

Sistema HVDC Baseado na Conexão Série de Conversores Fonte de Corrente Comutados pela Linha e Autocomutados

Eduardo P. Thomaz* Pedro G. Barbosa**
Pedro M. Almeida** Marcelo A. Tomim**

* Operador Nacional do Sistema Elétrico, Rio de Janeiro, Brasil
(e-mail: eduardo.thomaz@ons.org.br)

** Departamento de Energia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil (e-mail: pedro.gomes@ufjf.edu.br)

Abstract: This paper presents a study of a high-voltage DC (HVDC) transmission system based on the series connection of a line- and a self-commutated current source converters to reduce the reactive power demanded by the converter stations. A mathematical model based on the concept of switching function is used to represent the non-linear behaviour of the line- and self-commutated converters stations in such a way to derive relations to calculate the optimal angles for the operation of both HVDC stations. The performance of the proposed hybrid HVDC system was verified on the basis of a high-power system case study, involving static and dynamic analysis on PSCAD/EMTDC and MATLAB/Simulink programs. Digital simulation results are presented to demonstrate the effectiveness of the proposed configuration in comparison with a conventional LCC-HVDC transmission system.

Resumo: Este artigo apresenta um estudo de um sistema de transmissão CC de alta tensão (HVDC) baseado na conexão em série de conversores de fonte de corrente autocomutados e comutados pela linha com objetivo de reduzir a potência reativa demandada pelas estações conversoras. Um modelo matemático baseado no conceito de função de chaveamento é usado para representar o comportamento não linear das estações conversoras comutadas pela linha e autocomutadas, de modo a derivar relações para calcular os ângulos ideais para a operação de ambas as estações HVDC. O desempenho do sistema HVDC híbrido proposto foi verificado com base em um estudo de caso de sistema de alta potência, envolvendo análises estáticas e dinâmicas nos programas PSCAD/EMTDC e Matlab/Simulink. Os resultados da simulação digital são apresentados para demonstrar a eficácia da configuração proposta em comparação com um sistema de transmissão convencional LCC-HVDC.

Keywords: HVDC Transmission, CSC-HVDC, Reactive Power Compensation.

Palavras-chaves: Transmissão HVDC, CSC-HVDC, Compensação de Potência Reativa.

1. INTRODUÇÃO

A integração de usinas eólicas *offshore* à rede elétrica do continente através da transmissão em corrente alternada alta-tensão (HVAC) é opção mais utilizada em parques localizados próximos à costa (Pan et al., 2006). No entanto, quando a capacidade da fazenda eólica aumenta ou ela está localizada em um local remoto, a transmissão em corrente contínua alta-tensão (VSC-HVDC ou LCC-HVDC) surge como uma opção. A tecnologia VSC-HVDC oferece vantagens como controle independente dos fluxos de potências ativa e reativa, capacidade de *black-start*, baixa injeção harmônicos, além de não apresentar problemas de falhas de comutação. Estas características indicam que a tecnologia VSC-HVDC é mais competitiva para transmissão *offshore* (Ackermann et al., 2005). No entanto, quando a potência a ser transmitida é superior a 600 MW e a distância a costa é maior que 80 km, a tecnologia LCC-HVDC é uma opção tecnicamente competitiva (Anaya-Lara et al., 2014).

Nas últimas décadas, os sistemas de transmissão HVDC baseados em conversores fonte de corrente comutados pela linha (LCC) se consolidaram como uma das tecnologias mais viáveis para transmissão de energia através de longas distâncias. A eficiência desses sistemas e a possibilidade da conexão assíncrona fez os LCC-HVDC assumirem um papel de destaque na interconexão de grandes plantas de energia. Paralelamente, a controlabilidade desses sistemas provê benefícios adicionais como maior estabilidade angular e de frequência dos sistemas CA. No entanto, uma das principais desvantagens da tecnologia LCC-HVDC é a grande quantidade de potência reativa demandada pelas estações conversoras. Essa característica faz com que sejam necessários usar bancos de capacitores, compensadores estáticos ou síncronos para minimizar problemas de instabilidade de tensão e falhas de comutação (Franken and Andersson, 1990). Não obstante, a conexão desses equipamentos adicionais aumentam o custo e tamanho das estações conversoras, além de poderem causar ressonância harmônica na rede CA.

Para reduzir os custos de instalação e manutenção, a subestação *offshore* deve ser projetada para ter tamanho, peso e quantidade mínimos de equipamentos. Como os filtros CA e os bancos de capacitores correspondem a uma parte significativa do tamanho da subestação (Blasco-Gimenez et al., 2012), o excesso de potência reativa demandada pelas estações conversoras LCC-HVDC representa uma de suas principais desvantagens para a sua utilização para conexão *offshore* de usinas eólicas

Nos últimos anos, muitos autores têm apresentado alternativas para minimizar o problema associado a demanda de potência reativa das estações conversoras dos sistemas HVDC. Na maioria dos trabalhos é proposto o emprego das modernas tecnologias VSC-HVDC (*Voltage Source Converter*) e CCC (*Capacitor Commutated Converter*). Guo et al. (2012) propuseram uma conexão híbrida de LCC-HVDC e VSC-HVDC no mesmo barramento, aumentando a relação de curto circuito equivalente (SCR) do sistema CA. Lebre et al. (2018) apresentaram uma configuração híbrida usando um conversor LCC na estação retificadora e um conversor MMC (*Modular Multilevel Converter*) na estação inversora. Além de mitigar falhas de comutação na estação inversora, a conexão proposta facilita a configuração multiterminal. Já em (Balzer and Muller, 2001), os autores fizeram uma comparação entre os sistemas LCC-HVDC e CCC mostrando os benefícios do emprego dos capacitores de comutação série quanto ao consumo de potência reativa e falhas de comutação.

Este artigo abordará o problema de potência reativa investigando o uso de conversores comutados por linha (LCC) em conjunto com autocomutados (SCC), para que a potência reativa possa ser equilibrada nas terminais estações conversoras. Um modelo matemático simplificado baseado no conceito de funções de chaveamento será usado para representar o comportamento não linear das estações conversoras comutadas pela linha e autocomutadas, de modo a derivar relações para calcular os ângulos ideais para a operação de ambas as estações HVDC. O desempenho do sistema HVDC híbrido proposto será verificada com base em um estudo de caso nos programas PSCAD/EMTDC e MATLAB/SIMULINK de um sistema de alta potência. Resultados das simulação digitais serão apresentados para demonstrar a eficácia da configuração proposta em comparação com um sistema HVDC convencional.

2. RELAÇÕES BÁSICAS DOS CONVERSORES FONTE DE CORRENTE

A Figura 1 (a) e (b) mostra as topologias básicas conversores fonte de corrente comutados pela linha (LCC) e autocomutados (SCC). Esses conversores são conectados ao sistema CA por um transformador representado pelas indutâncias de dispersão L_s . Na modelagem matemática que será apresentada nesta seção, a indutância de alisamento L_d foi considerada grande o bastante para que a corrente CC possa ser considerada livre de ondulações.

2.1 Conversores fonte de corrente comutados pela linha

A Figura 1(a) ilustra a topologia do LCC formado baseado em tiristores. Na prática, cada interruptor semiconductor é formado pela conexão de vários SCR (*Silicon Controlled*

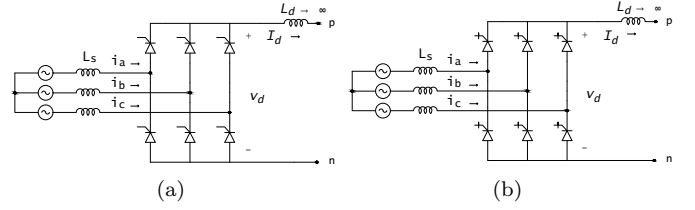


Figura 1. Topologias das pontes trifásicas de seis pulsos: (a) LCC, (b) SCC.

Rectifier) em série. Estes interruptores semicondutores permitem que o valor médio da tensão CC de saída do conversor seja controlada pelo ângulo de disparo α dos tiristores. Já do lado CA, o ângulo α irá representar um ângulo de atraso entre a componente fundamental das correntes de linha e a tensão de fase nos terminais do conversor. Esta característica implica que as válvulas LCC irão demandar potência reativa da rede CA.

No funcionamento do LCC como retificador, a indutância da fonte CA não permite que a comutação entre fases ocorra instantaneamente. Esse período é representado pelo ângulo de sobreposição μ indicado na Figura 2(a). Além de reduzir o valor da tensão CC de saída, este tempo finito de comutação aumenta a demanda de potência reativa nos terminais CA do conversor. No funcionamento do LCC como inversor, o ângulo de extinção γ é definido como período remanescente para que a válvula seja polarizada inversamente após ser acionada, portanto $\gamma = (\pi - \alpha_i - \mu_i)$. Estes ângulos estão ilustrados na Figura 2(b).

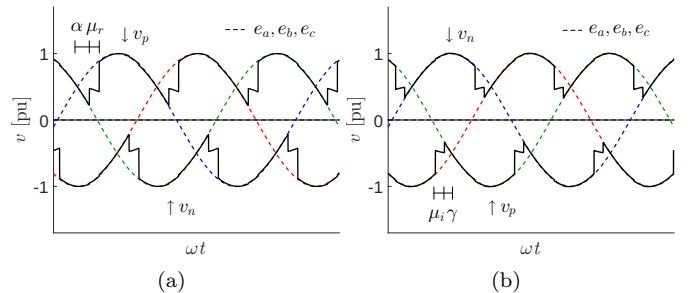


Figura 2. Formas de onda das tensões CA de entrada e das tensões CC dos polos positivo e negativo do LCC: (a) retificador, (b) inversor.

As relações que descrevem o funcionamento do LCC são encontradas em detalhe em (Kundur et al., 1994; Arrillaga and Smith, 1998). Considerando o atraso devido a comutação e o efeito de um transformador conversor de tap variável sob carga (LTC) conectado aos terminais do LCC, pode-se escrever a seguinte expressão para a tensão CC média de saída do retificador:

$$V_{dr}^{lcc} = \left(\frac{3\sqrt{2}a_r^{lcc}E_r^{lcc}}{\pi} \right) \cos \alpha - R_{cr}I_d, \quad (1)$$

onde α é o ângulo de disparo dos tiristores do LCC, a_r^{lcc} é a relação de tap do transformador do retificador, E_r é o valor eficaz da tensão entre fases no enrolamento secundário do transformador, R_{cr} é a resistência de comutação do retificador e I_d é o valor médio da corrente no elo CC.

Já para o LCI (inversor), pode-se escrever:

$$V_{di}^{lcc} = \left(\frac{3\sqrt{2}a_i^{lcc}E_i^{lcc}}{\pi} \right) \cos \gamma - R_{ci}I_d \quad (2)$$

onde γ é o ângulo de extinção dos tiristores do LCI, $a_i^{\ell cc}$ é a relação de tap do transformador do inversor, E_i é o valor eficaz da tensão entre fases no enrolamento secundário do transformador, R_{ci} é a resistência de comutação do inversor e I_d é o valor médio da corrente no elo CC.

2.2 Conversores fonte de corrente autocomutados

A Figura 1(b) ilustra a topologia de um conversor fonte de corrente trifásico, que emprega interruptores autocomutados tais como GTO (*Gate Turn-off Thyristors*) ou IGCT (*Integrated Gate-Commutated Thyristors*) em sua estrutura. Esses interruptores, quando polarizados diretamente, permitem o controle do início e do final do período de condução através de pulsos aplicados em seus terminais de *gate*. Essa característica foi usada para projetar uma estratégia de disparo para que o conversor possa ser acionado em avanço. Desse modo, os SCC poderão dar suporte de potência para a rede CA.

Para o funcionamento do SCC como retificador foi definido o ângulo de corte λ , medido a partir da referência de tensão de comutação, conforme ilustrado na Figura 3(a). Já para o funcionamento do SCC como inversor, é conveniente definir um ângulo análogo para γ , como um ângulo de ignição $\xi = \pi - \lambda_i$, conforme representado na Figura 3(b). Matematicamente, os ângulos λ e ξ podem ser considerados negativos.

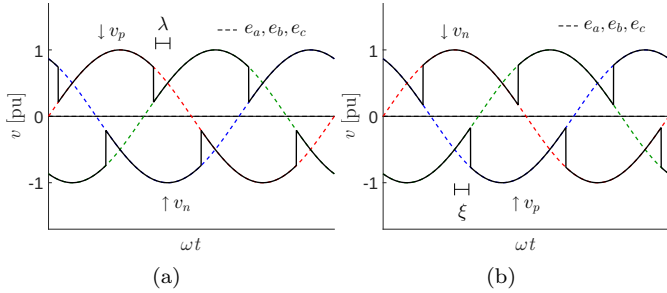


Figura 3. Formas de onda das tensões CA de entrada e das tensões CC dos polos positivo e negativo do SCC: (a) retificador, (b) inversor.

Por conta da característica autocomutada desses conversores, é necessário o emprego de um banco de capacitores chamado *capacitor desviador*, que deve ser conectado entre os terminais do transformador conversor e do SCC. Este banco assume temporariamente a corrente indutiva da rede CA, permitindo a comutação satisfatória entre duas válvulas de um mesmo corredor (Sood, 2006). Desse modo, a tensão CC para o SCC operando como retificador é dada por:

$$V_{dr}^{scc} = \frac{3\sqrt{2}a_r^{scc}E_r^{scc}}{\pi} \cos \lambda, \quad (3)$$

onde λ é o ângulo de corte do GTO para o funcionamento do SCC como retificador.

Enquanto que, a tensão CC para o SCC operando como inversor é dada por:

$$V_{di}^{scc} = \frac{3\sqrt{2}a_i^{scc}E_i^{scc}}{\pi} \cos \xi \quad (4)$$

onde ξ é o ângulo de ignição dos GTO para o funcionamento do SCC como inversor.

2.3 O conversor fonte de corrente quasi-24 pulsos

A Figura 4 ilustra a associação de conversores investigada neste trabalho. As estações retificadora e inversora são formadas pela associação série de duas pontes de 12 pulsos, uma LCC e outra SCC, conectada no mesmo barramento, para que a potência reativa exigida possa ser equilibrada. Essa topologia mantém a característica fonte de corrente dos conversores, já que são conectadas em série através de seus terminais CC, fornecendo ainda alguma flexibilidade de controle no lado CA. Uma análise das componentes harmônicas presentes nos terminais CA e CC desses conversores pode ser feita usando os conceitos de funções de chaveamento (Alves et al., 2001). Idealmente, a ordem dos harmônicos característicos observada nos terminais dos conversores de 12 pulsos é dado pela relação $(12p \pm 1)$, para as correntes CA, e $12n$, para a tensão CC, sendo $n = 1, 2, 3, \dots$

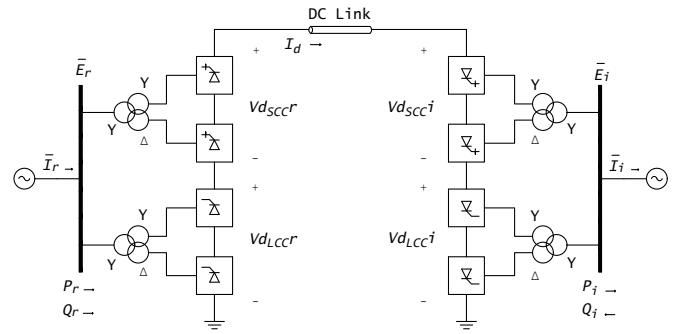


Figura 4. Sistema LSC-HVDC formado pela associação de conversores de 12 pulsos LCC e SCC.

A Figura 5(a) e 5(b) ilustra as formas de onda idealizadas das tensões nos terminais CC das estações retificadora e inversora de *quasi*-24 pulsos da Figura 4. Estas formas de onda irão sofrer alterações com a variação dos ângulos de disparo e extinção, e quando são considerados os períodos de comutação das válvulas dos LCC.

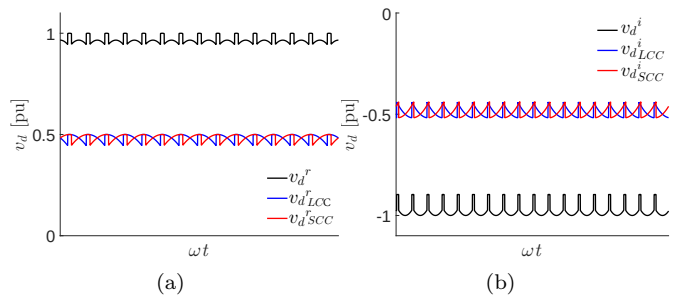


Figura 5. Formas de onda CC das tensões nos terminais CC dos conversores de *quasi*-24 pulsos: (a) Retificador $\alpha = \lambda = 12^\circ$ e $\mu_r = 0^\circ$, (b) Inversor $\alpha = \lambda = 163^\circ$ e $\mu_i = 0^\circ$.

Uma vez conhecidas as tensões terminais de cada conversor, os fluxos de potência ativas nos terminais das estações retificadora e inversora da Figura 4 são dados por:

$$P_r = P_r^{\ell cc} + P_r^{scc} = V_{dr}^{\ell cc} I_d + V_{dr}^{scc} I_d \quad (5)$$

$$P_i = P_i^{\ell cc} + P_i^{scc} = V_{di}^{\ell cc} I_d + V_{di}^{scc} I_d, \quad (6)$$

e a potência reativa demandada nos terminais das estações retificadora e inversora são calculadas como se segue:

$$Q_r = Q_r^{\ell cc} + Q_r^{\ell cc} = P_r^{\ell cc} \tan \phi_r + P_r^{\ell cc} \tan \lambda \quad (7)$$

$$Q_i = Q_i^{\ell cc} + Q_i^{\ell cc} = P_i^{\ell cc} \tan \phi_i + P_i^{\ell cc} \tan \xi \quad (8)$$

onde os ângulos λ e ξ , por definição, são negativos e,

$$\tan \phi_r = \frac{\sin 2(\alpha + \mu_r) - 2\mu_r - \sin(2\alpha)}{\cos 2(\alpha + \mu_r) - \cos(2\alpha)} \quad (9)$$

$$\tan \phi_i = \frac{2\mu_i + \sin(2\gamma) - \sin 2(\gamma + \mu_i)}{\cos(2\gamma) - \cos 2(\gamma + \mu_i)} \quad (10)$$

3. SISTEMA TESTE

O objetivo desta seção é verificar o comportamento em regime permanente e dinâmico do sistema LSC-HVDC, também fazendo comparações com o sistema LCC-HVDC convencional. O sistema de teste é um elo HVDC bipolar de 3150 MW, ± 600 kV, semelhante ao sistema de transmissão usado em Itaipu. Por simplicidade, apenas um polo será implementado, uma vez que os dois polos devem ter características semelhantes. Os principais parâmetros do sistema original são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros do LCC-HVDC.

LCC-HVDC				
1575 MW, 600 kV, 2625 A				
	Retificador		Inversor	
600 kV LCC	Transformador $S_b=1884$ MVA $X_t=17.8\%$	$\alpha_{nom}=15^\circ$	Transformador $S_b=1800$ MVA $X_t=17.2\%$	$\gamma_{nom}=17^\circ$
Lado CA	Compensação shunt 750 Mvar		Compensação shunt 750 Mvar	
Lado CC	$R_d=10.5\ \Omega$ $L_d=1235.9\text{ mH}$ $C_d=25\ \mu\text{F}$			

Para reduzir o consumo da potência reativa nas estações retificadora e inversora, os parâmetros do sistema LSC-HVDC da Tabela 2 foram ajustados de modo que 75 % da potência ativa total é processada pelo LCC e 25 % pelo SCC. Além disso o SCC irá fornecer também uma parte da potência reativa demandada pelo conversor LCC.

Tabela 2. Parâmetros do LSC-HVDC.

LSC-HVDC				
1575 MW, 600 kV, 2625 A				
	Retificador		Inversor	
450 kV LCC	Transformador $S_b=1400$ MVA $X_t=17\%$	$\alpha_{nom}=15^\circ$	Transformador $S_b=1300$ MVA $X_t=17\%$	$\gamma_{nom}=18^\circ$
150 kV SCC	Transformador $S_b=470$ MVA $X_t=17\%$	$\lambda_{nom}=30^\circ$	Transformador $S_b=460$ MVA $X_t=17\%$	$\xi_{nom}=35^\circ$
Lado CA	Compensação shunt 240 Mvar		Compensação shunt 240 Mvar	
Lado CC	$R_d=10.5\ \Omega$ $L_d=1235.9\text{ mH}$ $C_d=25\ \mu\text{F}$			

O valor dos ângulos do LSC-HVDC foi proposto para aumentar a injeção de potência reativa, otimizando o suporte

de potência reativa pelo SCC. Portanto, a compensação da potência reativa devido ao banco *shunt* é limitada pelos filtros harmônicos que ainda são necessários, já que o objetivo neste caso não foi minimizar o THD.

3.1 Análise em regime permanente

Uma rotina no programa MATLAB foi implementada usando as equações características dos conversores e as relações de potência, para calcular o consumo de potência reativa e os ângulos de comutação considerando o tap nominal dos transformadores do conversor. Na Tabela 3 são apresentados os resultados do sistema LCC-HVDC. Observa-se que a demanda de potência reativa nas estações retificadora e inversora é maior que metade da potência ativa transmitida pelo elo, caracterizando um comportamento típico dos sistemas LCC-HVDC (Sood, 2006).

Tabela 3. Resultados de regime permanente para o sistema LCC-HVDC.

	P [MW]	Q [Mvar]	α, γ [deg]	Vd [kV]	μ [deg]	I_d [A]
Retificador	1575.0	838.6	15	600.0	22.97	2625
Inversor	1500.0	856.9	18	572.4	21.01	2625

Como explicado anteriormente, os parâmetros do sistema LSC-HVDC foram alterados de maneira que o LCC processe 75 % da potência ativa do elo, enquanto os 25 % restante será processado pelo SCC, que adicionalmente fornece parte da potência reativa requerida pelo conversor LCC, já que os filtros passivos já injetam alguns Mvar para a rede CA. Os ângulos de disparo e extinção foram propostos para aumentar a injeção de potência reativa do SCC, otimizando a utilização das válvulas autocomutadas.

Tabela 4. Resultados de regime permanente para o LSC-HVDC.

	Tipo	P_r [MW]	Q_r [Mvar]	α, λ [deg]	V_{dr} [kV]	μ_r [deg]	I_{dr} [A]
Retificador	LCC	1181.3	617.3	15	450	22.29	2625
	SCC	393.7	-227.3	30	150	0.0	2625
	Total	1575.0	390.0	-	600	-	2625
	Tipo	P_i [MW]	Q_i [Mvar]	γ, ξ [deg]	V_{di} [kV]	μ_i [deg]	I_{di} [A]
Inversor	LCC	1127.0	648.2	18	429.3	21.47	2625
	SCC	373.0	-258.2	35	143.1	0.0	2625
	Total	1500.0	390.0	-	572.4	-	2625

A comparação dos resultados apresentados nas Tabela 3 e Tabela 4 permite concluir que o LSC-HVDC possibilitou uma redução de 53,49 % da potência reativa demandada pela estação retificadora e 54,49 % pela inversora, correspondendo a 448,6 Mvar e 466,9 Mvar, respectivamente. Isso mostra que o dimensionamento do conversor SCC para processar apenas 25 % da potência ativa do elo permite uma redução significativa do consumo de potência reativa nas estações conversoras.

A Figura 6(a) apresenta uma comparação entre o perfil de tensão no barramento CA para as duas tecnologias, de

acordo com a ordem de potência no elo. Na Figura 6(b) é mostrada a demanda de potência reativa em função da corrente CC, comparando o sistema LSC-HVDC proposto com o LCC-HVDC operando em dois modos distintos no inversor. Essas curvas foram obtidas considerando os modos de operação a seguir:

- (1) Sistema de transmissão baseado no LCC-HVDC
 - (a) O retificador é ajustado em controle de potência, medida no inversor;
 - (i) O inversor é operado no modo CEA (*constant extinction angle control*);
 - (ii) O inversor é operado no modo CV (*constant voltage control*);
 - (b) Compensação em derivação de 750 Mvar em ambas estações conversoras.
- (2) Sistema de transmissão baseado no LSC-HVDC
 - (a) O retificador é ajustado em controle de potência, medida no inversor;
 - (b) O inversor LCC opera com tensão CC constante, no modo CV;
 - (c) Os SCC das estações retificadora e inversora são ajustados para controlar a potência reativa para manter o fator de potência constante nos terminais das estações conversoras;
 - (d) Compensação em derivação de 240 Mvar em ambas estações conversoras.

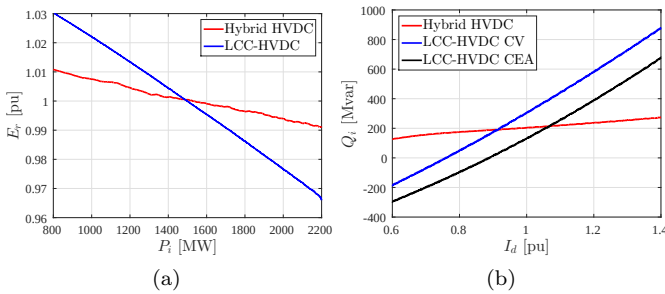


Figura 6. Comparação do comportamento estático: (a) característica $E_r \times P_i$, (b) característica $Q_i \times I_d$.

3.2 Análise dinâmica

O comportamento dinâmico de um sistema de transmissão HVDC é uma indicação de sua capacidade de recuperação após distúrbios (Barros et al., 2008). Desse modo, para avaliar o desempenho dinâmico do LSC-HVDC, o sistema mostrado na Figura 7 foi modelado no programa PSCAD/EMTDC com os parâmetros listados na Tabela 2.

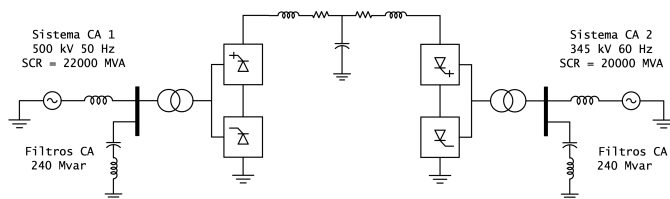


Figura 7. Diagrama simplificado do sistema implementado no programa PSCAD/EMTDC.

Os controladores são utilizados no sistema HVDC para garantir que as grandezas elétricas controladas sejam mantidas nos valores especificados, reduzindo as oscilações

causadas pela dinâmica do elo CC. Nos sistemas LCC-HVDC, os modos de controle em operação normal são, em geral, corrente constante (CC) no retificador e ângulo de extinção constante (CEA) no inversor. O modo CC controla a corrente pelo elo no valor desejado, podendo manter, por consequência, a potência ativa programada. O modo CEA mantém uma margem de comutação adequada, controlando o ângulo γ no valor nominal e também assegurando um fator de potência razoável na estação inversora (Sood, 2006; Kundur et al., 1994).

Para o sistema LSC-HVDC proposto, os controles dos conversores foram projetados de maneira semelhante aos esquema do LCC-HVDC, porém os conversores SCC irão controlar a potência reativa nas estações conversoras. Com a potência reativa controlada, a operação de tensão constante (CV) no inversor torna-se interessante, pois as variações de α_i não deterioram o fator de potência da estação inversora. Portanto, para o sistema LSC-HVDC, o retificador LCC opera no modo (CC), o inversor LCC opera no modo (CV) e os conversores SCC nas duas estações controlam a potência reativa.

As Figura 8 e Figura 9 ilustram os diagramas de blocos das malhas de controle implementadas. Os limites de ordem de corrente dependente de tensão (VDCOL) e do ângulo de disparo máximo/mínimo foram implementadas para melhorar a recuperação de condições anormais, como faltas CA e CC. Quando a tensão CA ou CC é baixa, o bloco VDCOL limita a ordem da corrente de acordo com a tensão, visando manter uma corrente mínima no elo, normalmente em 0,3 pu, além de não deteriorar o fator de potência nas estações conversoras (Kundur et al., 1994). A limitação mínima do ângulo de disparo no retificador aumenta durante condições de baixa tensão, visando aumentar a margem do controlador antes que o ângulo α atinja seu mínimo absoluto, em torno de 5 graus, evitando grandes excursões na corrente CC quando a condição de falta é eliminada. Já a limitação de ângulo máximo inversor promove a redução do ângulo de disparo quando a corrente CC está muito baixa, para auxiliar o retificador na recomposição do fluxo de potência no elo CC após perturbações.

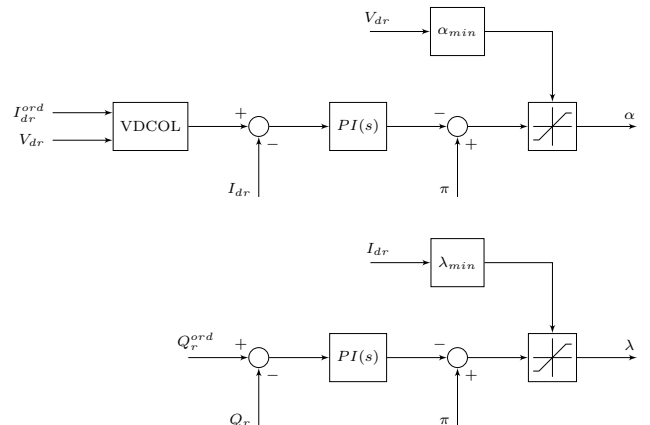


Figura 8. Diagrama de blocos dos controles da estação retificadora.

Por simplicidade, apenas a malha CV da estação inversora é mostrada na Figura 9. No entanto, o controle mestre da subestação inversora também deve dispor de um regulador

do ângulo γ para evitar falhas de comutação, bem como um regulador de corrente, para o caso quando as variáveis de controle no retificador venham a atingir seus limites operacionais. Os controladores de potência reativa foram projetados com uma constante de tempo maior, para não interferirem significativamente na dinâmica dos controladores CC e CV.

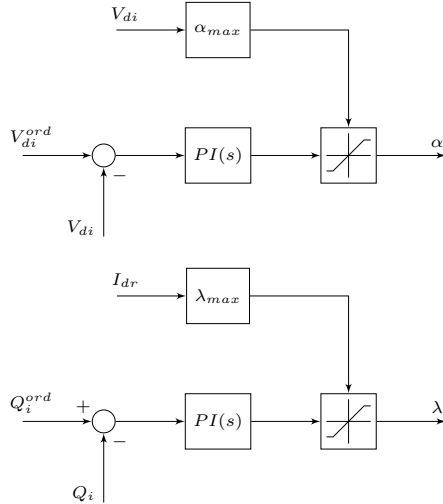


Figura 9. Diagrama de blocos dos controles da estação inversora.

Variações bruscas na corrente CC e nos ângulos de disparo das válvulas LCC causam oscilações nos blocos de controle de potência reativa compensada pelo SCC. Para evitar esse problema, o controlador de potência reativa é bloqueado em condições de baixa tensão CC, limitando os ângulos de corte dos conversores SCC de modo a contribuir para a melhora da estabilidade dos controladores e recuperação da potência CC. Esse comportamento poderá ser visualizado na formas de onda das simulações transitórias que serão apresentadas adiante.

3.3 Caso I: Desempenho dos controladores próximo das condições nominais

Para verificar o desempenho dos controladores foi realizada uma simulação no domínio do tempo usando PS-CAD/EMTDC foi implementada com as seguintes entradas de controle:

- Variação em degrau de $\pm 20\%$ da corrente CC nominal do retificador;
- Ordem de potência reativa no retificador de 150 Mvar;
- Ordem da tensão CC no inversor de 572,4 kV;
- Ordem de potência reativa no inversor de 200 Mvar.

Inicialmente o sistema CC da Figura 7 está operando nas condições nominais quando em $t = 0,50$ s o sinal de referência da corrente CC é variado em degrau para 0,8 pu. Posteriormente, em $t = 1,50$ s, o sinal de referência da corrente CC é variado novamente em degrau para 1,0 pu. A Figura 10(a) mostra a resposta do sistema frente a esta variação em degrau. Observa-se que corrente pelo elo CC atinge o novo valor de referência em menos de 200 ms. A Figura 10(b) ilustra o comportamento das potências reativas no terminais das estações retificadora e inversora, as quais apresentam uma dinâmica mais lenta

(aproximadamente 500 ms) conforme projetado. As Figuras 10(c) e 10(d) mostram respectivamente as tensões CC nos terminais dos conversores LCC e SCC das estações retificadora e inversora. Já as Figuras 10(e) e 10(f) mostram respectivamente os ângulos de disparo/corte das válvulas dos retificadores LCC e SCC das estações retificadora e os ângulos de disparo das válvulas dos inversores LCC e SCC. Pode-se observar nessas figuras que todos os parâmetros são mantidos dentro das especificações de projeto.

3.4 Caso II: Recuperação de falta CA nos terminais do inversor

Inicialmente o sistema HVDC da Figura 7 está operando nas condições nominais quando em $t = 0,50$ s uma falta trifásica é aplicada nos terminais CA do inversor. A Figura 11(a) mostra o comportamento da corrente pelo elo CC. Como a tensão CC nos terminais do inversor é muito baixa a corrente no elo cresce até aproximadamente 2 pu, enquanto o controlador do retificador aumenta o ângulo α para limitar I_d . Também é possível verificar o bloqueio do modo de controle de potência reativa nas válvulas SCC, auxiliando na recuperação da potência CC. A figura 11(b) ilustra o comportamento das potências reativas no terminais das estações retificadora e inversora. As Figuras 11(c) e 11(d) mostram respectivamente as tensões CC nos terminais dos conversores LCC e SCC das estações retificadora e inversora. As Figuras 11(e) e 11(f) mostram respectivamente os ângulos de disparo/corte das válvulas LCC e SCC da estação retificadora e os ângulos de disparo/corte das válvulas dos inversores LCC e SCC. Observa-se que quando a corrente CC está baixa, a limitação do α máximo no inversor se torna ativa para ajudar na recuperação da potência CC. O sistema LSC-HVDC apresentou um tempo para restaurar 90 % da potência transmitida antes da falta de cerca de 170 ms. No caso dos sistemas LCC-HVDC convencionais, o tempo necessário para recuperação de falhas CA na estação inversora é de aproximadamente 200 ms (Barros et al., 2008).

3.5 Caso III: Recuperação de falta CA nos terminais do retificador

Novamente o sistema LSC-HVDC da Figura 7 é posto a operar nas condições nominais quando em $t = 0,50$ s uma falta trifásica é aplicada no barramento CA do retificador. A Figura 12(a) mostra o comportamento da corrente pelo elo CC. Como a tensão CA nos terminais do retificador é muito baixa, a corrente no elo se torna nula durante a falta. Figura 12(b) ilustra o comportamento das potências reativas no terminais das estações retificadora e inversora. As Figuras 12(c) e 12(d) mostram respectivamente as tensões CC nos terminais dos conversores LCC e SCC das estações retificadora e inversora. As Figuras 12(e) e 12(f) mostram respectivamente os ângulos de disparo/corte das válvulas dos retificadores LCC e SCC das estações retificadora e os ângulos de disparo/corte das válvulas dos inversores LCC e SCC. Observa-se que o VDCOL e os limitadores α_{min} e α_{max} restringiram os ângulos de disparo das válvulas, de maneira que, após a eliminação da falta, o sistema retorna a 90% da condição de pré-falta em aproximadamente 125 ms. Neste caso também foi possível verificar a atuação do bloqueio do controle de potência reativa no momento da perturbação.

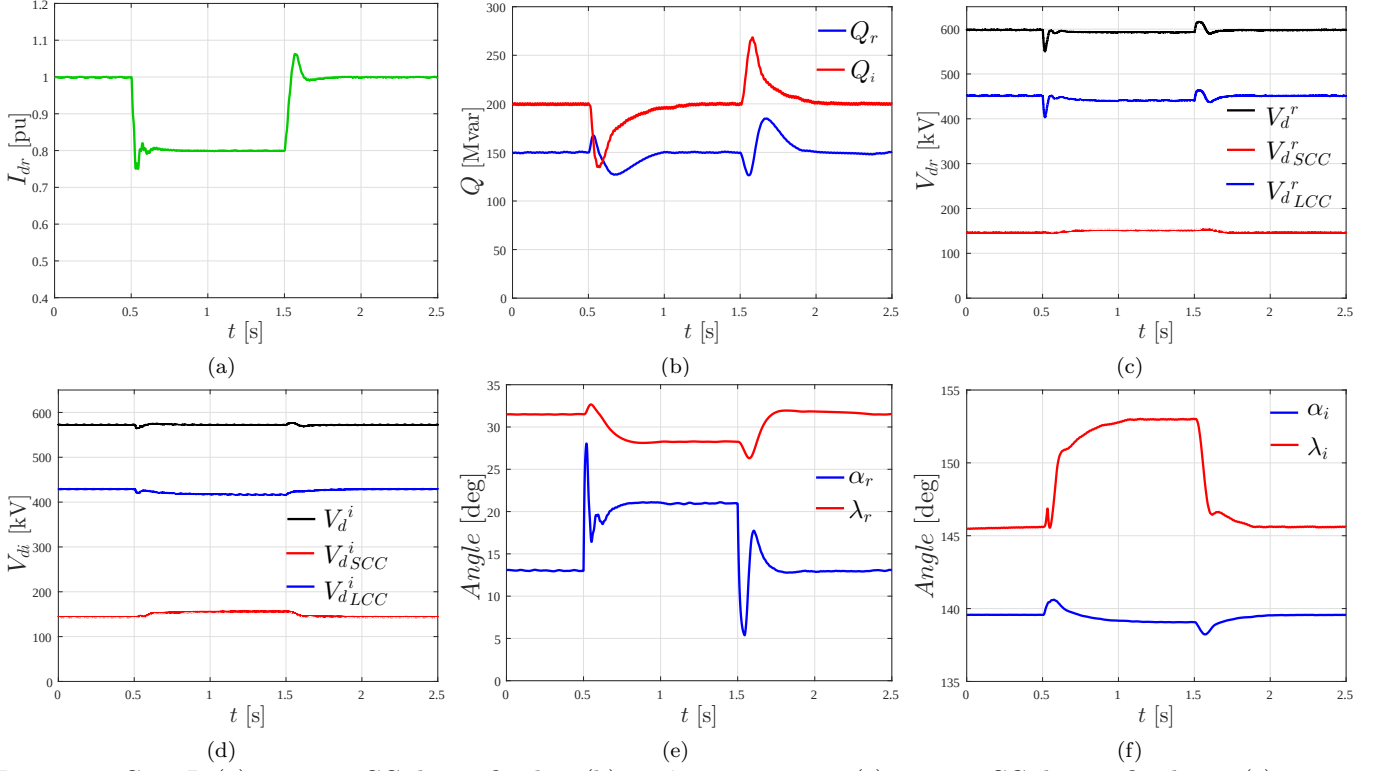


Figura 10. Caso I: (a) corrente CC do retificador, (b) potências reativas, (c) tensões CC dos retificadores, (c) tensões CC dos inversores, (d) ângulos de disparo/corte dos retificadores, (e) ângulo de disparo/corte dos inversores.

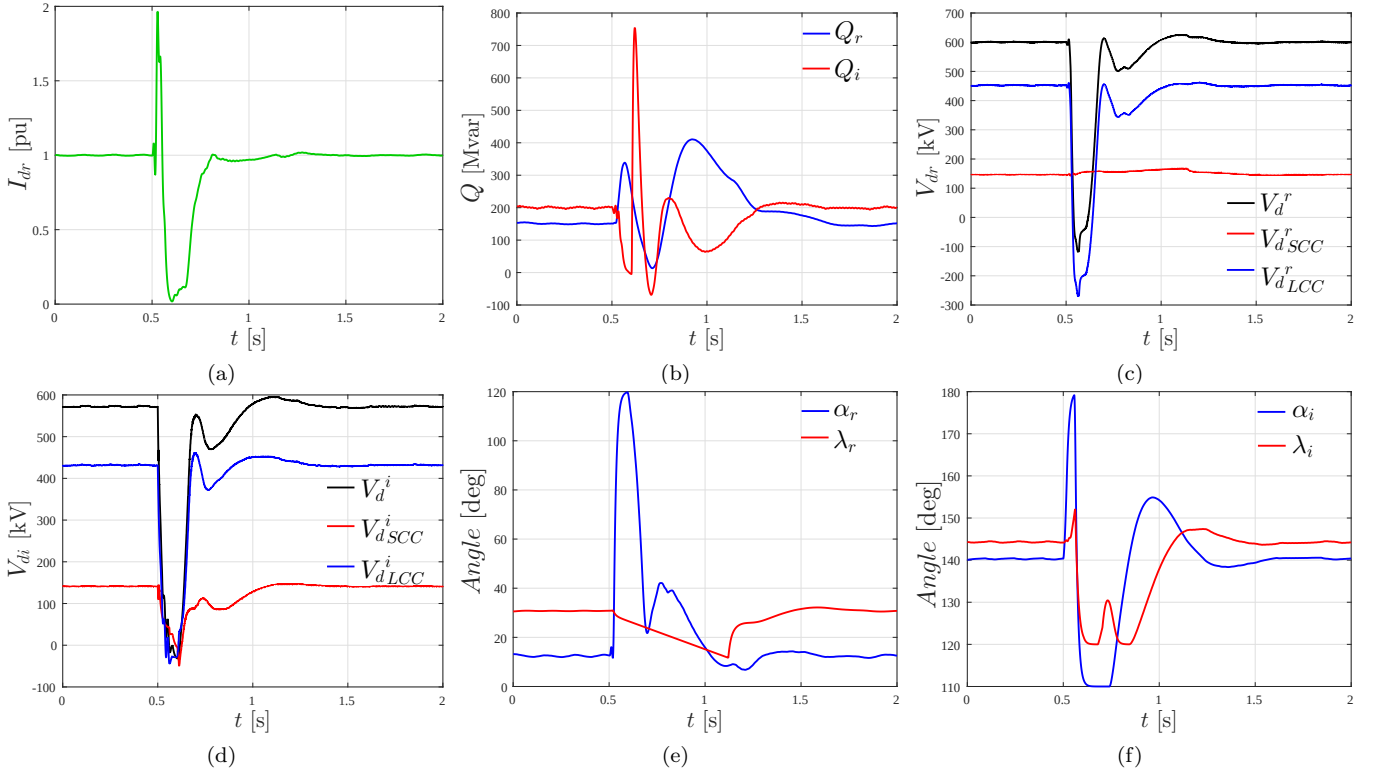


Figura 11. Caso II: (a) corrente CC do retificador, (b) potências reativas, (c) tensões CC dos retificadores, (c) tensões CC dos inversores, (d) ângulos de disparo/corte dos retificadores, (e) ângulos de disparo/corte dos inversores.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo de um sistema de transmissão HVDC híbrido baseado na conexão série de

conversores CSC comutados pela linha e autocomutados. O conversor híbrido de *quasi*-24 pulsos foi modelado e implementado nos programas MATLAB/Simulink e PSCAD/EMTDC. As simulações transitórias mostraram

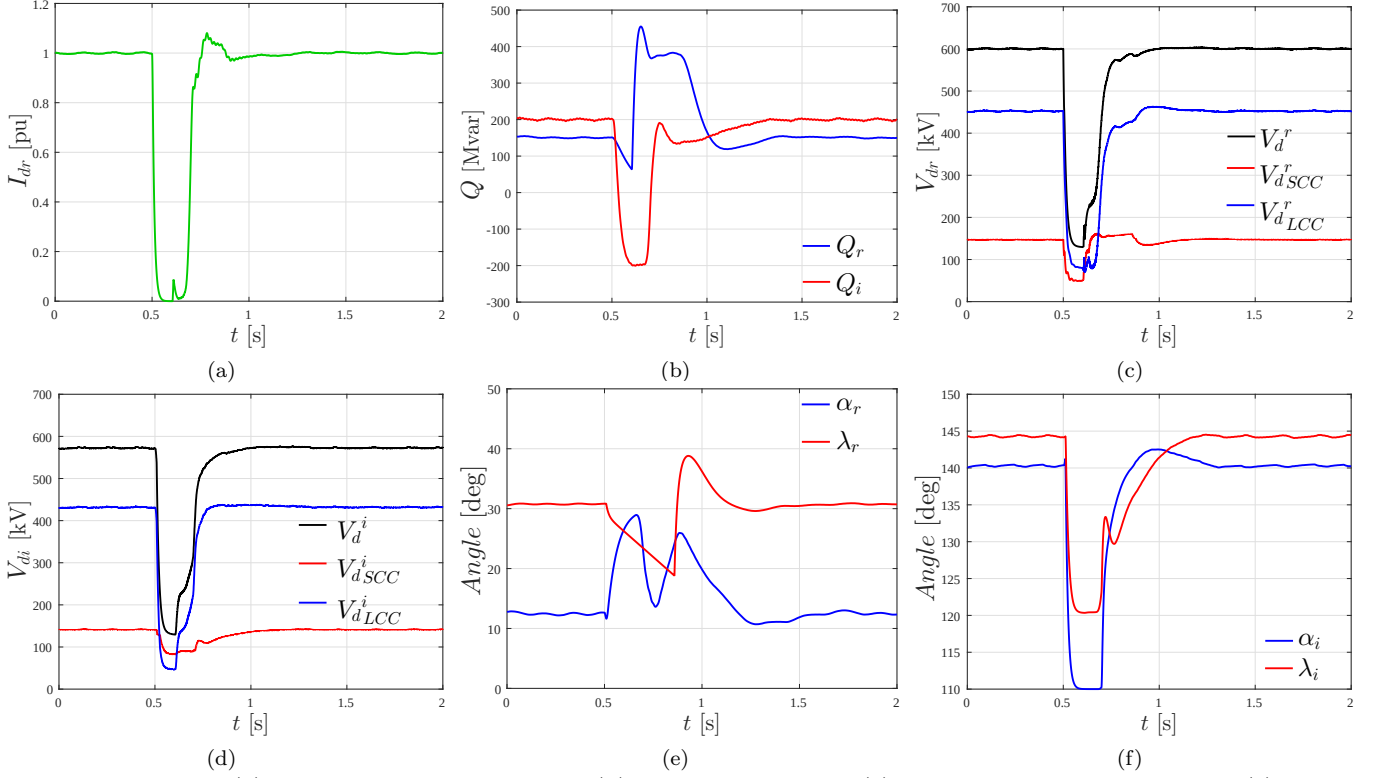


Figura 12. Caso III: (a) corrente CC do retificador, (b) potências reativas, (c) tensões CC dos retificadores, (c) tensões CC dos inversores, (d) ângulos de disparo/corte dos retificadores, (e) ângulo de disparo/corte dos inversores.

que os controles adicionais das válvulas autocomutadas não comprometeram o desempenho dinâmico do sistema HVDC, ao se empregar as estratégias de controle adequadas. O controle de potência reativa mostrou-se interessante para melhorar o perfil de tensão na rede CA e por flexibilizar o emprego de diferentes modos de controle, além de reduzir o volume de compensação reativa necessária.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Petrobras (Contrato de Cooperação: 5850.0103831.17.9) pelo suporte financeiro e ao Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) pelo apoio.

REFERÊNCIAS

- Ackermann, T. et al. (2005). *Wind power in power systems*, volume 140. Wiley Online Library.
- Alves, J.E.R., Pilotto, L.A.S., and Watanabe, E. (2001). A nonlinear generalized switching function model for SVC and TCSC devices. *IEEE Transactions on Power and Energy*, 121(5), 605–610.
- Anaya-Lara, O., Campos-Gaona, D., Moreno-Goytia, E., and Adam, G. (2014). *Offshore wind energy generation: control, protection, and integration to electrical systems*. John Wiley & Sons.
- Arrillaga, J. and Smith, B. (1998). *AC-DC power system analysis*. Energy Engineering Series. IET.
- Balzer, G. and Muller, H. (2001). Capacitor commutated converters for high power hvdc transmission. In *Seventh International Conference on AC-DC Power Transmission*, 60–65. IET.
- Barros, J.C., Azevedo, R., Carvalho, A., Brandt, D., Santo, S.E., Gomes, S., Kuisti, H., Lúrio, F.L., Macedo, N., Menzies, D., Pahalawaththa, N., Peixoto, C., Ping, W.W., and Luz, G.S. (2008). Capacitor commutated converter (CCC) HVDC interconnections: Digital modeling and benchmark circuit. *Electra (CIGRE - WG B4.34)*, 352(238), 73–80.
- Blasco-Gimenez, R., Aparicio, N., Ano-Villalba, S., and Bernal-Perez, S. (2012). LCC-HVDC connection of offshore wind farms with reduced filter banks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(6), 2372–2380.
- Franken, B. and Andersson, G. (1990). Analysis of HVDC converters connected to weak ac systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 5(1), 235–242.
- Guo, C., Zhang, Y., Gole, A.M., and Zhao, C. (2012). Analysis of dual-infeed HVDC with LCC-HVDC and VSC-HVDC. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(3), 1529–1537.
- Kundur, P., Balu, N.J., and Lauby, M.G. (1994). *Power system stability and control*, volume 7. McGraw-hill NY.
- Lebre, J., Portugal, P., and Watanabe, E. (2018). Hybrid HVDC (H2VDC) system using current and voltage source converters. *Energies*, 11(6), 1323.
- Pan, W., Chang, Y., and Chen, H. (2006). Hybrid multi-terminal HVDC system for large scale wind power. In *2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, 755–759. IEEE.
- Sood, V.K. (2006). *HVDC and FACTS controllers: applications of static converters in power systems*. Springer Science & Business Media.