

Sistema de controle distribuído para uma rede de turbinas eólicas offshore conectado por um link HVDC baseado em retificador de diodo

Danilo B. Herrera*, **Julio E. Normey-Rico****
Eduardo Galván***, **Juan M. Carrasco*****

**Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC
BRASIL (e-mail: danilodebarrosherrera@gmail.com).*

*** Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC
BRASIL (e-mail: jnormeyrico@gmail.com).*

**** Electronics department, ETSI, University of Seville,
Sevilla, SPAIN, (e-mail: egalvan@us.es, jmcarrasco@us.es)}*

Abstract: This work presents a technique for the distributed control of the AC grid in offshore wind farms based on synchronous generators. This modular rectifier comprises one or more uncontrolled modules (such as diode rectifiers), and the proposed control technique allows the connection of the offshore wind farm to the grid onshore using a diode-based HVDC rectifier. Wind power supply systems receive a reactive power reference from an external central regulator to maintain the common frequency of the AC line. The proposed external control uses the control of commercial wind turbines. This method for controlling the voltage and frequency of the local offshore grid allows the operation of the HVDC link rectifiers. PSCAD® simulations are used to prove the technical feasibility of the control and the topology concept.

Resumo: Este trabalho apresenta uma técnica para o controle distribuído da rede CA em parques eólicos offshore com base em geradores síncronos. Este retificador modular compreende um ou mais módulos não controlados (como retificadores de diodo), e a técnica de controle proposta permite a conexão do parque eólico offshore com a rede em terra usando um retificador HVDC baseado em diodo. Os sistemas de fornecimento de energia eólica recebem uma referência de potência reativa de um regulador central externo para manter a frequência comum da linha CA. O controle externo proposto utiliza o controle de turbinas eólicas comerciais. Este método para controlar a tensão e a frequência da rede offshore local permite a operação das diferentes extremidades dos retificadores do link HVDC. Simulações usando PSCAD® são utilizadas para comprovar a viabilidade técnica do controle e o conceito da topologia.

Keywords: Wind turbine offshore; diode-based rectifier; frequency control; HVDC link; wind farm.

Palavras-chaves: Turbinas eólicas offshore; retificador baseado em diodo; controle de frequência; parque eólico.

1. INTRODUÇÃO

A integração em larga escala da produção de energia elétrica offshore, como por exemplo a partir do vento, das correntes oceânicas e dos sistemas de conversão de energia das marés, são geralmente impedidos pela falta de viabilidade comercial e transferência econômica de energia para a infraestrutura da rede em terra (Blasco-Gimenez, et al., 2011). Por outro lado, os parques eólicos offshore são atualmente uma importante fonte de geração de energia elétrica, e por isso é vital a evolução da infraestrutura para conexão à rede em terra centralizada.

A produção de energia dos parques eólicos é normalmente transmitida em corrente contínua, a fim de reduzir as perdas de energia (Adapa, R. 2012). Atualmente, uma das técnicas mais sofisticadas utilizadas para atingir esse objetivo é o conversor modular multinível (MMC) (Siemens, 2013). Na verdade, os conversores de fonte de tensão (VSC) para todas

as potências de alcance são os mais usados (Flourentzou, Agelidis, and Demetriades, 2009), enquanto os conversores comutados de linha (LCC) ainda são uma opção em aplicações de alta tensão e potência (Chen, Sun, et al., 2011).

O retificador proposto baseado em diodo é uma nova opção, usando diferentes topologias para converter a energia da linha CA (corrente alternada) offshore em uma linha CC (corrente contínua). O retificador de diodo foi proposto no passado para links de energia unidirecionais (Blasco-Gimenez, et al., 2011). Com o intuito de reduzir o peso do conversor offshore, baixar o custo de instalação e aumentar a confiabilidade, vários trabalhos tem revelado formas de utilizar um retificador não controlado para este fim (Wang and Wang, et al., 2010), (Blasco-Gimenez, et al., 2011).

Esta topologia só é potencialmente aplicável, uma vez que o desenvolvimento das tecnologias de aerogeradores possibilitou a utilização do sistema conversor completo com geradores síncronos (SG) (Lubosny, 2003).

O método proposto nos artigos mencionados requer o controle de todas as turbinas eólicas de uma maneira muito particular e com modificação do controle interno, de modo que elas mantenham a tensão e a frequência comuns da linha CA. Apesar de ser uma técnica de controle válida, não é adequada para os atuais equipamentos comerciais de geração eólica, isso porque os mesmos incorporam o controle internamente no conversor de potência de cada turbina.

O sistema de controle local de uma turbina eólica é fechado e muito difícil de ser modificado pelo integrador do parque eólico. Note que para modificar os controles locais de cada turbina para implementar uma estratégia unificada não é uma alternativa viável do ponto de vista prático nem econômico.

Nesse trabalho se propõe uma nova solução de controle realizando um controle em camadas onde uma estratégia de controle superior envia as referências de potência ativa e reativa para os controles locais de cada turbina. Pretende-se com a implementação do sistema de controle utilizar qualquer aerogerador comercial, uma integração simplificada e o uso de topologia baseada em diodos sendo assim a baixo custo. Se diferenciando assim dos demais trabalhos realizados dentro dos estudos de integração de aerogeradores offshore com a rede elétrica em terra.

Também se realiza as simulações com todos os sistemas de controle funcionando em paralelo para obter ao detalhe as dinâmicas do aerogerador, somando ao controle proposto da linha offshore e também a dinâmica do MMC em terra, alcançando assim a dinâmica do sistema ao completo.

Esta topologia proposta com base em retificadores de diodos tem uma redução do peso total da plataforma do retificador offshore (15 a 20%), comparado com o retificador atual totalmente controlado (MMC). O restante desse trabalho está organizado: Na seção 2 se apresenta a topologia proposta, na seção 3 o sistema de controle aplicado, na seção 4 os resultados da simulação e na seção 5 uma conclusão do trabalho realizado.

2. TOPOLOGIA PROPOSTA PARA APLICAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE

É proposto o uso de um retificador baseado em diodo para conectar um VSC em terra a parques eólicos offshore por meio de um link HVDC. É proposto o uso de um retificador baseado em diodo para conectar um VSC em terra a parques eólicos offshore por meio de um link HVDC mostrado na Fig. 1. O sistema composto tem a capacidade de controlar a rede isolada em alto mar, mantendo a frequência e a tensão estáveis para conexão e transmissão em CC.

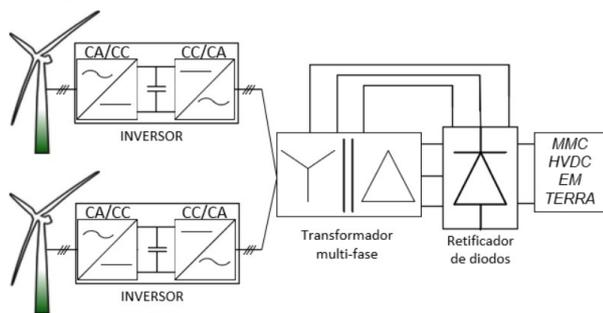


Fig. 1 Topologia - parque eólico offshore com o link HVDC baseado em diodo retificador.

2.1 Turbina Eólica e topologia do conversor

O controle externo implementado no sistema de transmissão torna obrigatório que as turbinas utilizem conversor de potência com topologia *back to back* (B2B), com conversão total.

O conversor totalmente controlado leva ao desacoplamento total do comportamento da turbina eólica do gerador da rede. Como resultado, este sistema tem a capacidade de controlar a rede, contribuindo ativamente para a limitação dos efeitos das falhas da rede e para o restabelecimento do funcionamento normal após uma falha da rede.

Este sistema pode estar totalmente em stand-by e pode operar em modo isolado, por isso é tão importante para esta aplicação. Para esta topologia, são considerados o gerador de máquina síncrona (SMG) e do conversor B2B, mostradas na Fig. 2. (Liu, Y., Chen, P., Lan, P., and Chang, Y. 2017)

Os parâmetros nominais da turbina eólica e as especificações do conversor são mostrados na Tabela 1.

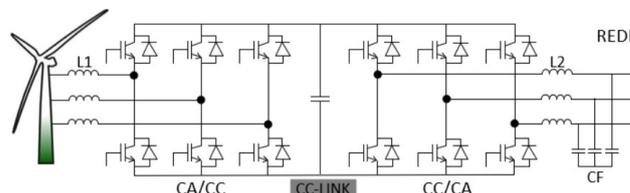


Fig. 2 Topologia da turbina eólica e os filtros passivos.

Tabela 1. Características da turbina eólica offshore simuladas no sistema

Turbina eólica e conversor	Valores
Potência Nominal	2 MW
Tipo de turbina eólica	Geradores Síncronos (GS)
Tensão CA de saída	690 V _{rms}
Tensão do CC-Link	4000 VDC
Frequência de Chaveamento	4,8 kHz
Elementos passivos	Valores
L1	0,13 mH
L2	0,13 mH
CF	8,0 µF
C	6600 µF

2.2 Transformador e retificador multipulsos

Resultados de estudos sobre os tipos de transformadores e sobre os retificadores baseados em diodo têm forte influência na topologia proposta para este trabalho (Siemens, 2013), devido à quanto maior o número de pulsos do retificador melhor a qualidade da controlabilidade do sistema e a redução do tamanho final dos elementos passivos. Como a tensão e a corrente estão sendo controladas pelas turbinas eólicas offshore, a forma de onda da tensão está intimamente relacionada ao número de pulsos do conjunto transformador / retificador, uma vez que maior o número de pulsos resultará em uma menor distorção harmônica total em corrente e tensão (THD).

O uso de topologias de transformadores multipulsos para grandes potências está cada dia mais presente em novas

instalações e existe à necessidade de estudar sistemas maiores compostos por topologias multipulsos e suas interações com o sistema. Neste trabalho se estuda a topologia de doze pulsos e os detalhes da topologia são mostrados na Fig. 3.

As duas principais vantagens de usar a topologia de transformador / retificador multipulsos são: - Redução nos harmônicos de corrente CA de entrada. - Redução da ondulação de tensão DC de saída (Wang, and Thi, 2013).

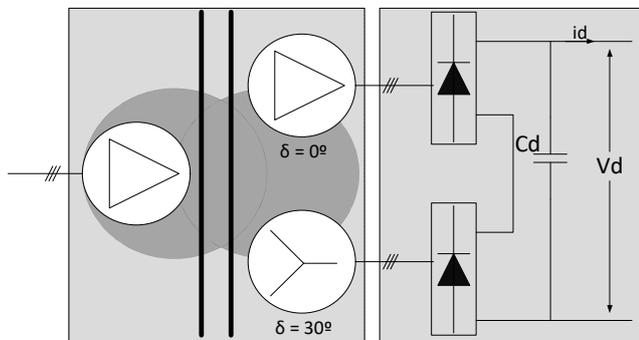


Fig. 3 Transformador + retificador 12 pulsos baseado em diodo.

2.3 Link do modelo simplificado HVDC e parque eólico offshore

Para a realização das simulações foi usado o programa PSCAD®, para validação da estratégia de controle do sistema completo foi necessário simplificar a topologia do sistema de transmissão HVDC e seus parâmetros. O principal objetivo do controle é regular corretamente a frequência e a tensão nos barramentos CA do sistema offshore. Portanto, os barramentos CC e o conversor VSC-HVDC podem ser simplificados usando um modelo matemático de representação realista.

O link HVDC simplificado é definido e mostrado na Fig. 4. Os parâmetros do link HVDC foram obtidos do *International Council on Large Electric Systems (CIGRE)*. O retificador de diodo proposto juntamente com a estação em terra VSC-HVDC, considerada no modelo como uma variável fonte de tensão CC e os efeitos do acoplamento da linha de transmissão são o sistema completo de conexão via HVDC (Bozhko, S., Asher, et al., 2008). Os valores definidos para o sistema modelo HVDC usado são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros do sistema HVDC simplificado

Tensão, Potência, Frequência	350 kV, 500 MW, 50 Hz
Característica do barramento CA	$R_c = 1 \text{ m}\Omega$, $Z_G = 0,98 \text{ m}\Omega$, $L_c = 0,2 \text{ mH}$, $C_G = 2,566 \text{ }\mu\text{F}$
HVDC, CC-Link, de acordo com CIGRE	$R_s = 2,5 \text{ }\Omega$, $L_s = 0,616 \text{ H}$, $C_d = 22 \text{ }\mu\text{F}$

3. SISTEMA DE CONTROLE

Esta seção descreve o controle externo da tensão e frequência do barramento CA, interagindo com todas as turbinas eólicas do parque eólico. É importante ressaltar que o controle do aerogerador é mantido inalterado, o que revela uma das principais vantagens do método de controle apresentado. O ato de modificar algoritmos de controle de turbinas eólicas

comerciais representaria uma séria desvantagem para qualquer método de controle, devida a robusta certificação necessária.

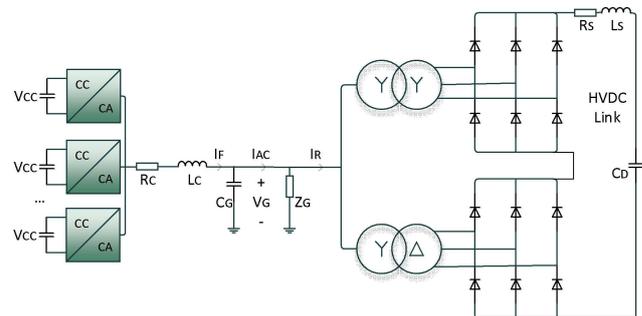


Fig. 4 Link HVDC simplificado, modelo conectado ao parque eólico offshore.

Por outro lado, o sistema completo com o método de controle proposto precisa apenas estar em conformidade com o código de rede de cada país e o código de rede está em conformidade com a subestação terrestre. Desta forma pode-se utilizar aerogeradores de diferentes fabricantes.

O sistema de controle interage com as turbinas eólicas offshore, enviando e recebendo informações para que o fluxo de carga, a frequência e a tensão do barramento possam ser controladas. As informações recebidas da turbina eólica atualizada são a potência ativa e reativa.

A informação enviada para a turbina eólica é o ponto de ajuste da potência reativa. O sistema de controle com isso busca estabilizar e controlar a frequência do barramento CA offshore. Para demonstrar a estratégia de controle e o desempenho do sistema completo, destacamos o conceito-chave do método, que é a relação entre a potência reativa e a frequência.

O sistema de controle de frequência e tensão do barramento CA compreende o controlador externo, o mesmo recebe como referência de leitura a frequência, potência ativa e reativa do barramento CA comum, com os devidos filtros de leitura de variáveis e sensibilidade de sensores. Em seguida, o controle calcula através de um PI, o valor de potência reativa total necessário para enviar ao barramento CA em alto mar com o objetivo de manter a frequência e a tensão com a menor variação possível.

Para otimização do controle de frequência se observa na Fig. 5 a utilização do termo feedforward das leituras de potência ativa e reativa do barramento CA, esse termo ajuda na velocidade do PI e também frente a variações bruscas de potência.

O controlador externo distribui esse valor de potência reativa total necessária para o devido controle da frequência, para os aerogeradores do sistema de forma ponderada, os que estejam produzindo maior potência ativa recebem uma referência maior de potência reativa.

A maior dificuldade do controle está na velocidade de processamento, as transições frente ao aumento de potências bruscas e o início do controle devido a sintonização e ao black start. Devido a essa dificuldade na seção de resultados se busca observar o quanto essa velocidade de processamento pode afetar diretamente no controle da frequência,

observando para diferentes pontos de controle a variação existente.

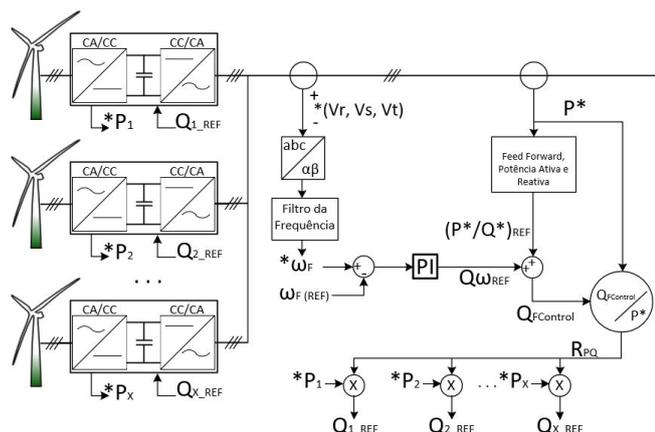


Fig. 5 Diagrama de blocos do controle de frequência centralizado do barramento CA offshore.

A Fig. 5 mostra um esquema dos blocos de controle centralizado e o algoritmo de controle de frequência. O sistema controla as potências reativas necessárias para cada controlador devido a variação de potência ativa, com o objetivo de manter a tensão e a frequência com a menor variação possível.

A frequência é estimada com a medição remota e o controle corresponde a um proporcional e integral (1). Para obter a referência de potência reativa final, uma potência real é obtida por meio de medições e compõe o termo de compensação de *feed forward* (2), Fig. 5.

$$Q_{\omega_{ref}} = K_p(\omega_F^* - \omega_{F(REF)}) + K_i \left(\int (\omega_F^* - \omega_{F(REF)}) dt \right)$$

$$K_p = 93, K_i = 0,1987 \quad (1)$$

$$Q_{Fcontrol} = Q_{\omega_{ref}} + \frac{Q_{grid}^*}{P_{grid}^*} \quad (2)$$

Além disso, o sistema de controle da frequência necessita um projeto de filtro de leituras apropriado devido que a tensão do barramento CA tem formato de 12 pulsos dificultando a leitura da variante sinusoidal, representado na Fig. 5. A correta dinâmica do filtro da frequência com a sintonização do PI evitam ganho de malha e efeitos ao estimar erros para a rede CA em alto mar.

Ao final, $Q_{Fcontrol}$ é dividido proporcionalmente ao parque eólico, respeitando a relação de potência ativa e reativa de cada aerogerador. Algumas vantagens adquiridas do sistema de controle proposto são:

- O controle é aplicado a aerogeradores comerciais, não requer nenhuma modificação de seu controle comercial e certificado.
- Elevada redução de custos devido à topologia e ao controle proposto.
- O custo gerado com o novo controle, sua engenharia e implantação, é mínimo.
- Controle externo, facilitando sua implantação em alto mar.

4. RESULTADOS

O sistema de controle proposto de atuação externa para parques eólicos offshore foi validado usando simulações PSCAD®. Várias etapas e cenários foram considerados para garantir que em qualquer condição de trabalho extrema o controle seja capaz de manter as variáveis principais, tensão e frequência entre os limites normais de operação.

Todas as partes da simulação do parque eólico estão com os controladores completos e com os efeitos de chaveamento PWM, trazendo assim os resultados ao mais próximo possível da realidade.

Os principais resultados para validação do controle externo são apresentados neste trabalho com o retificador de 12 pulsos em conexão ao parque eólico e o link HVDC.

O objetivo deste trabalho é validar o controle do parque eólico externo. Com isso, são simuladas cinco turbinas eólicas com todas as suas características reais conectadas ao link HVDC baseado em diodo retificador. Dentro da validação do controle se busca identificar a quantidade de contribuição de potência reativa exigida pelo sistema para manter a frequência dentro da faixa de trabalho desejada.

Algumas variações abruptas de potência foram testadas para observar o desempenho do controle centralizado. Como pode ser visto, no lado secundário, a tensão do barramento é mantida estável e pequenas variações de tensão podem ser observadas nos terminais de saída do aerogerador.

Na Fig. 6a, se mostra a corrente de saída da turbina eólica. Se pode observar que embora a tensão tenha a característica de 12 pulsos, a corrente está muito próxima de uma sinusoidal.

Na Fig. 6b, se mostra a tensão CA gerada no barramento do meio. Se pode observar que a amplitude da tensão é mantida estável e a pequena variação de frequência não é perceptível. Em parte, pode-se notar o efeito retificador de 12 pulsos e o alto percentual de harmônicos. Este é o agente motivador para buscar outras alternativas com mais pulsos no retificador de diodos.

Na Fig. 6c, se pode observar que a variação no link HVDC é mínima, o que mostra que o controle implementado não gera perturbações apesar da nova topologia implementada.

Na Fig. 6d mostra os resultados da potência ativa e reativa ao mesmo tempo. Em primeiro lugar, o principal resultado é a controlabilidade do sistema contra variações de potência ativa. O monitoramento da potência reativa frente às variações da potência ativa é rápido e eficiente, evitando grandes variações de frequência.

Em segundo lugar, com este resultado, a relação direta entre a potência ativa e reativa pode ser obtida. Na terceira e não menos importante observação, os resultados mostram diversas variações de potência, com tempos de troca reduzidos. Isso mostra o desempenho de controle correto contra rajadas de vento e problemas potenciais no parque eólico.

A tabela 3 mostra a comparação entre a potência ativa e reativa para três níveis de potência diferentes, mantendo a referência na frequência de 50 Hz. Os valores de frequência mínimo e máximo são mostrados.

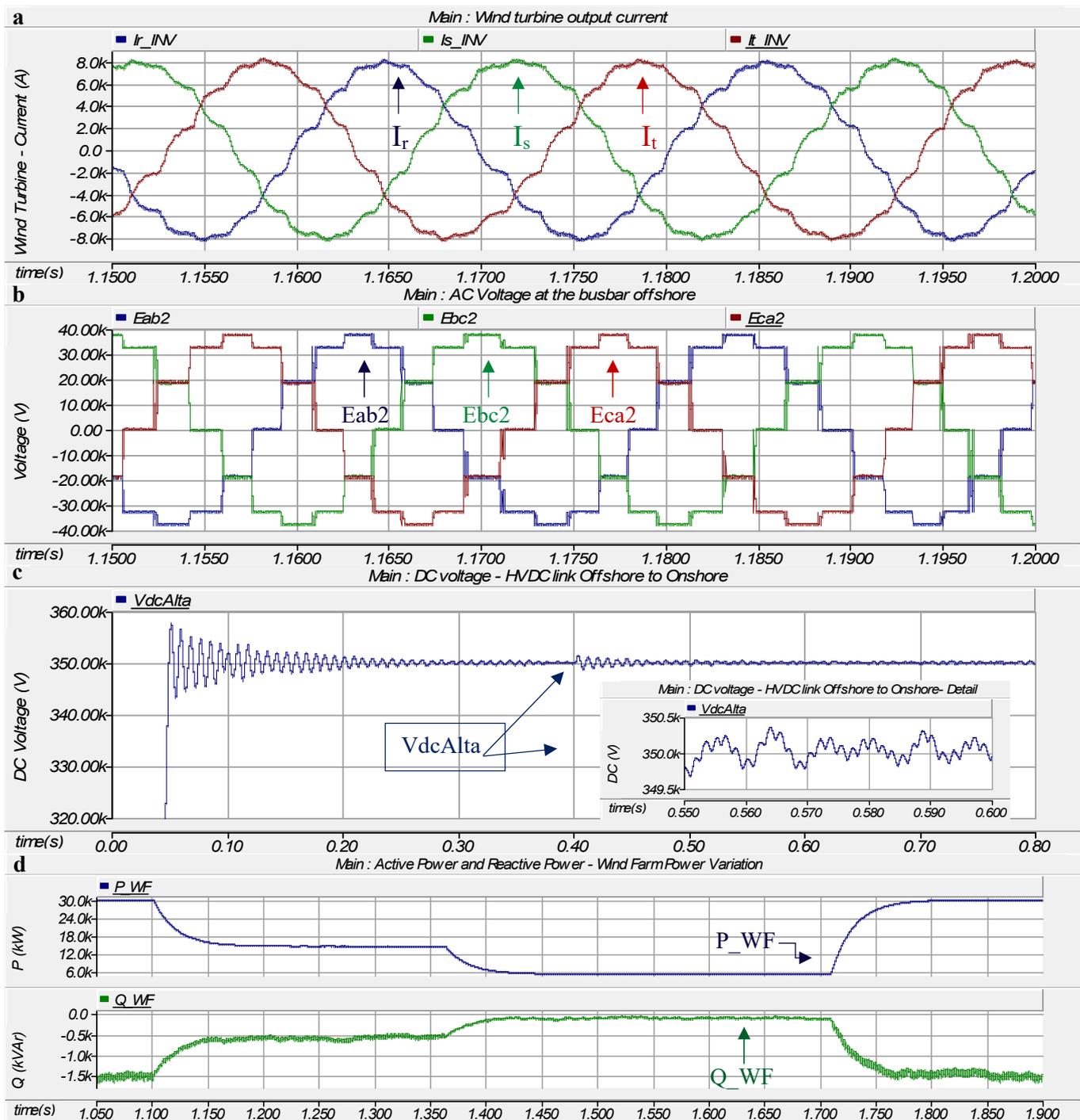
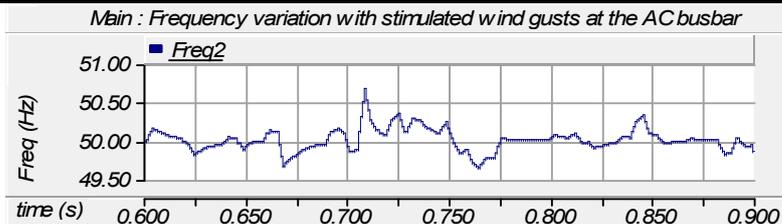


Fig. 1. Resultados da rede CA de tensão offshore e do link HVDC usando o retificador de 12 pulsos de topologia de controle externo: a. Corrente CA gerada nos terminais de saída da turbina eólica. b. Tensão CA gerada no barramento offshore com características do retificador de 12 pulsos. c. Tensão CC, no link HVDC. A estabilidade é verificada e detalhada. d. A potência ativa e a reativa são utilizadas para controlar os barramentos CA offshore.

Tabela 3. Características da turbina eólica offshore simuladas no sistema

Variação da frequência do barramento CA com rajadas de vento estimuladas (Hz):

- Mínimo: 48,77
- Média: 49,98
- Máximo: 50,98



Uma conclusão que obtemos é que a melhoria do retificador de pulsos está diretamente ligada à qualidade da rede CA gerada. O aumento do número de pulsos também diminui a potência reativa necessária para manter a frequência da rede CA para a mesma potência ativa. Uma nova topologia multipulsos pode ser proposta e testada utilizando cada transformador na base de cada turbina eólica com diferentes ângulos, aumentando assim os pulsos e a robustez do sistema. Como objetivo secundário, foi provado considerar atrasos na comunicação e assim conhecer os diferentes resultados e efeitos, avaliando a comunicação do enlace offshore com o controle externo. A tabela 4 mostra os resultados obtidos. Uma das preocupações seria o atraso das comunicações em alto mar, e com este estudo foi possível verificar que o controle é eficaz mesmo com algum atraso de tempo nas comunicações.

Tabela 4. Comparação entre diferentes tempos de atrasos para a comunicação com o controle externo

Atrasos do Controle (s)	Varição de Frequência (Hz)
0,02	± 0,40
0,05	± 0,47
0,1	± 0,61
0,5	± 0,77
1	± 1,01
2	± 1,89

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um novo conceito de controle externo aplicado a um parque eólico offshore e à conexão de rede CA através de um link HVDC baseado em diodo. O estudo demonstrou a viabilidade técnica da utilização de um retificador à base de diodo para se conectar a um grande parque eólico, por meio do controle proposto. O controle proposto foi validado por meio de simulações PSCAD®, considerando o parque eólico e todos os seus controladores independentes, todos implementados e testados na mesma simulação.

A dinâmica offshore da rede CA é apresentada e pode-se concluir que a potência ativa pode ser usada para controlar a tensão, e a potência reativa pode ser usada para controlar a frequência da rede CA, o que é o oposto dos sistemas mais comumente usados. Este efeito ocorre porque as características da rede CA são desacopladas. Um controle otimizado para a dinâmica da rede CA pode ser desenvolvido levando este efeito em consideração.

Um benefício importante, é a redução significativa de custos de construção e engenharia. A topologia proposta e seu controle externo permitiram a transmissão de energia no link HVDC com base em retificadores de ponte de diodos e causaram uma redução notável do peso total da plataforma do retificador offshore (15 a 20%). Os aerogeradores comerciais são facilmente integrados, uma vez que seus controladores internos não precisam ser modificados, mantendo assim suas certificações de uso.

Os resultados deste trabalho, mostram variações desprezíveis de frequência e tensão, resultando em um sistema robusto e estável, com grandes benefícios para a operação do parque eólico.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é realizado com o apoio do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil), projeto de desenvolvimento 150902/2020-4. Este projeto recebeu apoio da Universidade de Sevilha.

REFERÊNCIAS

- Adapa, R. (2012), High-voltage HVDC technology: The state of the art, *IEEE Power and Energy magazine*, vol. 10, no. 6, pp. 18-29, 2012.
- Blasco-Gimenez, R., Año-Villalba, S., Rodríguez, J., Bernal, S., and Morant, F. (2011), Diode-Based HVdc Link for the Connection of Large Offshore Wind Farms, *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. PP, vol. 26, no. 2, pp. 615–626, 2011.
- Bozhko, S., Asher, G., Li, R., Clare, J., and Yao, L., (2008), Large offshore DFIG based wind farm with line-commutated HVDC connection to the main grid: Engineering studies, *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 23, no. 1, pp. 119–127, Mar. 2008.
- Chen, X., Sun, H., Wen, J., Lee, W., Yuan, X., Li, N., Yao, L. (2011), LCC Based MTDC for Grid Integration of Large Onshore Wind Farms in Northwest China, *Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, July 2011 IEEE, 10p.
- Flourentzou, N., Agelidis, V., and Demetriades, G. (2009), VSC-based HVDC power transmission systems: An overview, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 3, pp. 592–602, Mar. 2009.
- Liu, Y., Chen, P., Lan, P., and Chang, Y. (2017), Dynamic simulation and analysis of connecting a 5 MW wind turbine to the distribution system feeder that serves to a wind turbine testing site, *2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017 - ECCE Asia)*, 2017, pp. 2031-2035, doi: 10.1109/IFEEC.2017.7992363.
- Lubosny, Z. (2003), Wind Turbine Operation in Electric Power Systems Advance Modeling, *Berlin-Heidelberg: Springer, 2003*, Hardcover, 259 pages. ISBN 3-540-40340-X.
- Siemens (2013) AG – IEEE PES Boston, published 2013, <http://www.ieeepepboston.org>, HVDCPLUS Technology *IEEE PES*, Boston.
- Wang, L., Wang, K., Lee, W., and Chen, Z. (2010), Power-Flow control and stability enhancement of four parallel-operated offshore wind farms using a line-commutated HVDC link, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 25, no. 2, pp. 1190–1202, Apr. 2010.
- Wang, L., and Thi, M., (2013), Stability analysis of four PMSG-based offshore wind farms fed to an SG-based power system through an LCC–HVDC link, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 6, pp. 2392-2400, Jun. 2013.