

Estudo comparativo de uma gerador síncrono de ímã permanente de força contra eletromotriz trapezoidal e senoidal aplicados sistemas de geração de energia elétrica provenientes de energia eólica

between

of **Abstract** – This paper presents a comparison of a trapezoidal and a sinusoidal Back electromotive force of Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Generators applied to electrical energy generation from wind energy. The simulated system consists of an uncontrolled rectifier connected to a DC-AC converter, which supplies energy to a local load. The proposed topology doesn't use a converter to regulate the DC-link voltage, thereby the implemented control in the DC-AC converter is responsible to supply required voltage to the local load. The comparison between the trapezoidal and the sinusoidal generator is made based on the power factor measured at the terminals of the generator and the voltage ripple voltage measured on the DC-link. The present paper concludes that the trapezoidal Back EMF Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Generators exhibit a lower project cost when compared to the sinusoidal back EMF generator.

Keywords – Wind Energy, Permanent Magnet Synchronous Generator, Power Factor

Resumo – Este artigo apresenta uma comparação entre geradores síncronos com ímã permanente na superfície do rotor com forma de onda de força contra eletromotriz senoidal e trapezoidal aplicados a sistemas de geração de energia elétrica provenientes de energia eólica. Neste presente trabalho, utiliza-se um retificador trifásico não controlado conectado a um conversor CC-CA, o qual fornece energia a uma carga local. A topologia proposta não utiliza um conversor para regular a tensão no barramento CC, sendo assim, o controle do conversor CC-CA é responsável por fornecer um nível de tensão adequado para a carga. Tal topologia é utilizada para realizar a comparação entre os geradores síncronos de ímã permanente com base na análise do fator de potência medido nos terminais de cada máquina e fator de ondulação obtido no barramento CC. O presente trabalho conclui que, o emprego de um gerador síncrono de ímã permanente na superfície do rotor de múltiplos pólos de força contra eletromotriz trapezoidal apresenta um custo de projeto inferior, quando comparado à um gerador síncrono de ímã permanente de força contra eletromotriz senoidal.

Palavras-chave – Energia Eólica, Gerador Síncrono de Ímã Permanente, Fator de Potência.

1 Introdução

Durante os últimos anos, o mercado de energia eólica tem apresentado um rápido crescimento. De acordo com (World Wind Energy Association 2013), a capacidade instalada de centrais de geração de energia elétrica provenientes de energia eólica mundial alcançada até junho de 2013 está em torno de 296 Gigawatts, ainda de acordo com (World Wind Energy Association 2013), a capacidade eólica mundial cresceu 5% nos últimos seis meses.

Durante as últimas décadas, um importante desenvolvimento de máquinas com ímã permanente vem sendo observado, devido à redução do custo dos ímãs e o desenvolvimento de novos componentes na área de eletrônica de potência. O ímã permanente permite eliminar a excitação externa, anéis coletores e aumentar a potência específica da máquina. Geradores de ímã permanente vêm recebendo bastante atenção, eles são amplamente utilizados em pequenos geradores eólicos e cada vez mais em grandes turbinas eólicas. Esses geradores podem ser utilizados com caixas de redução ou em modo de acoplamento direto, esse permite reduzir elementos mecânicos, facilita a manutenção, apresenta alta confiabilidade e redução de perdas de potência (Semken et al. 2012).

Este artigo apresenta uma comparação entre dois geradores síncrono de ímã permanente de força

contra eletromotriz senoidal e trapezoidal, aplicados a conversão de energia eólica em elétrica. As simulações foram realizadas com o gerador acoplado a um retificador não controlado em ponte trifásica com filtro capacitivo para gerar a tensão no barramento CC que alimenta o conversor CC-CA, nas simulações utilizou-se uma carga linear conectada ao conversor CC-CA. O uso de um retificador trifásico não controlado implica na variação de tensão no barramento CC, dessa forma, o controle do conversor CC-CA se torna responsável por fornecer uma tensão com valor eficaz constante para a carga, independente da variação de tensão no barramento CC. O emprego dessa topologia dispensa o uso de um conversor para a regulação do barramento CC.

independentemente

com chaves controladas

* temos que considerar que o ret. não controlado tb é um conversor.

2 Descrição do sistema

Os sistemas analisados são compostos por um gerador síncrono de ímã permanente (GSIP) de força contra eletromotriz senoidal e trapezoidal, de múltiplos pólos, permitindo assim a ligação direta entre o eixo da turbina eólica e o gerador, não havendo, portanto a necessidade de se utilizar caixa de engrenagens para elevar a velocidade angular do eixo do gerador. A ligação no modo de acoplamento direto elimina consideráveis perdas mecânicas e torna o projeto mecânico mais simples.

outro
ambos

frase muito longa, quebrar em duas.

não justificar o parágrafo

Esses

o que

reduz

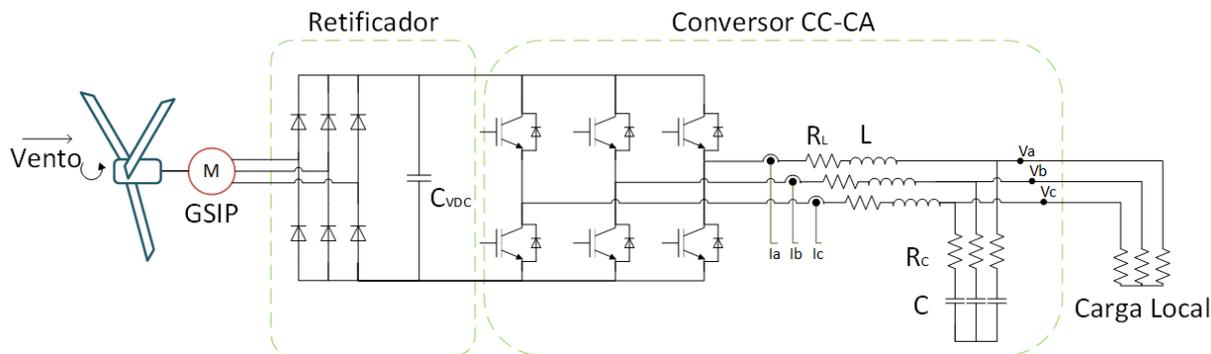


Figura 1 - Topologia utilizada

O gerador fornece energia para uma carga ilhada por meio de um conversor CA/CC/CA, o primeiro estágio do conversor é um retificador em ponte completa trifásico não controlado com um filtro capacitivo. O barramento CC fornece energia para um conversor CC-CA controlado que alimenta uma carga ilhada, conforme Figura 1.

A corrente de saída do conversor CC-CA é controlada com base na indutância L e resistência séria R_L acoplada nos terminais de saída do conversor. A malha de corrente é retroalimentada com os sinais de corrente I_a , I_b e I_c .

A malha de tensão, a qual é mais externa em relação a malha de corrente, é controlada com base nos valores da capacitância C e resistência R_C , cuja retroalimentação é proveniente das medidas de tensão V_a , V_b e V_c .

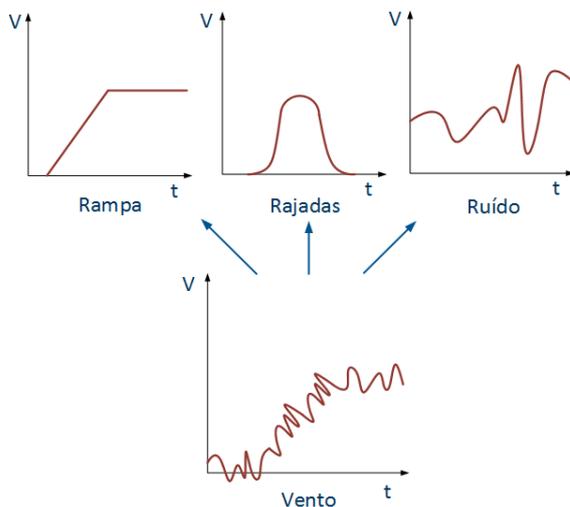


Figura 2 - Componentes do vento

3 Modelos dos subsistemas

2.1 Modelo da velocidade do vento

É interessante conhecer a modelagem da velocidade do vento, para se obter uma simulação condizente com a realidade, existem modelos probabilísticos que levam em conta a variação da velocidade do vento com o tempo e com a altura em relação ao solo (Mgwatu & Kainkwa 2012) e (Anderson & Bose 1983). Conforme abordado em (Anderson & Bose 1983), a velocidade do vento é modelada pela soma de quatro componentes, conforme equacionado em (1).

$$v_w(t) = v_b(t) + v_r(t) + v_g(t) + v_n(t) \quad (1)$$

Onde v_b é a componente base (constante) do vento, v_r é a componente em rampa, v_g é a componente que representa as rajadas e v_n é a componente de ruído de base, conforme representado na Figura 2.

Em determinadas regiões de operação, a velocidade angular do rotor pode ser representada de maneira constante. As pequenas variações na velocidade do vento não são refletidas no eixo do rotor devido à inércia da turbina, além disso, pode-se considerar o controle do passo das pás, o qual limita a velocidade de operação da turbina.

No presente trabalho, considerou-se apenas a velocidade base do vento tomada como constante.

mostrar que pode-se considerar apenas essa componente.

2.2 Modelo da turbina eólica

A dinâmica da transformação de energia na turbina eólica é bem conhecida pela relação apresentada na equação (2), de acordo com (Lubosny 2003), (Ackermann 2005), (Heier 1998) e (Rodríguez, Burgos & Arnalte 2003)

$$P_w = C_p \frac{1}{2} \rho A v_w^3 \quad (2)$$

Onde P_w é a potência extraída do vento, ρ é a densidade do ar, C_p é o coeficiente de potência, v_w é a velocidade do vento que passa pelo rotor e A é área de ação das pás da turbina ($A = \pi R^2$, onde R é o raio da pá em metros).

O torque aerodinâmico é dado pela relação entre a potência extraída do vento e a velocidade do rotor da turbina de acordo com a equação (3).

$$\tau_w = \frac{P_w}{\omega_w} \quad (3)$$

Devido ao fato de se trabalhar em modo de acoplamento direto, o torque mecânico transmitido para o gerador τ_{wg} foi considerado neste presente trabalho igual ao torque aerodinâmico.

O coeficiente de potência C_p possui um valor máximo de 0,593 (Rodríguez, Burgos & Arnalte 2003), ou seja, consegue-se extrair no máximo 59,3% da potência do vento (limite de Betz), devido às perdas aerodinâmicas. O coeficiente de potência pode ser aproximado através da equação (4), em função do ângulo de passo θ e a relação de velocidade de ponta λ . Conforme definido em (Heier 1998), tem-se que:

$$C_p(\lambda, \theta) = C_1 \left(C_2 \frac{1}{\beta} - C_3 \theta - C_4 \theta^x - C_5 \right) e^{-C_6 \frac{1}{\beta}} \quad (4)$$

Os coeficientes $C_1 - C_6$ e x são dependentes do tipo de rotor utilizado na turbina eólica, estes dados geralmente são dados pelo fabricante da turbina, porém muitos fabricantes recomendam utilizar $C_p = 0,45$ como uma simplificação usual. O parâmetro $1/\beta$ é definido em (Lubosny 2003), como representado na equação (5).

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{\lambda + 0,08\theta} - \frac{0,035}{1 + \theta^3} \quad (5)$$

Onde θ é o ângulo de passo, que é o ângulo entre o plano de rotação e a seção transversal da corda da pá e λ é definido de acordo com a equação (6).

$$\lambda = \frac{\omega_w R}{v_w} \quad (6)$$

Onde ω_w é a velocidade angular do rotor, R é o raio da pá e v_w é a velocidade do vento através das pás.

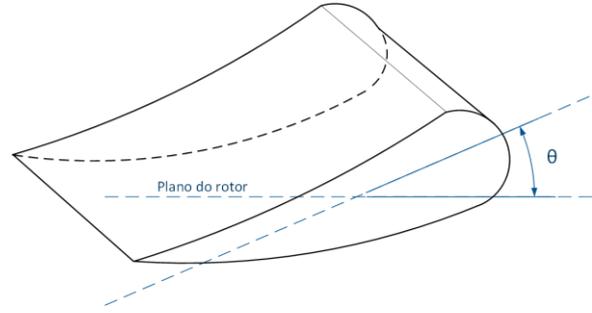


Figura 3 – Ângulo de passo

2.3 Modelo do gerador

O gerador pode ser considerado como um sistema que transforma a energia mecânica proveniente do vento em energia elétrica, partindo-se das tradicionais equações que descrevem as máquinas síncronas de ímã permanente, equacionadas em (7) e (8).

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \omega \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$L = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad (8)$$

Onde:

v_{an} , v_{bn} e v_{cn} são as tensões das fases a, b e c.

i_a , i_b e i_c são as correntes das fases a, b e c de estator respectivamente.

ϕ_{ra} , ϕ_{rb} e ϕ_{rc} são os fluxos produzidos no rotor.

R_s : resistência nas fases do estator.

L_s : auto-indutância dos enrolamentos de uma fase.

M_s : indutância mútua entre os enrolamentos das fases.

ω : velocidade angular rotórica em radianos elétricos por segundo.

As tensões internas produzidas na máquina são dadas por (9). A diferença entre a força contra eletromotriz ~~motriz~~ de uma máquina senoidal e trapezoidal, deve-se ao fato de como os enrolamentos se encontram distribuídos no estator e da distribuição do fluxo magnético no entreferro, ~~este é dependente da forma de magnetização dos ímãs, geometria do rotor e forma de colocação dos ímãs. Aquela,~~ que Para o caso senoidal, os enrolamentos se encontram distribuídos de maneira senoidal, enquanto que na máquina trapezoidal os enrolamentos são distribuídos de forma que haja uma interação de fluxo magnético constante entre o fluxo no entreferro e os enrolamentos do estator a cada 120° por fase usualmente (Miller 1989).

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \omega \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (9)$$

A potência mecânica no eixo da máquina é dada por (10).

$$P_m = \omega_m T_{el} \quad (10)$$

Sendo:

$$\omega_m = \frac{\omega}{Z_p} \quad (11)$$

ω_m : velocidade mecânica do rotor em rad/s.

T_{el} : torque eletromagnético no rotor.

Z_p : número de pares de polos.

A equação que descreve o torque eletromagnético é dada por (12).

$$T_{el} = Z_p (i_a \phi_{ra} + i_b \phi_{rb} + i_c \phi_{rc}) \quad (12)$$

3 Resultados

Para realizar as simulações foi utilizado o modelo do GSIP de Back EMF senoidal encontrado em (Huang et al. 2012). Para que fosse possível simular ambos os casos, trapezoidal e senoidal, utilizou-se os parâmetros listados na Tabela 1. Para o GSIP trapezoidal foi utilizado

Tabela 1 - Parâmetros do GSIP

Parâmetro	Valor
n_p	48
f_N	17.6 Hz
R_S	0,0224 Ω
$L_S - M_S$	1.5028 mH
ψ_f	5,3445 Wb

é no. de pólos ou de pares de pólos?

As simulações foram realizadas considerando uma velocidade angular no eixo do gerador constante equivalente ao valor nominal do gerador.

Foi também utilizada uma carga local resistiva, a qual foi alimentada à uma tensão de 380 V pelo conversor CC-CA operando em controle de tensão.

No presente trabalho foram analisados o fator de potência e a ondulação no barramento CC para as condições de simulação citadas anteriormente. Os resultados obtidos se encontram na Tabela 2 para o GSIP trapezoidal, e na Tabela 3 para o GSIP senoidal.

As formas de onda no barramento CC se encontram na Figura 4 para o GSIP trapezoidal e na Figura 6 para o GSIP senoidal. Por conseguinte pode-se visualizar as formas de onda de corrente e tensão obtidas em uma das fases do gerador, a qual representa as três fases do gerador por se tratar de um sistema simétrico e equilibrado, se encontram na Figura 5 para o GSIP trapezoidal e na Figura 7 para o GSIP senoidal.

Tabela 2 - Resultados GSIP Trapezoidal

Parâmetro	Valor
PF_{trap}	0,91
Ondulação no barramento CC	17,3V

usar símbolo normalmente "f"

O gerador de Back EMF Senoidal foi simulado utilizando as mesmas condições do gerador de Back EMF Trapezoidal.

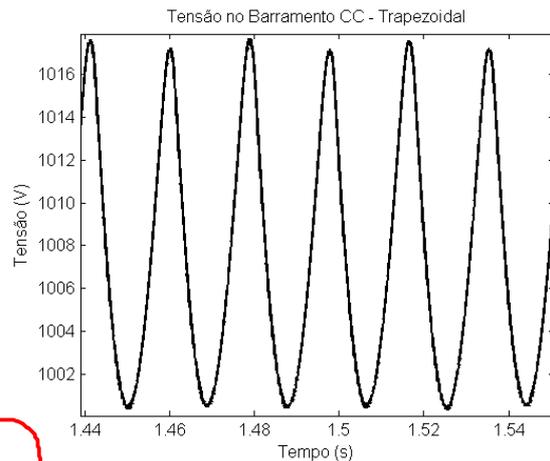


Figura 4 - Tensão no Barramento CC - Trapezoidal

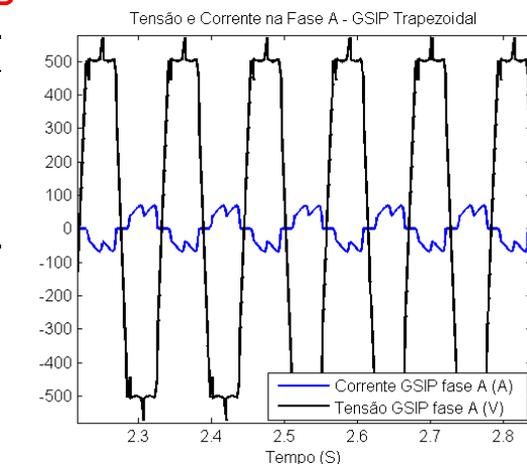


Figura 5 - Tensão e Corrente na Fase A - GSIP Trapezoidal

Para a GSIP senoidal foram obtidos os seguintes resultados:

Tabela 3 - GSIP Senoidal

Parâmetro	Valor
PF_{sen}	0,72

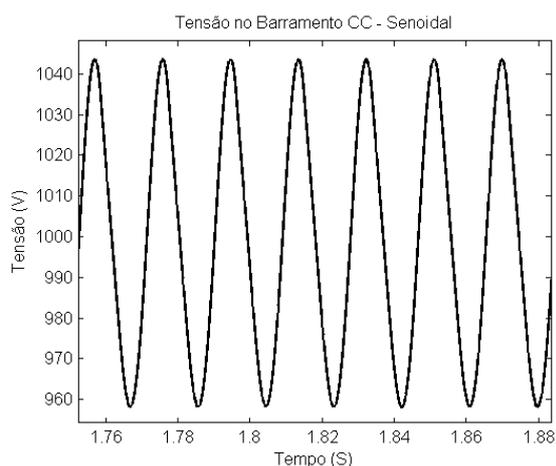


Figura 6 - Tensão no Barramento CC - Senoidal

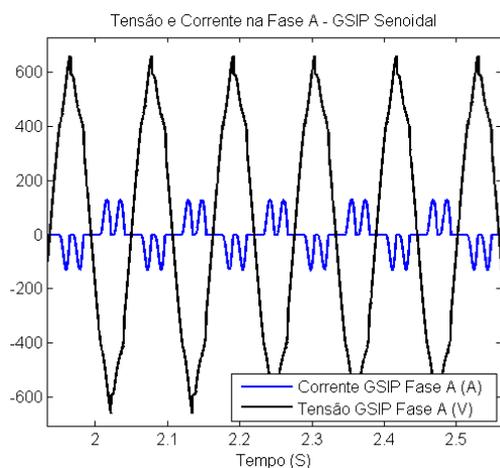


Figura 7 - Tensão e corrente na Fase A - GSIP Senoidal

O percentual de potência aparente que o GSIP de força contra eletromotriz senoidal fornece a mais quando comparada ao GSIP de força contra eletromotriz trapezoidal pode ser expresso de acordo com a equação (13).

$$n = 1 - \frac{S_{sen}}{S_{trap}} = 1 - \frac{2.60E4}{2.05E4} = 27\% \quad (13)$$

4 Conclusão

Ao analisar os resultados obtidos, percebe-se que o GSIP de força contra eletromotriz senoidal apresenta um fator de potência menor e uma maior ondulação no barramento CC para as mesmas condições de operação que o GSIP trapezoidal. O fator de potência menor do GSIP senoidal, permite concluir que, para suprir a mesma quantidade de potência ativa aplicada pelo conversor CC-CA na carga local, o GSIP senoidal apresenta uma potência

aparente maior quando comparada ao GSIP trapezoidal.

Portanto, pode-se afirmar que é necessário uma máquina senoidal ^{aproximadamente} 27% maior para suprir a mesma quantidade de potência ativa quando comparada à uma máquina trapezoidal.

O fato do GSIP trapezoidal apresentar uma menor ondulação no barramento CC, implica no dimensionamento de um capacitor de capacitância significativamente menor.

Conclui-se que o emprego do GSIP trapezoidal propicia uma significativa redução de custos no que concerne ao ~~dimensionamento do capacitor para a topologia analisada e no próprio dimensionamento do GSIP.~~

5 Referências

- Ackermann, T 2005, *Wind Power in Power Systems*, John Wiley & Sons, New York.
- Anderson, PM & Bose, A 1983, 'Stability Simulation Of Wind Turbine Systems', *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol PAS-102, no. 12, pp. 3791-3795.
- Heier, S 1998, *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, John Wiley & Sons, New York.
- Huang, H, Mao, C, Lu, J & Wang, D 2012, 'Small-signal modelling and analysis of wind turbine with direct drive permanent magnet synchronous generator connected to power grid', *IET Renewable Power Generation*, vol 6, no. 1, pp. 48-58.
- Lubosny, Z 2003, *Wind Turbine Operation in Electric Power Systems*, Springer, Berlin.
- Mgwatu, MI & Kainkwa, RRM 2012, 'Establishing a Probabilistic Model of Extrapolation Wind Speed Data for Wind Energy Prediction', *International Science*, vol 70, pp. 232-238.
- Miller, TJE 1989, *Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives*, Oxford, New York.
- Rodriguez, JL, Burgos, JC & Arnalte, SG 2003, *Sistemas Eolicos de Produccion de Energia Electrica*, Editorial Rueda S.L., Madrid.
- Semken, RS, Polikarpova, M, Röyttä, P, Alexandrova, J, Pyrhönen, J, Nerg, J, Mikkola, A & Backman, J 2012, 'Direct-drive permanent magnet generators for high-power wind turbines: benefits and limiting factors', *IET Renewable Power Generation*, vol 6, no. 1, pp. 1-8.
- World Wind Energy Association 2013, 'Half-Year Report', The World Wind Energy Association.