



18 a 21 de novembro de 2014, Caldas Novas - Goiás

## SISTEMA EÓLICO DE VELOCIDADE VARIÁVEL COM PMSG CONECTADO À REDE ELÉTRICA

Maro Jinbo, email: marojinbo@gmail.com<sup>1</sup>

Ghendy Cardoso Junior, email: ghendy@ufsm.br<sup>1</sup>

Felix Alberto Farret (*IEEE Member*), email: fafarret@gmail.com<sup>1</sup>

Jordan Gustavo Trapp, email: jordantrapp@yahoo.com.br<sup>2</sup>

Edson Ribeiro dos Santos, email: edsonrsmtm@gmail.com<sup>3</sup>

Jawilson Pereira Machado, email: machado@uceff.edu.br<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Maria (UFMS) – Departamento de Engenharia Elétrica, Santa Maria – RS, Brasil

<sup>2</sup>Instituto Federal Sul Rio-Grandense (IFSUL) – Departamento de Engenharia Elétrica, Venâncio Aires – RS - Brasil

<sup>3</sup>Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) – Departamento de Matemática, Chapecó – SC, Brasil

<sup>4</sup>Faculdade Empresarial de Chapecó (UCEFF) – Depart. Eng. Ambiental e Sanitária, Chapecó – SC, Brasil

**Resumo:** Este artigo apresenta um Sistema Eólico de Velocidade Variável (VSWT Variable Speed Wind Turbine) com Gerador de Ímãs Permanentes (PMSG Permanent Magnet Synchronous Generator). O PMSG é conectado à rede elétrica através de um conversor back-to-back. O modelo em Espaços de Estado em coordenadas  $dq0$  do conversor trifásico bidirecional de três braços a IGBTs utilizados na retificação e inversão do sistema eólico será validado em simulação. Compensadores proporcional integral (PI) em coordenadas  $dq0$  são utilizados no controle dos conversores. O projeto do compensador PI é executado através do software Matlab® e apresentado. Resultados de simulação através do software PSIM® tanto do retificador quanto do inversor são demonstrados a fim de comprovar as metodologias utilizadas e a eficácia do compensador projetado.

**Palavras-chave:** VSWT, PMSG, controle PI, conexão à rede.

### 1. INTRODUÇÃO

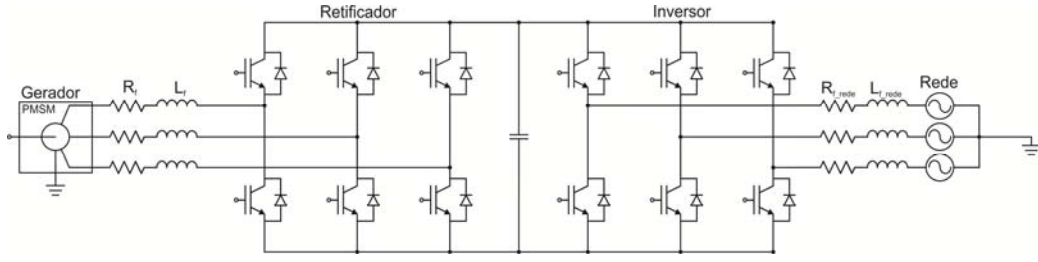
Sistemas de geração de energia baseados em fontes renováveis como a solar e a eólica estão se tornando cada vez mais importantes com o aumento percentual de suas contribuições na energia total gerada em certos países. Fatores como a escassez de potencial hidráulico a ser explorado, resíduos do uso da energia nuclear e a poluição que causa o carvão mineral fortalecem ainda mais a utilização de sistemas eólicos de energia (Salles, 2009).

Este artigo apresenta um sistema eólico de velocidade variável, conforme Fig. 1, o qual consiste em um gerador de ímãs permanentes conectado à rede elétrica através de um conversor CA/CC (retificador) no lado do gerador e um conversor CC/CA (inversor) no lado da rede. Filtros  $L_f$  são inseridos na linha do gerador e da rede para reduzir as harmônicas nas correntes geradas e injetadas. Os dois conversores são trifásicos com três braços, cada braço com duas chaves (IGBTs).

O controle do retificador trifásico em coordenadas  $dq0$  utiliza dois compensadores do tipo PI (proporcional-integral), um para o eixo direto e outro para o eixo em quadratura. Esse controle utiliza a velocidade do vento (m/s) para gerar uma referência de potência ativa através de uma tabela (*lookup table*) e um algoritmo MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) realiza o rastreamento do ponto de máxima potência.

Os compensadores do controle do inversor trifásico também são do tipo PI e tem a função de controlar as correntes trifásicas injetadas na rede de acordo com a potência ativa que o gerador entrega ao retificador. Além disso, uma malha de tensão contribui na referência de potência ativa injetada na rede, controlando a tensão sobre o barramento CC.

Considera-se em ambos os lados, gerador e rede elétrica, fator de potência unitário.

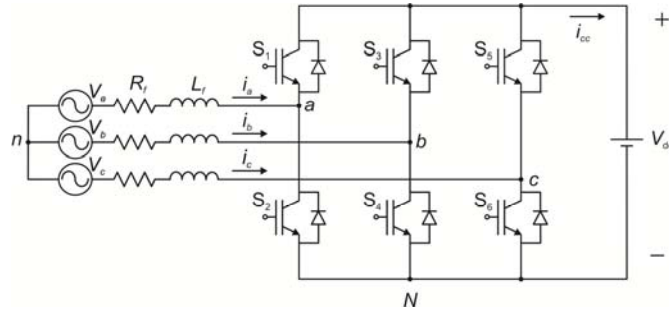


**Figura 1. Sistema eólico VSWT conectado à rede.**

## 2. MODELAGEM DO CONVERSOR ESTÁTICO

A modelagem do conversor trifásico bidirecional (Borgono, 2005 e Collier, 2011) é realizada neste artigo. O modelo é utilizado para a análise e projeto de controladores para os dois conversores do sistema eólico através da utilização da ferramenta *Sisotool* do *Matlab*®. O modelo da Fig. 2 considera algumas simplificações, como por exemplo, a fonte trifásica senoidal ideal  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  e a tensão no barramento CC igual a uma tensão contínua  $V_{dc}$  resultando nas equações apresentadas na Eq. (1).

### 2.1 Modelo em Espaço de Estados – Coordenadas abc



**Figura 2. Conversor estático bidirecional.**

$$\begin{aligned} V_a &= R_f i_a + L_f \dot{i}_a + u_{aPWM} + V_{Nn} \\ V_b &= R_f i_b + L_f \dot{i}_b + u_{bPWM} + V_{Nn} \\ V_c &= R_f i_c + L_f \dot{i}_c + u_{cPWM} + V_{Nn} \end{aligned} \quad (1)$$

A diferença de potencial  $u_{xPWM}$  é a tensão entre o ponto x ( $x=a$  ou  $b$  ou  $c$ ) e o ponto N da Fig. 2. Somando as três equações Eq. (1), aplicando-se a Lei de Kirchhoff das correntes no nó n e realizando-se as devidas substituições obtêm-se as equações em espaços de estados do conversor bidirecional em coordenadas abc, conforme Eq. (2) (Borgono, 2005 e Collier, 2011). A tensão  $u_{xPWM}$  é substituída na Eq. (2) pelo produto da tensão no barramento CC e a razão cíclica,  $V_{dc} \cdot d_x(t)$  resultando na Eq. (3);

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \end{bmatrix} = \frac{R_f}{L_f} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{3L_f} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{aPWM} \\ u_{bPWM} \\ u_{cPWM} \end{bmatrix} + \frac{1}{3L_f} \begin{bmatrix} -2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \end{bmatrix} = \frac{R_f}{L_f} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{V_{dc}}{3L_f} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{aPWM} \\ d_{bPWM} \\ d_{cPWM} \end{bmatrix} + \frac{1}{3L_f} \begin{bmatrix} -2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

Ou na forma padrão, Eq. (4) e Eq. (5):

$$\dot{X}(t) = A_{abc} X(t) + B_{abc} d(t) + F_{abc} W(t) \quad (4)$$

$$Y(t) = C_{abc} X(t) + E_{abc} U(t) \quad (5)$$

onde:

$X(t)$  é o vetor de estados, as correntes nos indutores  $L_f$ ;

$u(t)$  é o vetor de controle, as tensões em cada braço;

$d(t)$  é o vetor com as razões cíclicas ( $S_1$   $S_3$   $S_5$ );

$W(t)$  é o vetor de distúrbios nas tensões da fonte CA;

$Y(t)$  é o vetor saída, correntes nos indutores  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$ ;

$U(t)$  é o vetor entrada,  $d_a, d_b, d_c, V_a, V_b$  e  $V_c$ .

## 2.2 Modelo em Espaço de Estados – Coordenadas dq0

Realizando-se a transformação de Park, o qual transforma as coordenadas abc em coordenadas dq0 através da matriz  $T^{-1}$  apresentada na Eq. (6), obtém-se o modelo em espaços de estados do conversor em coordenadas dq0, Eq. (7) e Eq. (8):

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{6}}{3} \cos(\theta) & -\frac{\sqrt{6}}{6} \cos(\theta) + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin(\theta) & -\frac{\sqrt{6}}{6} \cos(\theta) - \frac{\sqrt{2}}{2} \sin(\theta) \\ -\frac{\sqrt{6}}{3} \sin(\theta) & \frac{\sqrt{6}}{6} \sin(\theta) + \frac{\sqrt{2}}{2} \cos(\theta) & \frac{\sqrt{6}}{6} \sin(\theta) - \frac{\sqrt{2}}{2} \cos(\theta) \\ \frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\dot{X}_{dq0}(t) = A_{dq0} X_{dq0}(t) + B_{dq0} d_{dq0}(t) + F_{dq0} W_{dq0}(t) \quad (7)$$

$$Y(t)_{dq0} = C_{dq0} X(t)_{dq0} + E_{dq0} U(t)_{dq0} \quad (8)$$

onde:

$$X_{dq0} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$A_{dq0} = T^{-1} (A_{abc} T - \dot{T}) = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & \omega & 0 \\ -\omega & -\frac{R_f}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_f}{L_f} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$B_{dq0} = T^{-1} B_{abc} T = \frac{V_{dc}}{L_f} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$F_{dq0} = T^{-1} F_{abc} T = \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

### 2.3 Funções de Transferências do Conversor – Planta

A partir da Eq. (7), modelo em espaço de estados do conversor em coordenadas dq0, pode-se extrair as funções de transferências da planta para o projeto dos controladores. Para isso, pode-se utilizar a função *ss2tf* disponível no *Matlab*®. Assim, obtêm-se as funções de transferências das saídas  $i_d$  e  $i_q$  em relação a cada uma das entradas  $d_d$ ,  $d_q$ ,  $V_d$  e  $V_q$  de forma literal ou numérica. As funções de interesse são  $i_d/d_d$  Eq. (13) e  $i_q/d_q$  Eq. (14) para a análise e projeto de controladores. As equações Eq. (13) e Eq. (14) são idênticas neste caso.

Função de transferência da corrente  $i_d$  em função de  $d_d$ :

$$\frac{i_d}{d_d} = \frac{V_{cc} L_f s + V_{cc} R_f}{L_f^2 s^2 + 2L_f R_f s + (R_f^2 + L_f^2 \omega^2)} \quad (13)$$

Função de transferência da corrente  $i_q$  em função de  $d_q$ :

$$\frac{i_q}{d_q} = \frac{V_{cc} L_f s + V_{cc} R_f}{L_f^2 s^2 + 2L_f R_f s + (R_f^2 + L_f^2 \omega^2)} \quad (14)$$

## 3. CONTROLE

### 3.1 Controle do Conversor no Lado do Gerador *PMSG*

O controle do conversor no lado do gerador (Muyeen; Takahashi; Ali, 2007 e Muyeen; Takahashi; Murata, 2008) é responsável por realizar a transferência de energia para o barramento cc baseado nas referências de potência ativa  $P$ . A referência  $P$  é oriunda de um valor de potência ativa de uma tabela (*lookup table*) que relaciona velocidade do vento em m/s e potência equivalente em Watts. Este valor tabelado de potência é processado em um algoritmo *MPPT* (*Maximum Power Point Tracker*) (Errami, 2012) que resulta em  $P^*$  aplicado como referência de potência ativa no controle do retificador. A referência de potência reativa  $Q^*$  é ajustada em zero no controle do retificador para um fator de potência unitário. O diagrama de blocos do controle do conversor do lado do gerador está ilustrado na Fig. 3. C1 e C2 são os compensadores do controle deste estágio. Efetivamente o controle atua nas correntes de linha geradas  $I_{abc}$  na saída do gerador, mas em coordenadas dq0 utilizadas no controle são as correntes  $I_{dq0}$ .

As referências de correntes geradas  $i_d^*$  e  $i_q^*$  estão de acordo com a Eq. (15) e Eq. (16).

$$i_d^*(t) = \frac{P^* V_d + Q^* V_q}{V_d^2 + V_q^2} \quad (15)$$

$$i_q^*(t) = \frac{P^* V_q - Q^* V_d}{V_d^2 + V_q^2} \quad (16)$$

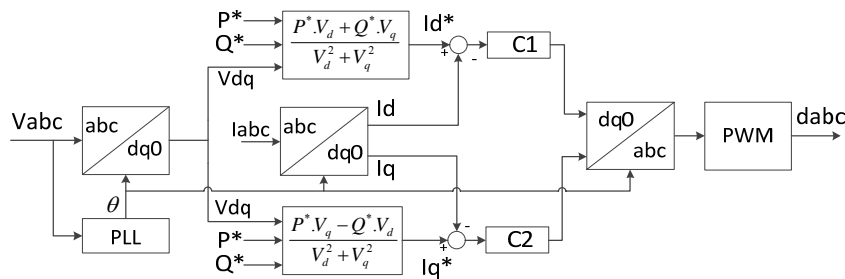


Figura 3. Diagrama de controle do retificador.

### 3.2 Controle do Conversor no Lado da Rede Elétrica

O controle do conversor no lado da rede elétrica (Nascimento, 2009), apresentado na Fig. 4 e Fig. 5, tem a função de controlar as correntes injetadas na rede  $I_{abc}$  ou  $I_{dq0}$  de acordo com as referências de potência ativa  $P^*_{rede}$  e reativa  $Q^*_{rede}$ . Na Fig. 5 temos a  $P_{transferida}$  que é a potência ativa que o gerador efetivamente transfere para o retificador e consequentemente ao barramento cc. Enquanto  $Q^*_{rede}$  é a potência reativa demandada pela rede que neste artigo foi ajustado em 0 VAR, ou seja, fator de potência unitário. A tensão no barramento  $V_{dc}$  é regulada através da referência de tensão  $V_{dc}^*$ , e esta diferença de tensão multiplicada pela corrente  $I_{dc}$  que entra no inversor contribui com acréscimos e decréscimos de potência ativa na referência de  $P^*_{rede}$ .

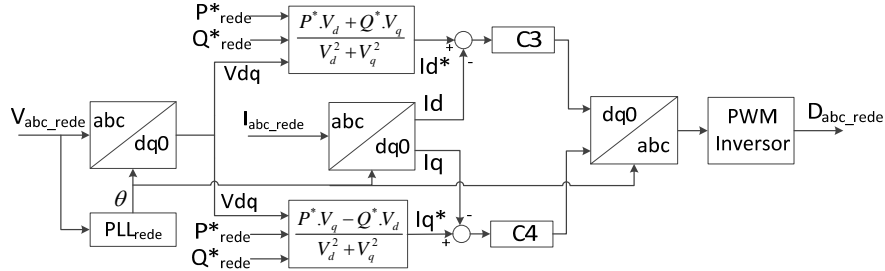


Figura 4. Diagrama de controle do inversor.

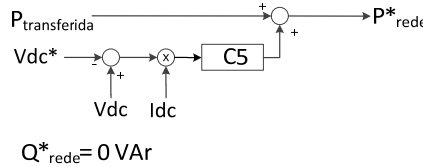


Figura 5. Referências de potências do controle do inversor.

## 4. PROJETO DE COMPENSADORES

### 4.1 Compensador da Malha de Corrente

O controle do conversor no lado do gerador *PMSG* em coordenadas dq0 (Li, 2009 e Krishnan, 2010) possui dois compensadores, C1 no eixo d e C2 no eixo q, de acordo com o diagrama da Fig. 3. Os compensadores C3 e C4 são referentes aos eixos d e q do controle do conversor no lado da rede, como apresentado na Fig. 4 (Barbi; Martins, 2005). Na Fig. 5 ainda temos um compensador C5 do tipo P (proporcional) que atua na regulação da tensão no barramento cc. Esses compensadores serão objeto de projeto, análise e simulação.

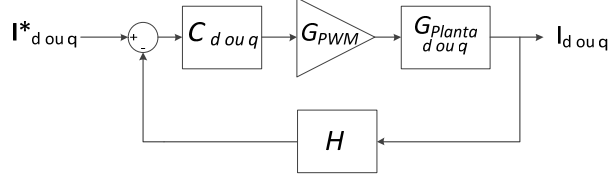


Figura 6. Diagrama de controle em coordenadas d e q.

Na Figura 6 temos o diagrama de blocos do controle das correntes  $i_d$  e  $i_q$  que consistem nas correntes da saída do gerador ou as correntes injetadas na rede em coordenadas dq0. As correntes  $i_d^*$  e  $i_q^*$  são as referências de correntes conforme Fig. 3 e Fig. 4.

$C_{d \text{ ou } q}$  faz referência a um dos quatro compensadores que serão projetados (C1, C2, C3 ou C4).  $G_{PWM}$  é o ganho referente ao ajuste de amplitude do sinal modulante em relação à portadora. O ganho H da realimentação será considerado de valor unitário.  $G_{planta}$  é a função de transferência apresentada na Eq. (13) e Eq. (14).

O projeto do compensador C3 do inversor será efetuado detalhadamente. A Tabela 1 apresenta as especificações do conversor utilizado.

**Tabela 1. Especificações do inversor.**

Tensão de linha da rede	127Vrms
Frequência da rede	60Hz
Tensão no barramento CC	350V
Resistência do filtro $R_f$	$0.12\Omega$
Indutância do filtro $L_f$	2.5mH
Frequência de Chaveamento $f_s$	12KHz

Utilizando-se o *Matlab*<sup>®</sup> e aplicando-se os valores da Tab. 1 na Eq. (7) obtém-se a seguinte função de transferência:

$$\frac{i_d}{d_d} = \frac{-75,68s^2 - 7265s - 1,744.10^5}{s^3 + 144s^2 + 1,49.10^5s + 6,932.10^6} \quad (17)$$

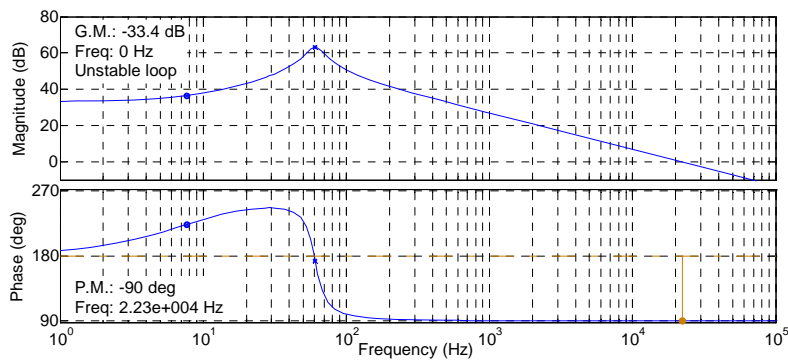
Utilizando-se a Eq. (17) como  $G_{\text{Planta}_d}$ , multiplicando-se por  $G_{\text{PWM}} = 1$  de acordo com a Fig. 6, obtém-se  $G_{\text{Planta}_d} \times G_{\text{PWM}}$ . Este produto consiste na função de transferência em malha aberta do sistema de controle. O diagrama de Bode do sistema não compensado apenas com a planta  $G_{\text{Planta}_d}$ , Fig. 7.

O projeto do compensador C3 foi realizado utilizando-se a ferramenta SISOTOOL do *Matlab*. Objetivou-se o projeto de um compensador do tipo PI, bastante comum neste tipo de aplicação.

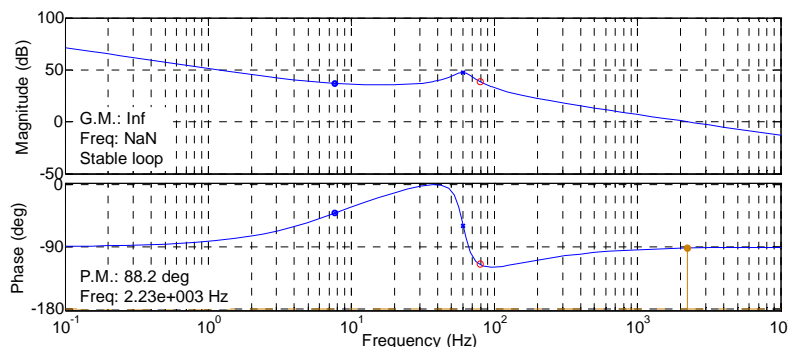
Pode-se observar na Fig. 7 que a planta possui uma margem de fase de  $-90^\circ$  e uma frequência de cruzamento  $f_c = 22,3\text{KHz}$  bem acima da frequência de chaveamento  $f_s = 12\text{KHz}$ . Dessa forma, projetou-se um compensador PI, objetivando uma frequência de cruzamento  $f_c = f_s/10$  uma década abaixo da frequência de chaveamento ou mais próximo possível. O que resultou em uma margem de fase de  $88,2^\circ$ , malha estável,  $f_c = 2,23\text{ KHz}$  como pode ser observado no diagrama de bode do sistema compensado apresentado na Fig. 8.

$$C_3 = -50 \frac{(1 + 0.002s)}{s} \quad (18)$$

Considerando-se a utilização do mesmo modelo matemático em espaço de estados para o retificador e também para o inversor, adotou-se consequentemente o mesmo compensador Eq. (18) nos demais compensadores C1, C2 e C4.



**Figura 7. Diagrama de Bode  $G_{\text{Planta}_d}$ .**



**Figura 8. Diagrama de Bode da Planta Compensada.**

## 4.2 Compensador da Malha de Tensão do Inversor

A regulação da tensão no barramento cc em  $V_{dc} = 350$  V é realizado de acordo com o diagrama da Fig. 5. A potência ativa de referência  $P^*_{rede}$  é a composição entre a potência ativa que o gerador transfere para o retificador denominado de  $P_{transferida}$  que é medido no controle do retificador e a parcela proveniente da regulação da tensão no barramento.

O compensador C5 da Fig. 5 é do tipo P (proporcional), cujo valor é obtido pelo balanço entre as potências ativas entregue a rede e as potências no barramento cc, valor ajustado conforme Eq. (19) a seguir:

$$C_5 = 0.5 \quad (19)$$

## 5. SIMULAÇÃO

As simulações foram realizadas inicialmente no *Simulink/Matlab*® para demonstrar a validação das equações em espaço de estados do conversor bidirecional Eq. (7). Esta etapa de simulação foi realizada somente para o conversor operando como inversor, injetando correntes na rede elétrica. Correntes  $i_{dq\_rede}$  do circuito e do modelo foram sobrepostos na visualização, Fig. 9. Na etapa seguinte de simulações com *PSIM*® validou-se o modelo também para o conversor operando como retificador.

A segunda parte das simulações foram realizadas no *PSIM*® com o sistema eólico interligado, gerador *PMSG*, retificador, inversor e a rede elétrica. Apresenta-se o funcionamento do sistema eólico, através das correntes geradas e injetadas, tensão no barramento CC, velocidade de rotação do gerador, sinais de controle seguindo suas referências tanto no controle do retificador como do inversor entre outros sinais. Pretende-se demonstrar o desempenho dos compensadores projetados.

### 5.1 Simulação do Modelo em Espaço de Estados dq0

A simulação de validação do modelo em espaço de estados em coordenadas dq0, Eq. (7), do conversor bidirecional, Fig. 2, foi realizado no ambiente do *Simulink*, com as especificações da Tabela 1 apresentadas na seção anterior IV.

O vetor de saída  $Y(t)_{dq0}$  do modelo matemático Eq. (8) que são as correntes  $i_{d\_modelo}$ ,  $i_{q\_modelo}$  injetadas na rede elétrica coincidem com as correntes do circuito  $i_d$ ,  $i_q$ . Este resultado pode ser observado na Fig. 9. O vetor  $U(t)_{dq0}$  de entrada do modelo Eq. (8) consiste nas razões cíclicas  $d_d$ ,  $d_q$ ,  $d_0$  e nas tensões da rede elétrica  $V_d$ ,  $V_q$ ,  $V_0$ . Mas para o projeto dos quatro compensadores interessa somente as entradas  $d_d$ ,  $d_q$ .

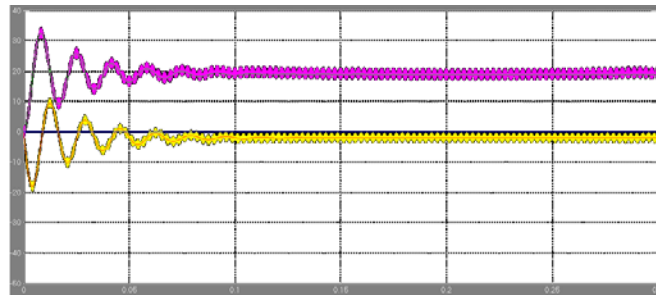


Figura 9. Correntes injetadas na rede do modelo e do circuito inversor.

### 5.2 Simulação do Sistema Eólico Conectado à Rede

Implementou-se o circuito de potência da Fig. 1 no PSIM9.03, gerador *PMSG*, retificador trifásico e inversor trifásico conectado na rede elétrica e os seus respectivos controles de acordo com a Fig. 3 e a Fig. 4, com as especificações da Tab. 2.

**Tabela 2. Especificações.**

<b>Gerador PMSG</b>	
Potência Nominal da Turbina	2.0 kW
Tensão de linha RMS/1000 RPM	380 V <sub>RMS</sub>
<b>Retificador Trifásico</b>	
Tensão de linha RMS	380V <sub>RMS</sub>
Frequência de chaveamento $f_s$	12KHz
Tensão no barramento CC	350V
Resistência do filtro $R_f$	0.12 $\Omega$
Indutância do filtro $L_f$	2.5mH
Referência de $Q^*$ (Pot. Reativa)	0VAr
Referência de $P^*$ (Pot. Ativa)	Vel. Vento $\rightarrow$ Lookup table $\rightarrow$ MPPT
<b>Inversor Trifásico</b>	
Tensão de linha da rede RMS	127V <sub>RMS</sub>
Frequência da rede	60Hz
Tensão no barramento CC	350V
Resistência do filtro $R_f$	0.12 $\Omega$
Indutância do filtro $L_f$	2.5mH
Referência de $Q_{rede}^*$ (Pot. Reativa)	0VAr
Referência de $P_{rede}^*$ (Pot. Ativa)	Pot. Gerador $\rightarrow$ Retificador

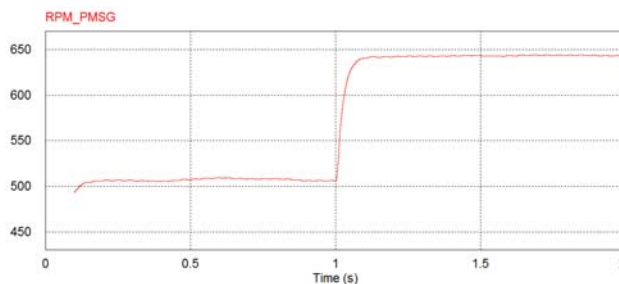
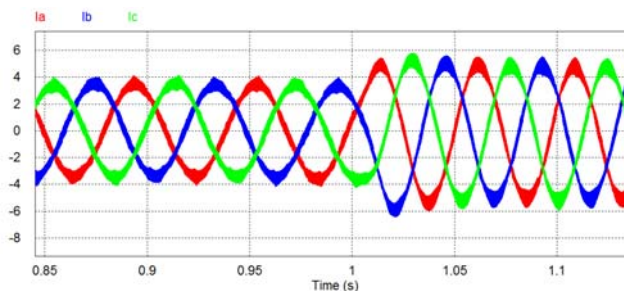
Objetivando a comprovação da validade das funções de transferências  $i_d/d_d$ , Eq. (13) e  $i_q/d_q$ , Eq. (14) como modelo (planta) dos conversores, no mesmo esquemático do *PSIM* implementou-se o diagrama de controle da Fig. 5 no controle do retificador e também do inversor.

Implementou-se o diagrama da Fig. 5 para o controle da tensão barramento CC.

As simulações consistiram em degraus aplicados na velocidade do vento seguindo a Tab. 3. O efeito do degrau de 2m/s em  $t = 1.0$ seg poderá ser visualizado nas figuras 13 a 18.

**Tabela 3. Variações na velocidade do vento.**

<b>Tempo [seg]</b>	0.0	1.0
<b>Degrau [m/s]</b>	8	2
<b>Veloc. final</b>	8	10

**Figura 13. Velocidade do gerador PMSG.****Figura 14. Correntes  $I_{abc}$  na saída do gerador PMSG.**



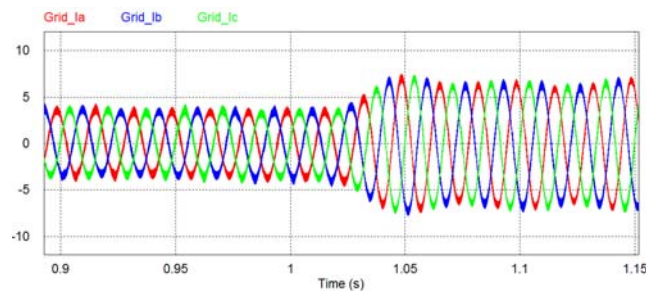


Figura 15. Correntes  $I_{abc}$  injetadas na rede elétrica.

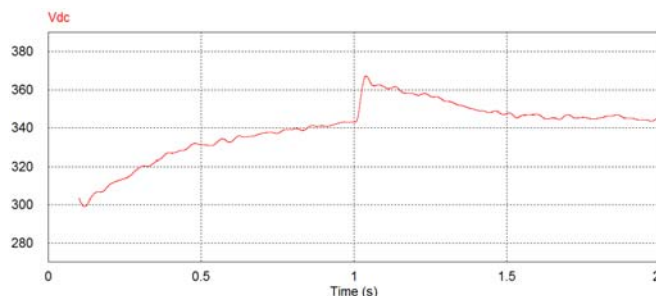


Figura 16. Tensão no barramento CC,  $V_{dc}^* = 350V$ .

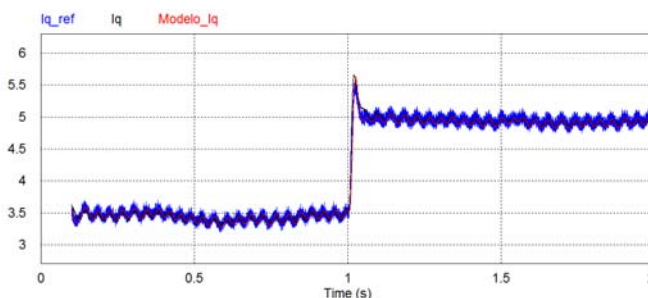


Figura 17. Referência de corrente  $i_q^*$ ,  $i_q$  do circuito,  $i_q$  do modelo matemático do retificador.

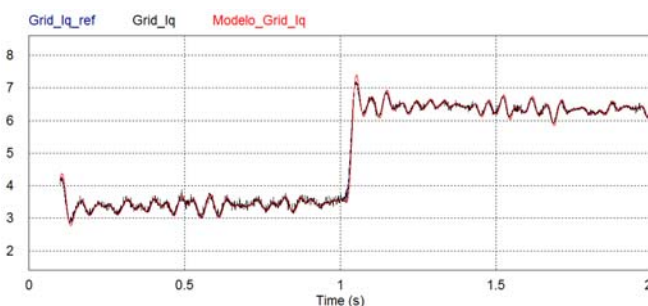


Figura 18. Referência de corrente  $i_{q\_rede}^*$ ,  $i_{q\_rede}$  do circuito,  $i_{q\_rede}$  do modelo matemático do inversor.

## 6. CONCLUSÕES

O modelo obtido em espaço de estados em coordenadas dq0 do conversor estático bidirecional forneceu as funções de transferência  $i_d/d_d$  e  $i_q/d_q$  que foram validadas com sucesso em simulação e utilizadas na ferramenta *Sisotool* do *Matlab*<sup>®</sup> para projetar os compensadores do tipo PI para os controladores do conversor *back-to-back*.

A validação das FTs do modelo matemático foram realizadas em simulação no *PSIM*<sup>®</sup>. As correntes injetadas na rede  $i_{d\_modelo}$  e  $i_{q\_modelo}$  foram comparadas com as geradas pelo circuito, obtendo uma perfeita sobreposição e as mesmas seguindo suas respectivas referências  $i_d^*$  e  $i_q^*$ .

Os compensadores projetados C3 e C4 do controle do conversor no lado da rede e utilizados também em C1 e C2 no controle do conversor no lado do gerador *PMSG* apresentaram resultados satisfatórios. As correntes trifásicas geradas e as correntes injetadas na rede foram controladas com êxito de acordo com a potência ativa gerada e ainda rastreando um ponto de máxima operação.

O compensador C5 regulou com êxito a tensão no barramento cc mantendo a tensão próximo do valor de

referência.

## REFERÊNCIAS

- Barbi, I., Martins and Denizar C. 2005. *Introdução ao estudo dos conversores CC-CA*. 2ª ed. rev. Florianópolis, Brasil: INEP/UFSC.
- Borgono, D. 2005. Tese de Doutorado: “Análise, modelagem e controle de retificadores PWM trifásicos”. Florianópolis, Brasil: INEP/UFSC.
- Collier, D. A. F. 2011. *Modelagem e controle de retificadores PWM trifásicos conectados a geradores síncronos de ímãs permanentes em sistemas de conversão de energia eólica*. Florianópolis, Brasil: INEP/UFSC.
- Errami, Y. 2012. *Control strategy for PMSG wind farm based on mppt and direct power control*. IEEE.
- Krishnan, R. 2010. *Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives*. CRC Press.
- Li, S. 2009. Conventional and novel control designs for direct driven PMSG wind turbines. *Electric Power Systems Research*. Brasil: Elsevier.
- Muyeen, S. M., Takahashi, R., Ali, M. H. 2007. Transient stability analysis of permanent magnet variable speed synchronous wind generator. *Proceeding of international conference on electrical machines and systems*. Coréia do Sul.
- Muyeen, S. M., Takahashi, R., Murata, T. 2008. Transient stability enhancement of variable speed wind turbine driven pmsg with rectifier-boost converter-inverter. *Proceeding of international conference on electrical machines and systems*. IEEE.
- Nascimento, A. C. 2009. *Avaliação de estratégias de controle de potência reativa de aerogeradores síncronos em redes elétricas*. Brasil: ITEC/PPGEE/UFPA.
- Salles, M. B. C. 2009. *Modelagem e análise de geradores eólicos de velocidade variável conectados em sistemas de energia elétrica*. São Paulo, Brasil: EPUSP.

## VARIABLE SPEED WINDTURBINE WITH PMSG CONNECTED TO GRID

Maro Jinbo, email: marojinbo@gmail.com<sup>1</sup>

Ghendy Cardoso Junior, email: ghendy@ufsm.br<sup>1</sup>

Felix Alberto Farret (IEEE Member), email: fafarret@gmail.com<sup>1</sup>

Jordan Gustavo Trapp, email: jordanttrapp@yahoo.com.br<sup>2</sup>

Edson Ribeiro dos Santos, email: edsonrsmtm@gmail.com<sup>3</sup>

Jawilson Pereira Machado, email: machado@uceff.edu.br<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Federal University of Santa Maria, UFSM – Depart. Electrical Engineering.  
Avenida Roraima, 1000 Santa Maria/RS.

<sup>2</sup>Federal Institute Sul Rio-Grandense, IFSUL - Departament of Electrical Engineering.  
Venâncio Aires/RS

<sup>3</sup>Federal University of Fronteira Sul, UFFS – Department of Mathematic.  
Avenida Fernando Machado, 108 Chapecó/SC.

<sup>4</sup>Faculdade Empresarial de Chapecó (UCEFF) - Department of Environmental and Sanitary Engineering.  
Rua Lauro Muller, 767 E, Chapecó/SC.

**Abstract:** This paper presents a VSWT (Variable Speed Wind Turbine) with type generator Permanent Magnet Synchronous Generator PMSG connected to the grid through a converter back-to-back. The modeling tri phase bidirectional converter with three arms IGBTs at State Spaces in the  $qd0$  frame used in the rectification and inversion of the wind system will be validated in simulation. A configuration control PI  $dq0$  coordinates is used to control the converter. Your PI compensator design is demonstrated on simulated Matlab<sup>®</sup> applied on the generator side converter and also the network. Simulation results using the software PSIM<sup>®</sup> as both the rectifier inverter are demonstrated to prove the methodologies used and effectiveness of the compensator designed.

**Keywords:** VSWT, PMSG, PI control, grid connection.