

Análise, Modelagem e Controle de Potência para Sistemas de Energia Eólica Tipo IV usando a Transformada de Clarke

João Frederico Souza de Paula
Departamento de Engenharia e
Tecnologia
Universidade Federal Rural do
Semiárido
Mossoró, Brasil
jfrederico@ieee.org

Adriano Aron Freitas de Moura
Departamento de Engenharia e
Tecnologia
Universidade Federal Rural do
Semiárido
Mossoró, Brasil
adrianoaron@ufersa.edu.br

Ednardo Pereira de Rocha
Departamento de Engenharia e
Tecnologia
Universidade Federal Rural do
Semiárido
Mossoró, Brasil
ednardo@ufersa.edu.br

Resumo—No presente trabalho foram realizadas simulações no software ATPDraw de uma turbina eólica do tipo IV, cuja arquitetura consiste em um gerador síncrono, um retificador trifásico não controlado, um conversor boost e um inversor trifásico controlado nos eixos α e β . Os compensadores foram utilizados para minimizar o erro e controlar as potências ativa e reativa através das correntes de referência de cada eixo, de forma que as potências sejam controladas de forma independente, permitindo a injeção de potência na rede. Os resultados apresentados são satisfatórios e indicam a redução do erro nos compensadores e o controle efetivo das potências injetadas na rede elétrica, visando um fator de potência unitário.

Palavras-chave—energia eólica, conversores de potência, transformada de clarke, atpdraw, inversor de fonte de tensão

I. INTRODUÇÃO

Ao longo das três últimas décadas, as fontes renováveis de energia ganharam mais importância na sociedade devido a sua viabilidade econômica no comércio, conscientização da escassez de fontes finitas de energia, da quantidade de poluição ocasionado pelas fontes não limpas e os impactos negativos nos ecossistemas. Por consequência dos avanços tecnológicos, redução de custos e incentivos governamentais, fizeram com que as fontes renováveis se tornassem mais competitivas no comércio. Dentre as fontes de energia consideradas verdes, a energia eólica está entre as que mais se expandem em termos de capacidade instalada [1].

Dentre os tipos de aerogeradores existentes na energia eólica, o tipo IV é um dos mais utilizados. São sistemas de acionamento direto sem caixas de engrenagens e o gerador está diretamente acoplado ao cubo das lâminas. A maioria dos geradores desse tipo são máquinas síncronas com excitação de ímã elétrico ou permanente. O aerogerador possui uma interface com a rede elétrica através de conversores de potência, possibilitando o trabalho em uma faixa maior de velocidades e tendo mais eficiência na extração da energia a partir da força dos ventos [2].

A turbina eólica tipo IV possui a vantagem de ser totalmente desacoplada da rede, permitindo o controle da geração de forma completa. Entretanto, o aerogerador tem a desvantagem de possuir um comportamento bastante oscilatório, possibilitando a geração de problemas de estabilidade na rede a qual está inserida [3]. Devido a isso,

quando ocorrer o excesso de geração de potência ativa e reativa, a tensão e a frequência da rede são elevadas. A Fig. 1 mostra o desenho do diagrama do gerador elétrico eólico do tipo IV [4], estando presente todo o sistema de conversão de energia elétrica.

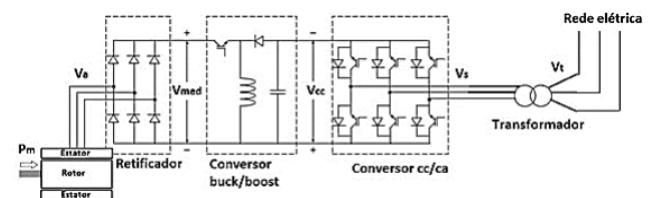


Fig. 1. Diagrama do Gerador Elétrico Eólico Tipo IV (Moura, 2019)

Na Fig. 1 é possível observar que o gerador elétrico está conectado com um sistema de conversão com o perfil de um *Back-to-Back*, retificando a forma de onda gerada, logo após o sinal passa pelo conversor *boost*, o qual controla a quantidade de potência gerada, e por fim passa pelo conversor *cc/ca*, o qual gera a tensão com a amplitude do ponto de acoplamento (*Point of Common Coupling*, PCC) e ângulo de potência em sincronia com a rede elétrica.

No presente trabalho é demonstrado o funcionamento dos conversores que estão dentro do aerogerador tipo IV, o sistema de controle no inversor trifásico controlado, sendo adotada a transformada de Clarke para a transformação do sistema trifásico abc para o quadro estacionário $\alpha\beta 0$ acompanhado de um compensador, possibilitando o ajuste da potência ativa e reativa injetada na rede elétrica. A simulação do sistema foi realizada no *Alternative Transient Program – Electromagnetic Transient Program* (ATP-EMTP).

II. ESTUDO DOS COMPONENTES DO CIRCUITO

A. Gerador Síncrono

Os Geradores Síncronos (GS) ou alternadores são máquinas síncronas com a utilidade de converter a potência mecânica, como a rotação do cubo das pás do aerogerador provocado pela força dos ventos, em potência elétrica CA [5].

Em um gerador síncrono de dois polos estão presentes o campo magnético em regime permanente (B_R) produzido pela corrente de campo I_F e o campo magnético uniforme girante (B_S) produzido pelo conjunto trifásico de correntes nos enrolamentos de armadura defasados no espaço de 120° ,

cujo sentido de rotação está diretamente relacionado com a sequência de fases implementado. Neste tipo de máquina, a velocidade relativa de rotação entre o campo girante e a velocidade de rotação do rotor não existe. Com isso, o escorregamento é nulo e $\omega_s = \omega_r$, fazendo o gerador síncrono operar na velocidade de sincronismo [4,5].

Na configuração do aerogerador tipo IV, o rotor eólico é conectado diretamente no eixo de um gerador síncrono, o qual possui, geralmente, mais de 100 polos, para obter uma frequência sincronizada com a da rede elétrica, pois a velocidade das pás conectadas ao gerador varia de 6 a 60 rpm [4].

B. Retificador Trifásico Não Controlado

O Retificador Trifásico Não Controlado (RTNC) é um conversor CA-CC, geralmente utilizado no setor industrial para a produção de tensão CC para cargas de valores elevados [6]. O retificador trifásico propicia uma tensão de saída CC com ondulações menores em relação ao retificador monofásico, facilitando a filtragem das ondulações [7]. A Fig. 2 mostra a topologia de um circuito de retificador trifásico de onda completa chaveado por diodos, caracterizando-o como não controlado, e recebendo uma corrente trifásica de um gerador trifásico.

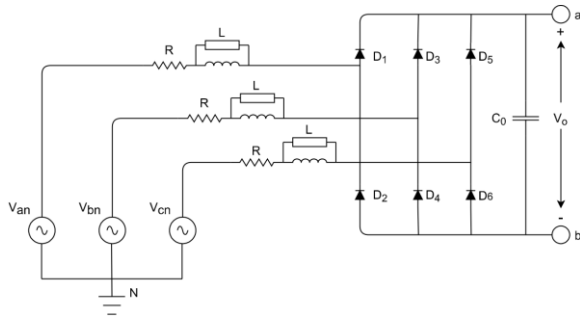


Fig. 2. Retificador Trifásico Não Controlado.

O circuito retificador da Fig. 2 é de 6 pulsos e entre os diodos ocorre uma comutação a cada 60° . A partir disso, o RTNC contém uma frequência de oscilação na ondulação de tensão de saída seis vezes a frequência de oscilação de tensão da fonte de corrente alternada.

C. Conversor Boost

O conversor *Boost* (CB), também comumente chamado de conversor elevador, é um conversor CC-CC chaveado cuja função é de acionamento e desligamento ou comutação periódica de uma chave eletrônica [6]. Outra finalidade do circuito é de manter ou elevar o valor médio de tensão que for injetada nesse sistema [7]. A Fig. 3 mostra a topologia do conversor elevador.

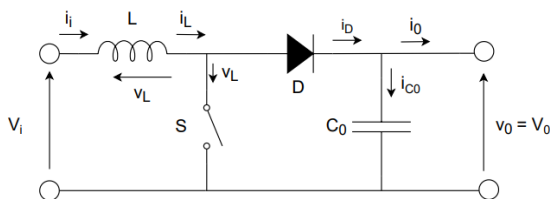


Fig. 3. Conversor Boost.

O princípio de funcionamento do conversor *boost* se baseia em dois momentos: no fechamento e abertura da

chave S, presente na Fig. 3. No primeiro momento, a chave encontra-se fechada e o diodo permanece reversamente polarizado, isolando a saída da entrada do conversor. Com isso, a tensão média de entrada (V_0) carrega o indutor. O segundo momento encontra-se quando a chave S é aberta e a tensão média de entrada (da fonte) somada com a tensão carregada no indutor injeta energia no capacitor C, elevando a tensão de saída [7].

O Ciclo de Trabalho (D) ou *Duty Cycle* é um conceito essencial para um conversor CC-CC, pois é definido como a razão entre o tempo o qual a chave permanece fechada ou “ligada” (T_{on}) e o período completo do chaveamento (T_{all}) (1).

$$D = \frac{T_{on}}{T_{all}} \quad (1)$$

A tensão de saída pode ser calculada com os valores do ciclo de trabalho e da tensão de entrada determinadas através da (2), pois o sistema funciona pelo Modo de Condução Contínua (MCC) [7].

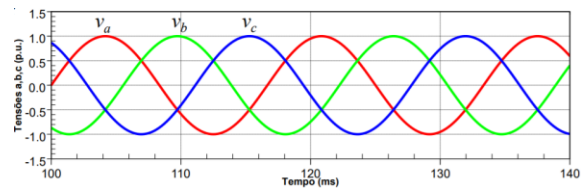
$$V_0 = \frac{1}{1-D} * V_{in} \quad (2)$$

D. Transformada de Clarke

A transformada de Clarke é uma transformação matemática que facilita na análise de correntes e tensões em circuitos trifásicos (abc), convertendo para o referencial estacionário ($\alpha\beta 0$), resultando em duas componentes senoidais, as quais possuem uma defasagem de 90° entre elas, e uma sequência 0 nula [7,8]. As Equações (3) e (4) mostram as transformadas direta e inversa da transformada de Clarke e a Fig. 4 mostra o gráfico da aplicação da transformada de Clarke em um Sistema trifásico.

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$



(a)

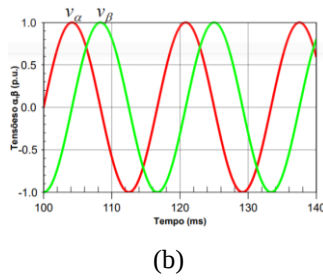


Fig. 4. Comportamento da Transformada de Clarke (a) ondas senoidais de sistemas trifásicos (b) ondas senoidais nos eixos αβ, após a aplicação da transformada de Clarke.

E. Inversor Trifásico Controlado

O inversor trifásico controlado (ITC) converte a tensão acumulada no barramento CC capacitivo em um sinal CA através do seccionamento de transistores e diodos, os quais são controlados por um sistema de controle configurado dentro do inversor. O chaveamento ocorre em um intervalo de $T/6$ e com defasagem de ângulos de 60° [7]. Na Fig. 5 é apresentado a topologia do circuito do inversor trifásico controlado de seis pulsos, os diodos e IGBT enumerados de 1 a 6 e as fases abc na saída CA do conversor CC-CA.

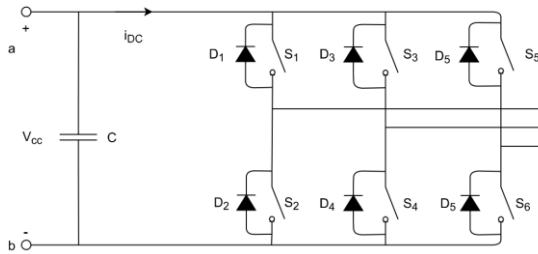


Fig. 5. Inversor Trifásico Controlador.

O inversor da Fig. 6 também é considerado inversor de fonte de tensão (*Volage-Source Converter* – VSC) por ser alimentado por uma fonte de tensão e é conectado à rede elétrica. É importante que a amplitude de tensão, o ângulo de fase e a frequência do sistema estejam sincronizados com a rede para que o sistema esteja em equilíbrio. Para isso, pode ser trabalhado um sistema VSC de frequência imposta pela rede de nível dois [9]. A Fig. 6 apresenta um diagrama esquemático desse sistema.

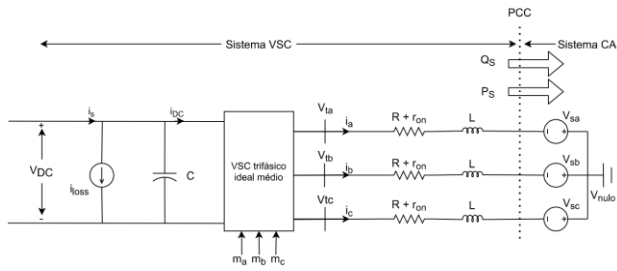


Fig. 6. Diagrama esquemático do sistema VSC com a frequência imposta pela rede. (Adaptado de Iravani, 2010)

O VSC pode ser modelado como um processador de potência de poucas perdas com um barramento CC capacitivo equivalente conectado em paralelo ao sistema. Na Fig. 6, a fonte de corrente em paralelo com o lado CC do VSC é a perda de energia por comutação. No caso do lado CA, as resistências e os indutores conectados em série representam a condução da perda de potência. O lado CC pode ser conectado com uma fonte de tensão ou com outro

conversor com a saída de tensão CC, como o conversor boost, por exemplo [9].

Na Fig. 6 também é observado que existe o ponto comum de acoplamento (*point of common coupling* – PCC), onde ocorre a injeção da potência ativa (P_s) e a potência reativa (Q_s) controladas do sistema VSC no sistema CA. É assumido que V_{sabc} é senoidal, equilibrada e contém uma frequência constante [9].

F. Controle pelo Modo de Corrente

A P_s e Q_s do sistema VSC deste trabalho são controlados pela corrente do lado CA do VSC baseado no controle pelo modo de corrente (*current-mode control*). A corrente CA é controlada por um esquema delicado de controle na tensão terminal do VSC. Com isso, ambas as potências são, ativa e reativa, são controladas pela amplitude e ângulo de fase pela corrente de linha do VSC, respeitando a tensão do PCC [9].

Apesar do esquema de controle pelo modo de corrente ser complexo, o VSC é protegido contra condições de sobrecarga, possui uma robustez perante variações nos parâmetros de VSC e sistema CA, desempenho dinâmico superior e grande precisão de controle [9].

A Fig. 7 mostra o diagrama esquemático do controlador de potência ativa/reativa pela corrente controlada, na qual o controle é realizado no quadro αβ [9].

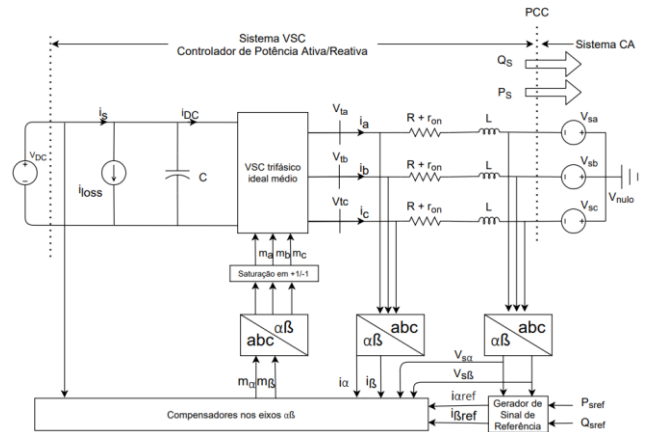


Fig. 7. Diagrama de blocos da corrente controlada do controlador de potência ativa e reativa. (Adaptado de Iravani, 2010)

P_s e Q_s são controlados pelas correntes i_α e i_β . Os sinais de partida e de retorno são os primeiros transformados para o quadro αβ, através da transformada de Clarke (3), e assim processados pelos compensadores para produzirem sinais de controle no novo quadro estacionário. Finalmente, os sinais de controle passam pela transformada inversa de Clarke (4) e retornam ao inversor. Para a proteção do inversor trifásico, as correntes de referência i_{aref} e $i_{\beta ref}$ são limitados por blocos de saturação [9].

As Equações (5) e (6) mostram como é calculado o valor das potências ativa e reativa injetados no sistema AC, onde o $V_{s\alpha}$ e o $V_{s\beta}$ são os componentes da fonte do sistema αβ e não podem ser controlados.

$$P_s(t) = 1,5[V_{s\alpha}(t)i_\alpha(t) + V_{s\beta}(t)i_\beta(t)] \quad (5)$$

$$Q_s(t) = 1,5[-V_{s\alpha}(t)i_\beta(t) + V_{s\beta}(t)i_\alpha(t)] \quad (6)$$

No entanto, as correntes i_α e i_β podem ser controladas e são usadas para exercer o controle das potências P_s e Q_s . As Equações (7) e (8) mostram como são calculadas as correntes de referência para a aplicação no controle das potências e elas mostram que as potências podem ser independentemente controladas [9].

$$i_{\alpha ref}(t) = \frac{2}{3} \frac{V_{s\alpha}}{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2} P_{sref}(t) + \frac{2}{3} \frac{V_{s\beta}}{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2} Q_{sref}(t) \quad (7)$$

$$i_{\beta ref}(t) = \frac{2}{3} \frac{V_{s\beta}}{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2} P_{sref}(t) - \frac{2}{3} \frac{V_{s\alpha}}{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2} Q_{sref}(t) \quad (8)$$

As Equações (9) e (10) são a base para a construção do sistema de controle presente na Fig. 8.

$$L \frac{di_\alpha}{dt} = -(R + r_{on})i_\alpha + \frac{V_{DC}}{2} m_\alpha - V_{s\alpha} \quad (9)$$

$$L \frac{di_\beta}{dt} = -(R + r_{on})i_\beta + \frac{V_{DC}}{2} m_\beta - V_{s\beta} \quad (10)$$

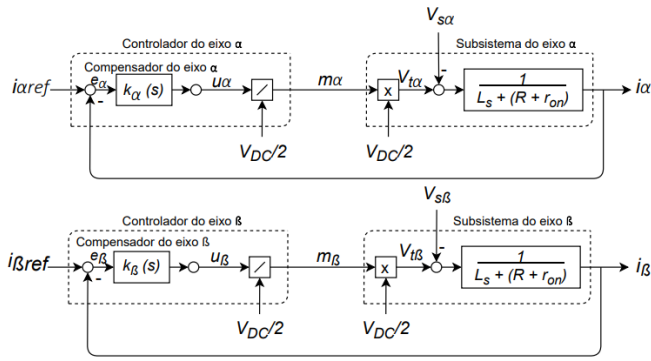


Fig. 8. Diagrama de blocos do controle dos ciclos de controle da corrente do sistema VSC, no quadro $\alpha\beta$. (Adaptado de Iravani, 2010)

A Fig. 8 mostra a planta de controle que consiste nos subsistemas do eixo α , descrito na Equação (9), e no subsistema do eixo β , descrito na Equação (10), sendo possível observar que esses subsistemas são desacoplados e controlados independentemente. As correntes de referência estão sendo injetadas em seus respectivos subsistemas [9].

Para assegurar que exista pequenos erros de estado estacionário no rastreamento de comando, é preciso que a largura de banda do sistema de controle de malha fechada seja adequadamente maior que a frequência do sistema de corrente alternada. Por fim, um par de polos do conjugado complexo é incluído em cada um dos compensadores k_α e k_β para garantir as margens de ganho e fase desejadas. Essa classe de compensadores é chamada de *integrador generalizado do quadro estacionário*, os quais possuem uma função análoga ao controlador PI em um sistema de quadro estacionário $dq0$ [9].

III. METODOLOGIA

O funcionamento da turbina eólica do tipo IV começa a partir da geração de energia elétrica do gerador síncrono com mais de 100 polos, gerando uma potência aparente trifásica S_{abc} de 900 kVA. A tensão trifásica gerada pela máquina é

retificada pelo RTNC, é mantida constante no barramento CC ligado a um capacitor, mantendo a tensão constante, e depois é elevado pelo conversor *boost*.

Depois que a tensão de entrada do CB foi elevada, a sua tensão de saída é injetada no barramento CC do inversor e a tensão acumulada nesse barramento permanece como tensão elétrica de referência para o compensador do sistema de controle do inversor. O seccionamento das chaves (transistores) do conversor CC-CA é controlado pelos compensadores dos eixos $\alpha\beta$, tendo como referência as correntes destes eixos, logo após a transformada de Clarke, do lado CA do inversor para controlar as potências ativa e reativa de forma independente de uma potência da outra e manter o sincronismo da fase e frequência do PCC com a rede elétrica.

Após a potência ser controlada pelo inversor, trabalhado com compensadores para que as fases em α e β possam ser controladas, o sistema de controle trabalha de forma que o fator de potência das potências seja unitário. Assim, a potência aparente do gerador síncrono da turbina eólica é convertida em potência ativa, injetando na rede elétrica com mais eficiência a potência útil e com o mínimo de potência reativa.

O circuito do aerogerador tipo IV foi construído e simulado no ATPDraw do ATP-EMTP, sendo baseada no circuito presente na Fig. 1 e a planta de controle da Fig. 7 no inversor trifásico de fonte de tensão (VSC). Para o sistema de controle, foi desenvolvida através do diagrama de blocos do ATPDraw e para o chaveamento do inversor foi utilizado o models. As características elétricas do conversor *boost*, retificador trifásico, de cada fase do circuito e do gerador síncrono trifásico encontram-se na seção dos Apêndices.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das simulações do funcionamento dos conversores de energia do aerogerador tipo IV, os sinais de referência para a amplitude do sinal da saída do inversor e o desempenho das potências ativa e reativa se encontram presentes nas seguintes subseções.

O aerogerador estudado no presente trabalho possui uma velocidade nominal de 11 m/s e a potência aparente é de 900 kVA.

A. Conversor Boost

O posicionamento do conversor *boost* é logo após o retificador trifásico e anterior ao inversor trifásico não controlado. A partir disso, o sinal de entrada do conversor é o sinal de tensão de saída do retificador, o qual possui o valor aproximado de 1 kV. Na Fig. 9 é possível observar o comportamento do sinal de entrada (vermelho) e o de saída (verde) do conversor elevador.

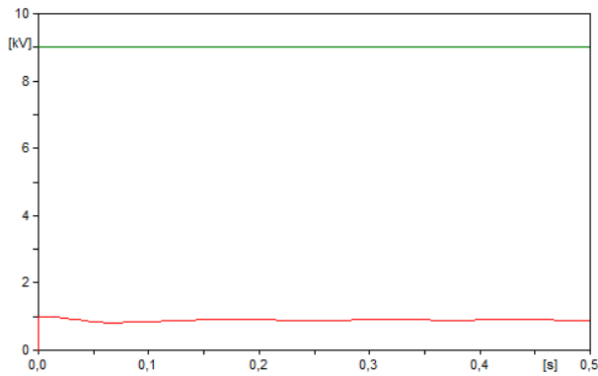


Fig. 9. Comportamento da tensão de entrada (kV) e de saída (kV) do conversor *boost*.

Conforme a Fig. 9, após a tensão de saída passar pelo transitório no barramento CC capacitivo, o sinal entra em estado permanente e passa a ter o valor de 9 kV e o valor do *duty cycle* foi de 0,9.

B. Inversor Trifásico

O inversor encontra-se posicionado entre o conversor *boost*, recebendo o sinal de tensão elevado pelo conversor elevador CC-CC no barramento CC capacitivo, e a rede elétrica. Dentro do inversor trifásico foi injetado a corrente do sistema trifásico *abc* e convertido para o quadro estacionário $\alpha\beta 0$ através da transformada de Clarke presente no sistema de controle do sistema VSC de nível dois e trabalhando junto com os compensadores k_α e k_β para controlar as potências ativa e reativa de forma independente.

Para que o inversor conseguisse obter um desempenho satisfatório no seu sistema de controle, foi preciso que o seu sinal de tensão de saída estivesse em equilíbrio. Na Fig. 10 é apresentado o comportamento do sinal de tensão do lado AC do inversor com a amplitude de sinal de 9 kV.

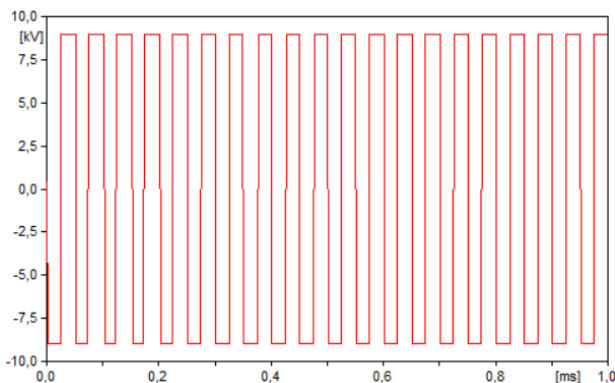


Fig. 10. Sinal de tensão de saída do inversor trifásico controlado.

A Fig. 11 mostra o sinal de referência que determina a amplitude do sinal de tensão de saída do inversor trifásico, o qual é mostrado em equilíbrio entre as três fases.

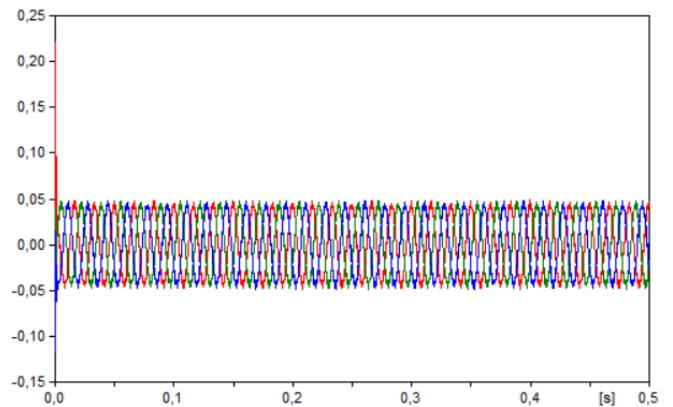


Fig. 11. Sinal de referência de controle da saída do inversor trifásico.

C. Potência Ativa e Reativa do Sistema

Foram executadas as simulações para a verificação do comportamento das potências ativa e reativa injetadas na rede, no quadro estacionário $\alpha\beta 0$ pelo sistema de controle do inversor trifásico controlado. O resultado da simulação foi satisfatório, pois o valor da potência ativa pôde ser aproveitado de forma que atingiu o valor de 900 kW e conseguiu se manter trabalhando na faixa da potência aparente fornecida pelo gerador síncrono do aerogerador tipo IV. No caso da potência reativa, o valor encontrado na simulação foi aproximadamente nulo, resultando em um fator de potência próximo a um. O gráfico na Fig. 12 mostra o comportamento das potências, a ativa em vermelho e a reativa em verde, passando pelo período transitório e permanecendo no regime permanente após o tempo de simulação de 0,1 segundos.

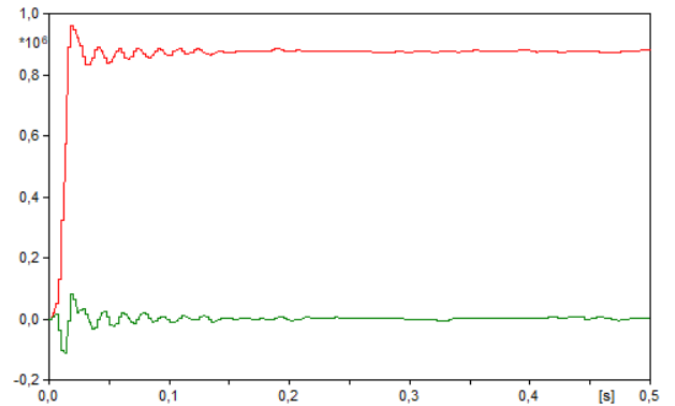


Fig. 12. Gráfico das potências ativa e reativa injetadas na rede elétrica em W e Var, respectivamente.

V. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizado uma simulação de geração de potência a partir de um aerogerador eólico tipo IV com a velocidade das pás de 11 m/s e potência aparente de 900 kVA no simulador do ATP-EMTP, o ATPDraw, utilizando a transformada de Clarke para a conversão do sistema trifásico *abc* para o quadro estacionário $\alpha\beta 0$ no sistema de controle do inversor trifásico controlado, controlando as potências de forma independente a partir dos compensadores k_α e k_β para cada corrente de referência de cada eixo e adotando o sistema de VSC nível dois para o inversor.

No sistema do aerogerador estudado, o conversor *boost* elevou a tensão de 1 kV da saída do retificador trifásico para o valor de tensão no regime permanente de 9 kV injetado no barramento CC capacitivo do inversor trifásico, com um ciclo de trabalho de 0.9.

O sistema também conseguiu entregar a potência em regime permanente em 0.1 segundos partindo do acionamento do gerador síncrono, entregando o valor aproximado de 900 kW, pois os compensadores do sistema de controle conseguiram controlar a potência reativa para que fosse próximo a zero e o fator de potência fosse próximo a um.

Para trabalhos futuros, é preciso diminuir o tempo de *ripple* provocado pelo capacitor do barramento CC do inversor para diminuir a oscilação na tensão de saída do conversor *boost*, alcançar o fator de potência unitário para que a potência ativa seja injetada na rede com 0.9 MW e a realização de testes de falta desequilibrada no sistema, para analisar a capacidade dos compensadores de controlarem o sistema em um estado de desequilíbrio para o restabelecimento do estado de regime permanente.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq/UFERSA pelo apoio financeiro por meio da bolsa PIBIC de iniciação científica e pela bolsa do programa voluntário de iniciação a pesquisa da UFERSA que ajudaram na realização desse trabalho. Os autores também agradecem a concessão e liberação da licença do programa de simulação ATP-EMTP, pois foi essencial para a execução do projeto do artigo.

REFERÊNCIAS

- [1] B. Wu, Y. Lang, N. Zargari, S. Kouro, "Power Conversion and Control of Wind Energy Systems", IEEE press, John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [2] M. El-Sharkawi. Wind Energy – An Introduction. New York: CRC Press, 2016.
- [3] T. Kerdphol, M. Watanabe, K. Hongesombut and Y. Mitani, "Self-Adaptive Virtual Inertia Control-Based Fuzzy Logic to Improve Frequency Stability of Microgrid With High Renewable Penetration," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 76071-76083, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2920886..
- [4] A. P. Moura, A. A. F. Moura, E. P. Rocha, "Geração Hidroelétrica e Eólicoelétrica", 1ª ed, vol. 1. Edições UFC, 2019.
- [5] S. J. Chapman, "Fundamentos de Máquinas Elétricas", 5ª ed. AMGH Editora Ltda., 2013.
- [6] D. W. Hart, "Eletrônica de Potência: análise de projetos e circuitos", 1ª ed. AMGH Editora Ltda., 2012.
- [7] M. A. Vitorino, "Eletrônica de Potência: Fundamentos, Conceitos e Aplicações", 1ª ed, vol. 1. Appris Editora, 2019
- [8] V. F. Mendes, "Avaliação do Comportamento de um Sistema de Conversão de Energia Eólica Utilizando Gerador de Indução Duplamente Excitado Durante Afundamentos de Tensão Equilibrados e Desequilibrados", Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, 2009.

- [9] A. Yazdani, R. Iravani, "Voltage-Sourced Converters in Power Systems", IEEE Press, John Wiley & Sons, Inc., 2010.

APÊNDICES

TABLE I. CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO GERADOR SÍNCRONO TRIFÁSICO

Características Elétricas	Valores	Características Elétricas	Valores
Tensão	2000 V	Xd''	0.17
Frequência	60 Hz	Xq''	0.243
Polos	2	Tdo'	4.49
Ângulo	0	Tqo'	0.06
SMOVTP	1	Tdo''	0.0681
SMOVTQ	1	Tqo''	0.0513
RMVA	0.9	Xo	0.15
RkV	2	RN	0
AGLINE	500	XN	0
RA	0.006	XCAN	0.1635
XL	0.14	HICO	48.8
Xd	1.31	DSR	0
Xq	0.8	DSD	0
Xd'	0.36	FM	3
Xq'	0.4	MECHUN	1

TABLE II. CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DE CADA FASE DO CIRCUITO

Características Elétricas	Valores
Resistência (R)	0,5 Ω
Indutância (L)	0,01 mH
Kp	5

TABLE III. CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO RETIFICADOR TRIFÁSICO NÃO CONTROLADO

Características Elétricas	Valores
Resistência (R)	200 Ω
Indutância (L)	0 mH
Capacitância (C) paralelo ao diodo	1 μ F
Capacitância (C) em U (0)	1 F
U (0) +	1000 V
U (0) -	0 V

TABLE IV. CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO CONVERSOR BOOST

Características Elétricas	Valores
Amplitude	1
Período de Chaveamento (T_{alt})	0.00025 s
Largura de Pulso (T_{on})	0.000225 s
Indutância	0.5 mH
Capacitância	100 μ F