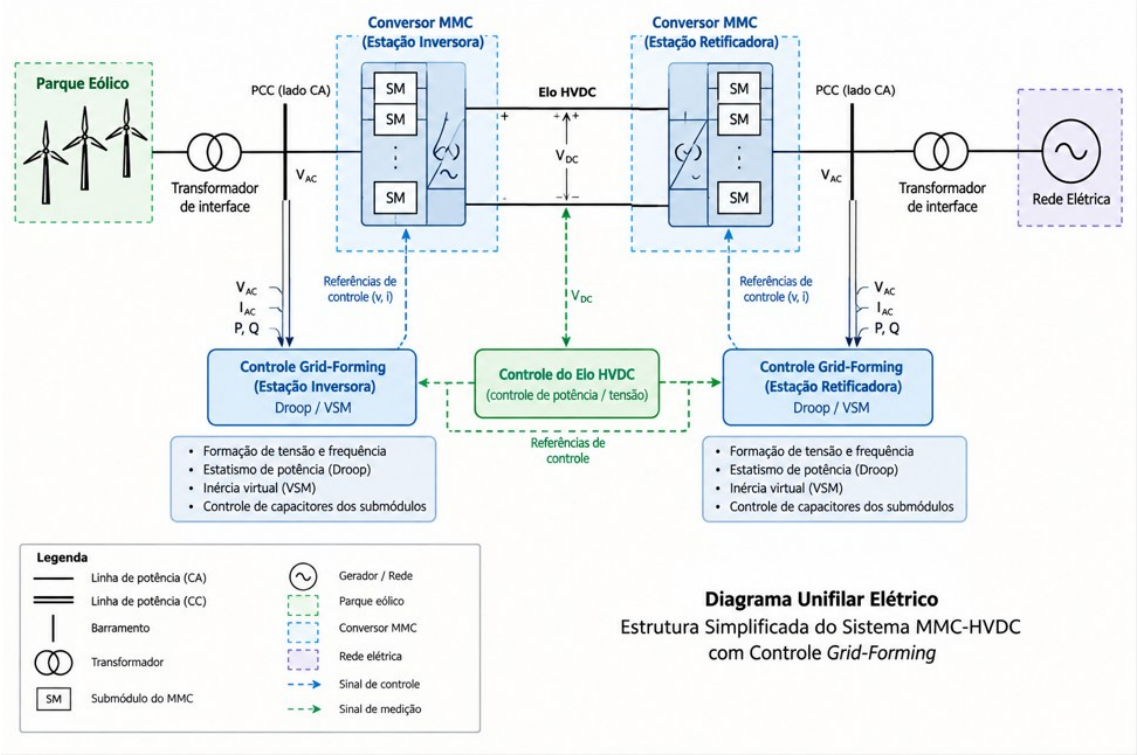
Essas técnicas são utilizadas na literatura para examinar a estabilidade de sistemas *MMC-HVDC* e a interação entre controles. No presente artigo, entretanto, não foram calculados autovalores, margens de fase ou índices de interação próprios; os métodos são indicados como ferramentas adequadas para uma etapa computacional posterior (DADJO TAVAKOLI *et al.*, 2020; LOURENÇO *et al.*, 2021).

3.9. Proposta de validação computacional

A validação computacional futura deverá começar pela definição do sistema elétrico equivalente e do ponto de operação dos terminais CA e CC. O modelo do MMC deverá explicitar a topologia dos submódulos, os parâmetros dos braços, a estratégia de modulação, o controle de energia e o balanceamento das tensões dos capacitores. O elo CC deverá representar a capacitância, a resistência e a indutância relevantes para a faixa de frequência investigada, ou justificar a simplificação adotada (DEBNATH *et al.*, 2015; BERGNA-DIAZ; SUUL; D'ARCO, 2018; SHARIFABADI *et al.*, 2016).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 1. Diagrama conceitual do sistema MMC-HVDC e das estratégias de controle Grid-Following e Grid-Forming.



Fonte: elaboração própria com auxílio de ferramenta de inteligência artificial generativa.

A estrutura proposta pode ser organizada em cinco subsistemas: (i) rede CA equivalente, com impedância e nível de curto-circuito definidos; (ii) terminais MMC e elo CC, com controles de potência e tensão; (iii) controles GFL, GFM-*droop* e GFM-VSM implementados separadamente; (iv) medições e limitadores, incluindo *PLL* quando aplicável, corrente de braço e tensão dos capacitores; e (v) aquisição e processamento dos sinais para cálculo dos indicadores. A comparação deverá usar o mesmo sistema-base e os mesmos eventos para todas as estratégias (LOURENÇO *et al.*, 2021; RAJU *et al.*, 2019).

- sistema elétrico equivalente;
- conversor *MMC-HVDC*;
- controlador GFM;
- sistema de medição;
- sistema de análise dos resultados.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Não foi realizada simulação própria nesta versão. A etapa futura deverá validar primeiro o regime permanente, verificando balanço de potência ativa e reativa, tensão do barramento CC, correntes dos braços e equilíbrio dos capacitores. Somente após essa verificação deverão ser aplicadas perturbações transitórias, como degrau de carga, perda de geração, variação de tensão CA e falta, sempre com condições iniciais e limites documentados (DEBNATH *et al.*, 2015; SAAD *et al.*, 2014).

Os sinais a serem registrados deverão incluir:

- frequência do sistema;
- *ROCOF*;
- tensão no ponto de conexão;
- potência ativa;
- potência reativa;
- tensão média dos capacitores;
- corrente dos braços;
- potência transmitida pelo elo *HVDC*.

3.10. Indicadores propostos para validação futura

A comparação quantitativa deverá incluir, no mínimo, o *ROCOF* inicial, o nadir ou zenit de frequência, o tempo de recuperação, o desvio máximo de tensão, a potência ativa e reativa entregue, a corrente máxima dos braços, a tensão máxima e mínima dos capacitores e a variação da tensão do elo CC. A definição de cada indicador deverá especificar janela temporal, sinal de referência, unidade e método de cálculo. Os resultados deverão ser apresentados com os parâmetros do modelo e as condições do evento, de modo que possam ser reproduzidos (KUNDUR, 1994; LOURENÇO *et al.*, 2021; DEBNATH *et al.*, 2015).

3.11. Relação com a atuação do ERAC

A relação com o Esquema Regional de Alívio de Carga (ERAC) deve ser avaliada a partir dos ajustes efetivos de frequência e temporização aplicáveis ao sistema estudado. O suporte GFM pode alterar a trajetória da frequência e, consequentemente, o instante em que um limiar de subfrequência seria atingido. Entretanto, não é tecnicamente adequado afirmar que o GFM evita a atuação do ERAC sem conhecer os estágios, os temporizadores, a lógica de proteção, a inércia equivalente e a perturbação simulada (KUNDUR, 1994).

Em uma perturbação, o desequilíbrio entre geração e demanda pode provocar queda de frequência; a atuação do ERAC ocorre conforme os ajustes de proteção definidos para o sistema (KUNDUR, 1994).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A hipótese a ser testada é se a resposta de potência do *MMC-HVDC* modifica o *ROCOF*, o nadir de frequência ou o tempo de permanência abaixo dos limiares de proteção, em comparação com o caso de referência. Essa avaliação deve preservar a lógica do ERAC e considerar a possibilidade de atuação da proteção mesmo quando há suporte do conversor (KUNDUR, 1994; LOURENÇO *et al.*, 2021).

Assim, a hipótese poderá ser testada comparando os registros temporais de frequência e potência com os ajustes de proteção aplicáveis. O resultado deverá indicar se houve alteração nos indicadores de frequência e se ocorreu ou não atuação de cada estágio do ERAC, sem confundir a função de suporte do conversor com a função de proteção sistêmica (KUNDUR, 1994).

O ERAC não deve ser considerado substituído pelo controle GFM. A função do conversor é fornecer suporte dinâmico ao sistema, enquanto o esquema de proteção permanece como mecanismo de segurança para condições de perturbação severa (KUNDUR, 1994).

3.12. Síntese crítica e implicações para sistemas HVDC

A comparação entre as estratégias de controle deve ser interpretada considerando a função que cada uma desempenha no sistema. O GFL é adequado a aplicações nas quais a rede fornece uma referência de tensão suficientemente definida, enquanto o GFM busca estabelecer essa referência a partir de uma dinâmica interna. Em sistemas com elevada participação de conversores, essa diferença pode alterar a forma de compartilhamento de potência e a interação entre equipamentos. Entretanto, a adoção de GFM não elimina a necessidade de coordenação entre conversores, controles de corrente, limites de potência e proteção sistêmica. A literatura sobre *MMC-HVDC* destaca que a estrutura modular e as dinâmicas internas devem ser consideradas em conjunto com o controle externo (DEBNATH *et al.*, 2015; RAJU *et al.*, 2019).

Do ponto de vista da estabilidade, a contribuição de uma estratégia GFM depende de sua capacidade efetiva de modificar a potência ativa e reativa durante a perturbação. O *droop* oferece uma relação de compartilhamento baseada em desvios de potência, enquanto a VSM inclui estados dinâmicos associados à inércia virtual e ao amortecimento. A escolha entre essas estratégias deve considerar a resposta transitória desejada, a interação com outros controladores e a capacidade de energia disponível. Os estudos de estabilidade de *MMC-HVDC* com formação de rede mostram que a parametrização e a interoperabilidade dos controles são elementos centrais da análise (LOURENÇO *et al.*, 2021).

A aplicação em elos *HVDC* destinados à integração de geração renovável também requer atenção à operação coordenada dos terminais. O suporte de frequência no lado CA não

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

pode ser analisado isoladamente da regulação do barramento CC, da potência transmitida e dos limites de cada conversor. Em uma implementação real, a referência de potência do elo, a capacidade de modulação, a reserva de energia e as restrições térmicas dos semicondutores devem ser compatibilizadas. A integração de parques eólicos offshore por *HVDC*, portanto, demanda avaliação conjunta do sistema de transmissão e dos sistemas CA conectados (LOURENÇO *et al.*, 2021).

Por fim, a utilização de indicadores comuns é indispensável para uma comparação tecnicamente válida. Os cenários devem manter constantes as condições iniciais e a perturbação aplicada, variando apenas a estratégia de controle ou o parâmetro que se deseja investigar. Recomenda-se registrar séries temporais de frequência, *ROCOF*, tensão, potência ativa e reativa, corrente dos braços e tensão dos capacitores, além de informar os valores de *SCR*, inércia equivalente e limites operacionais. Sem esses dados, a análise permanece qualitativa e não permite atribuir superioridade quantitativa a uma estratégia específica. Essa delimitação preserva a consistência entre método, resultados e conclusão (KUNDUR, 1994; DEBNATH *et al.*, 2015; LOURENÇO *et al.*, 2021).

3.13. Limitações do estudo e etapas futuras

A principal limitação do estudo é a ausência de validação computacional própria. Não foram executadas simulações completas no *MATLAB/Simulink*, nem foram disponibilizados arquivos de modelo, parâmetros integrais dos controladores ou séries temporais que permitam reproduzir resultados numéricos. Por essa razão, as conclusões são restritas à revisão bibliográfica e à análise conceitual.

A literatura permite identificar diferenças estruturais entre GFL, GFM-*droop* e GFM-VSM, mas não sustenta uma afirmação geral de superioridade de uma estratégia em todas as condições de operação. O desempenho depende da impedância da rede, da sintonia dos controles, da interação entre conversores, da margem de potência, dos limites de corrente e do balanço de energia dos submódulos (LOURENÇO *et al.*, 2021; DADJO TAVAKOLI *et al.*, 2020).

Uma validação futura deverá definir o sistema elétrico equivalente, os parâmetros dos terminais CA e CC, a topologia do MMC, as características dos submódulos e os ganhos dos controladores. Também deverá explicitar as condições iniciais, os eventos aplicados, o tempo de simulação e os critérios de avaliação, de modo a permitir a reprodução independente dos resultados (DEBNATH *et al.*, 2015; BERGNA-DIAZ; SUUL; D'ARCO, 2018; SHARIFABADI *et al.*, 2016).

Recomenda-se comparar GFL, GFM-*droop* e GFM-VSM sob condições iniciais e perturbações equivalentes, considerando redes fortes e fracas, diferentes níveis de inércia,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

degraus de carga, perda de geração e faltas. Devem ser registradas frequência, *ROCOF*, tensão, potência ativa e reativa, correntes dos braços e tensões dos capacitores. A relação com o ERAC deverá ser avaliada com os ajustes reais de proteção, sem pressupor que o controle GFM impeça sua atuação (KUNDUR, 1994; LOURENÇO *et al.*, 2021; PRIETO-ARAUJO *et al.*, 2017).

A representação de parques eólicos por modelos equivalentes também deverá explicitar suas simplificações, especialmente quanto à dinâmica das turbinas, aos controles dos conversores e à variabilidade do recurso primário. A coordenação entre os terminais do elo *HVDC* e a interação com outros conversores deverão integrar a avaliação (RYNDZIONEK; SIENKIEWICZ, 2020; ARRILLAGA; LIU; WATSON, 2007).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo analisou, por revisão bibliográfica e abordagem qualitativa, a aplicação de estratégias *Grid-Forming* em conversores *MMC-HVDC* para integração de fontes renováveis em redes elétricas de baixa inércia. Sua contribuição consiste em relacionar a formação de referência de tensão e frequência às restrições próprias do MMC, destacando que a estabilidade externa da rede depende também do controle de energia dos submódulos, das correntes internas e da coordenação dos terminais CA e CC (DEBNATH *et al.*, 2015; LOURENÇO *et al.*, 2021; RAJU *et al.*, 2019).

A literatura consultada indica que a redução da inércia equivalente pode aumentar a taxa inicial de variação da frequência após um desequilíbrio entre geração e demanda. Entretanto, a severidade do evento não depende apenas da inércia: a reserva de potência, a resposta dos controles, a característica das cargas, a força da rede e a localização da perturbação também influenciam a trajetória da frequência. Por isso, *ROCOF*, nadir e tempo de recuperação devem ser avaliados em conjunto (KUNDUR, 1994; LOURENÇO *et al.*, 2021).

A comparação conceitual evidencia que o GFL utiliza a tensão da rede como referência de sincronização, enquanto o GFM estabelece uma referência interna de tensão e frequência. O *droop* promove compartilhamento de potência por relações de estatismo; a VSM acrescenta uma dinâmica associada à inércia virtual e ao amortecimento. Nenhuma dessas estratégias é universalmente superior: o desempenho depende da sintonia, da impedância da rede, da interação entre conversores e dos limites operacionais (LOURENÇO *et al.*, 2021).

No MMC, a resposta GFM precisa ser compatível com o balanço energético dos submódulos, o equilíbrio das tensões dos capacitores e os limites de corrente dos braços. A energia armazenada pode influenciar a resposta transitória, mas não representa uma fonte

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

ilimitada de potência. Adicionalmente, o controle de um terminal *HVDC* deve ser coordenado com o terminal remoto e com a regulação do barramento CC (DEBNATH *et al.*, 2015; SAAD *et al.*, 2014; RAJU *et al.*, 2019).

A relação entre o suporte GFM e a atuação do ERAC permanece como questão a ser investigada por simulação com os ajustes reais de proteção. O suporte do conversor pode modificar a evolução da frequência, mas não substitui os mecanismos de proteção sistêmica. Sem os parâmetros do sistema e a lógica de atuação do ERAC, não é possível concluir que a estratégia evitará o desligamento de carga.

Conclui-se que o *MMC-HVDC* com controle GFM apresenta potencial para contribuir ao suporte dinâmico de redes de baixa inércia, desde que a estratégia seja coordenada com os controles internos do conversor, com o elo CC e com os demais recursos conectados à rede. A contribuição quantificável ainda precisa ser demonstrada por um modelo computacional validado, com parâmetros rastreáveis, cenários equivalentes e indicadores reprodutíveis. Essa validação constitui a principal continuidade necessária para transformar a avaliação conceitual em evidência mensurável (LOURENÇO *et al.*, 2021; DEBNATH *et al.*, 2015).

REFERÊNCIAS

ARRILLAGA, J.; LIU, Y. H.; WATSON, N. R. *Flexible power transmission: the HVDC options. Wiley, 2007.*

BERGNA-DIAZ, G.; SUUL, J. A.; D'ARCO, S. Energy-based state-space representation of *modular multilevel converter*s with a constant equilibrium point in steady-state operation. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 33, p. 4832–4851, 2018. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?queryText=Energy-based%20state-space%20representation%20of%20modular%20multilevel%20converters. Acesso em: 29 out. 2026.

DADJO TAVAKOLI, S.; PRIETO-ARAUJO, E.; SÁNCHEZ-SÁNCHEZ, E.; GOMIS-BELLMUNT, O. *Interaction assessment and stability analysis of the MMC-based VSC-HVDC link*. Energies, v. 13, art. 2075, 2020.

DEBNATH, Suman; QIN, Jiangchao; BAHRANI, Behrooz; SAEEDIFARD, Maryam; BARBOSA, Peter. *Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: a review*. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 30, n. 1, p. 37–53, 2015. DOI: https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2309937. Acesso em: 29 out. 2026.

KUNDUR, Prabha. *Power system stability and control*. New York: McGraw-Hill, 1994.

LOURENÇO, Luís; PEREZ, Filipe; IOVINE, Alessio; DAMM, Gilney; MONARO, Renato M.; SALLES, Maurício B. C. *Stability analysis of grid-forming MMC-HVDC transmission connected to legacy power systems.* Energies, v. 14, n. 23, art. 8017, 2021. DOI:

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

https://doi.org/10.3390/en14238017. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1073/14/23/8017. Acesso em: 29 out. 2026.

PRIETO-ARAUJO, E.; JUNYENT-FERRÉ, A.; COLLADOS-RODRÍGUEZ, C.; CLARIANA-COLET, G.; GOMIS-BELLMUNT, O. *Control design of Modular Multilevel Converters in normal and AC fault conditions for HVDC grids. Electric Power Systems Research, v. 152, p. 424–437, 2017.*

RAJU, M. N.; SREEDEVI, J.; MANDI, R. P.; MEERA, K. *Modular multilevel converter*s technology: *A comprehensive study on its topologies, modelling, control and applications.* IET Power Electronics, v. 12, p. 149–169, 2019. DOI: https://doi.org/10.1049/iet-pel.2018.5734. Disponível em: https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/iet-pel.2018.5734. Acesso em: 29 out. 2026.
RYNDZIONEK, Roland; SIENKIEWICZ, Łukasz. Evolution of the *HVDC* link connecting offshore wind farms to onshore power systems. Energies, v. 13, n. 8, art. 1914, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/en13081914. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1073/13/8/1914. Acesso em: 29 out. 2026.

SAAD, H.; GUILLAUD, X.; MAHERSEREDJIAN, J.; DENNETIERE, S.; NGUEFEU, S. *MMC capacitor voltage decoupling and balancing controls. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 30, p. 704–712, 2014.* Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?queryText=MMC%20capacitor%20voltage%20decoupling%20and%20balancing%20controls. Acesso em: 29 out. 2026.

SHARIFABADI, Kamran; HARNEFORS, Lennart; NEE, Hans-Peter; NORRGA, Staffan; TEODORESCU, Remus. *Design, Control, and Application of Modular Multilevel Converters for HVDC Transmission Systems. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.*

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.