

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LUANNA MARIA SILVA DE SIQUEIRA

**Sistema de Geração Eólica Baseado em um
Gerador de Indução de Rotor Bobinado com
Conversor Série no Lado da Rede Elétrica sem
Transformador**

João Pessoa - Paraíba

Novembro de 2017

Luanna Maria Silva de Siqueira

Sistema de Geração Eólica Baseado em um Gerador de Indução de Rotor Bobinado com Conversor Série no Lado da Rede Elétrica sem Transformador

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal da Paraíba como exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal da Paraíba
Centro de Energias Alternativas e Renováveis
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Nady Rocha

João Pessoa - Paraíba
Novembro de 2017

S618s Siqueira, Luanna Maria Silva de

Sistema de Geração Eólica Baseado em um Gerador de Indução de Rotor Bobinado com Conversor Série no Lado da Rede Elétrica sem Transformador./ Luanna Maria Silva de Siqueira. – João Pessoa, 2017.

67f. il.:

Orientador: Prof. Dr. Nady Rocha.

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Elétrica) Campus I - UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. Gerador de Indução de Rotor Bobinado 2. Sistema de Geração de Energia Eólica 3. Conversor em Série 4. Controle I. Título.

BS/CT/UFPB

CDU: 2.ed. 621.548(043)

Luanna Maria Silva de Siqueira

Sistema de Geração Eólica Baseado em um Gerador de Indução de Rotor Bobinado com Conversor Série no Lado da Rede Elétrica sem Transformador

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal da Paraíba como exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado:

Prof. Dr. Nady Rocha

Universidade Federal da Paraíba
Orientador

Prof. Dr. Juan Moises M. Villanueva

Universidade Federal da Paraíba
Avaliador

Prof. Dr. Isaac Soares de Freitas

Universidade Federal da Paraíba
Avaliador

João Pessoa - Paraíba

Novembro de 2017

Dedico este trabalho à minha falecida avó, Quitéria Júlia da Silva, por toda inspiração, amor e confiança que foram alicerces para esta conquista. Conquista que teve por objetivo orgulhá-la.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço à Deus, por sempre me abençoar com oportunidades incríveis e me mostrar que a vontade Dele é maior e melhor que a minha.

Agradeço à minha família, minha mãe Cleide, meu pai Zeildo e meus irmãos Luma e Rafael, por estarem sempre a postos quando precisei, por serem meu porto seguro e por todo esforço que me permitiu seguir em frente.

Ao meu marido, Mateus, pela pessoa maravilhosa que é, por todo suporte, pela compreensão da minha ausência e cansaço em vários momentos e por sempre me incentivar a continuar nossa jornada e realizar nossos sonhos.

Aos meus amigos de curso, Caio, Guilherme e Filype, por todo apoio e conhecimento compartilhado, que fizeram essa caminhada ser mais interessante e enriquecedora.

Ao meu orientador, Nady Rocha, pela paciência comigo nos últimos anos, por todos os valiosos ensinamentos e conselhos que com certeza levarei para minha vida profissional.

E a todos que de alguma forma contribuíram para este trabalho.

*"There are no great limits to growth,
because there are no limits of human
intelligence, imagination, and wonder."
(Ronald Reagan)*

Resumo

Este trabalho apresenta o estudo de um sistema de geração eólica com conexão à rede elétrica utilizando máquina de indução de rotor bobinado (*Doubly Fed Induction Generator* – *DFIG*). A configuração proposta apresenta o DFIG com os enrolamentos do estator ligados diretamente a rede trifásica e conectados a um conversor série, os enrolamentos do rotor alimentados por um conversor CA-CC-CA. O conversor em série é introduzido nesta topologia com a finalidade de garantir uma tensão trifásica senoidal e equilibrada aos terminais do gerador mesmo se a tensão da rede apresentar algum afundamento de tensão. É apresentada uma comparação entre a topologia proposta e a convencional, que apresenta o uso de transformador. Para o desenvolvimento deste trabalho, é apresentado o modelo do sistema, o modelo da turbina eólica e o modelo dinâmico da máquina. São apresentadas as estratégias *Power Width Modulation* – *PWM* e as estratégias de controle dos conversores. Foi realizado o controle da potência reativa, da velocidade do rotor, da tensão do barramento CC e da corrente de circulação, para melhor desempenho do sistema. Por fim, foram realizadas simulações em ambiente computacional, através do software PSIM[®].

Palavras-chave: Gerador de Indução de Rotor Bobinado, Sistema de Geração de Energia Eólica, Conversor em Série, Controle.

Abstract

This work presents the study of a system of wind generation connected to the electrical grid using Doubly Fed Induction Generator (DFIG). The proposed configuration presents the DFIG with the stator windings connected directly to the three-phase grid and connected to a serial converter, the rotor windings are fed by a AC-DC-AC converter. The series inverter is added to this topology in order to ensure a balanced three-phase sine-wave voltage to the generator terminals even if the grid voltage has some voltage sag. It is presented a comparison between the proposed and the conventional topology, which presents the use of transformer. For the development of this work, the model of the system, the model of the wind turbine and the dynamic model of the machine is presented as well. The Power Width Modulation (PWM) and control of the converters strategies are presented. Control of the reactive power, rotor speed, DC bus voltage and circulation current was performed for better system performance. Finally, simulations were performed in a computational environment, through the software PSIM[®].

Keywords: Doubly Fed Induction Generator, Wind Energy Generation System, Series Converter, Control.

Lista de ilustrações

Figura 1.1 – (a) Topologia proposta por (MORREN; HAAN, 2005). (b) Topologia proposta por (SEMAN et al., 2006). (c) Topologia proposta por (SEMAN; NIIRANEN; ARKKIO, 2006).	30
Figura 1.2 – Topologia proposta por (IBRAHIM et al., 2011).	31
Figura 1.3 – (a) Topologia proposta por (HU; HE, 2009). (b) Topologia proposta por (LUNA et al., 2009).	32
Figura 1.4 – Topologias propostas por (FLANNERY; VENKATARAMANAN, 2007).	33
Figura 1.5 – (a) Topologia proposta por (FLANNERY; VENKATARAMANAN, 2008). (b) Topologia proposta por (LIAO et al., 2011) e (YAO et al., 2013).	33
Figura 2.1 – Topologia Proposta	36
Figura 2.2 – Filtro.	41
Figura 2.3 – Diagrama de Bode.	42
Figura 2.4 – Modelo de duas massas da turbina eólica.	43
Figura 3.1 – Diagrama de blocos geral.	45
Figura 3.2 – Diagrama de blocos PLL	47
Figura 3.3 – Diagrama de blocos Controle Conversores S e P	48
Figura 3.4 – Diagrama de blocos Controle Conversor R	49
Figura 4.1 – Resultados de Simulação sem Afundamento de Tensão (a) Correntes i_{g1} , i_{g2} e i_{g3} (b) Correntes i_{r1} , i_{r2} e i_{r3} (c) Correntes i_{s1} , i_{s2} e i_{s3} (d) Correntes i_{p1} , i_{p2} e i_{p3} . Topologias sem (lado esquerdo) e com o transformador (lado direito).	55
Figura 4.2 – Resultados de simulação sem afundamento de tensão. Corrente de circulação na topologia sem o capacitor.	56
Figura 4.3 – Resultados de simulação sem afundamento de tensão. (a) Tensões da rede (b) Tensões no terminal do estator. Topologia sem o transformador (lado esquerdo) e topologia com o transformador (lado direito).	56
Figura 4.4 – Resultados de simulação sem afundamento de tensão. (a) Tensão no barramento CC (b) Potências ativa e reativa (c) Velocidade do rotor. Lado esquerdo topologia sem transformador e lado direito topologia com transformador.	57
Figura 4.5 – Resultados de simulação sem afundamento de tensão. (a) Correntes dq do rotor (b) Conjugado. Lado esquerdo topologia sem transformador e lado direito topologia com transformador.	58

Figura 4.6 – Resultados de Simulação com afundamento de tensão. (a) Correntes i_{g1} , i_{g2} e i_{g3} (b) Correntes i_{r1} , i_{r2} e i_{r3} (c) Correntes i_{s1} , i_{s2} e i_{s3} (d) Correntes i_{p1} , i_{p2} e i_{p3} . Topologias sem (lado esquerdo) e com o transformador (lado direito).	60
Figura 4.7 – Resultados de simulação com afundamento de tensão. Corrente de circulação na topologia sem transformador.	61
Figura 4.8 – Resultados de simulação com afundamento de tensão. (a) Tensões da rede (b) Tensões no terminal do estator. Topologia sem o transformador (lado esquerdo) e topologia com o transformador (lado direito).	61
Figura 4.9 – Resultados de simulação com afundamento de tensão. (a) Tensão no barramento CC (b) Potências ativa e reativa (c) Velocidade do rotor. Topologia sem o transformador (lado esquerdo) e topologia com o transformador (lado direito).	62
Figura 4.10–Resultados de simulação sem afundamento de tensão. (a) Correntes dq do rotor (b) Conjugado. Lado esquerdo topologia sem transformador e lado direito topologia com transformador.	63

Lista de tabelas

Tabela 4.1 – Parâmetros do DFIG.	53
Tabela 4.2 – Parâmetros da Turbina Eólica.	53
Tabela 4.3 – Parâmetros de Simulação do Caso 1.	54
Tabela 4.4 – Parâmetros de Simulação do Caso 2.	58

Lista de abreviaturas e siglas

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
<i>DFIG</i>	<i>Doubly Fed Induction Generator</i>
<i>DPC</i>	<i>Direct Power Control</i>
<i>DVR</i>	<i>Dynamic Voltage Restorer</i>
<i>LVRT</i>	<i>Low Tension Ride-Through</i>
<i>PLL</i>	<i>Phase Locked Loop</i>
<i>PMIG</i>	<i>Permanent Magnet Induction Generator</i>
<i>PWM</i>	<i>Power Width Modulation</i>
RCS	Retificador Controlado de Silício
RDT	Restaurador Dinâmico de Tensão
<i>SCIG</i>	<i>Squirrel Cage Induction Generator</i>
<i>SCR</i>	<i>Silicon Controlled Rectifier</i>
<i>VOC-RRF</i>	<i>Voltage Oriented Control in the Rotor Reference Frame</i>

Lista de símbolos

x_{s123}^s	Matriz de variáveis do estator no referencial 123
x_{sodq}^g	Matriz de variáveis do estator no referencial odq
x_{r123}^r	Matriz de variáveis do rotor no referencial 123
x_{rodq}^g	Matriz de variáveis do rotor no referencial odq
P_s	Matriz de transferência do estator
P_r	Matriz de transferência do rotor
θ_r	Ângulo entre o eixo do rotor e o eixo do estator
δ_g	Ângulo do eixo d em relação ao eixo do estator
v_r	Tensão rotórica
v_s	Tensão estatórica
i_r	Corrente rotórica
i_s	Corrente estatórica
λ_r	Fluxo rotórico
λ_s	Fluxo estatórico
r_r	Resistência ohmica rotórica
r_s	Resistência ohmica estatórica
l_r	Indutância cíclica rotórica
l_s	Indutância cíclica estatórica
l_m	Indutância cíclica mútua
ω_g	Frequência de rotação do referencial genérico "g"
ω_r	Frequência de rotação do rotor "r"
c_e	Conjugado eletromecânico
c_m	Conjugado mecânico

J	Momento de inércia
F	Coeficiente de atrito
P	Número de pares de polo
$e_{g1,g2,g3}$	Tensões da rede elétrica
$v_{S1,S2,S3}$	Tensões do conversor S
$v_{p1,p2,p3}$	Tensões do conversor P
$v_{r1,r2,r3}$	Tensões do conversor R
v_c	Tensão no barramento CC
$v_{S10,S20,S30}$	Tensões de polo do conversor S
$v_{p10,p20,p30}$	Tensões de polo do conversor P
$v_{r10,r20,r30}$	Tensões de polo do conversor R
v_{n0}	Tensão entre o ponto central do gerador e o ponto central do barramento CC
v_{g0}	Tensão entre o ponto central da rede e o ponto central do barramento CC
r_{g1} e r_{g2}	Resistências dos indutores L_{g1} e L_{g2}
l_{g1} e l_{g2}	Indutâncias dos indutores L_{g1} e L_{g2}
v_o	Tensão de circulação
i_o	Corrente de circulação
$i_{S1,S2,S3}$	Correntes do conversor S
$i_{p1,p2,p3}$	Correntes do conversor P
i_{1o}	Corrente de circulação do conversor S
i_{2o}	Corrente de circulação do conversor P
P_{mec}	Potência mecânica
P_{ele}	Potência elétrica
ρ	Densidade do ar
r	Raio do rotor da turbina

v	Velocidade do vento
C_p	Coefficiente de potência da turbina
λ	Velocidade de ponta da pá
ω_T	Velocidade angular da turbina
ω_{te}	Velocidade no eixo do rotor eólico
ω_{bv}	Velocidade no eixo de baixa velocidade
T_{te}	Torque aerodinâmico
F_{te}	Atrito do rotor eólico
T_{av}	Torque no eixo de alta velocidade
T_{bv}	Torque no eixo de baixa velocidade
θ_{te}	Deslocamento angular do eixo do rotor
θ_{bv}	Deslocamento angular no eixo de baixa velocidade
$r_{n1,n2}$	Raios das engrenagens conectadas ao eixo de baixa velocidade e ao eixo do gerador
k_i e k_p	Ganhos dos controladores

Sumário

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	Motivação	27
1.2	Objetivos	29
1.3	Revisão Bibliográfica	29
1.4	Organização do trabalho	34
1.5	Produções Relacionadas	34
2	MODELO DO SISTEMA	35
2.1	Topologia Proposta	35
2.2	Modelo da Máquina	37
2.3	Modelo dos Conversores S e P	39
2.4	Modelo do Conversor R	41
2.5	Modelo do Filtro	41
2.6	Modelo da Turbina Eólica	42
2.7	Conclusão	44
3	ESTRATÉGIAS	45
3.1	Estratégia de Controle	45
3.1.1	Controlador PI	45
3.1.2	Controlador PI Modificado	46
3.1.3	<i>Phase Locked Loop</i> (PLL)	47
3.1.4	Controle dos Conversores S e P	47
3.1.5	Controle do Conversor R	48
3.2	Estratégia PWM	49
3.2.1	Estratégia PWM dos Conversores S e P	49
3.2.2	Estratégia PWM do Conversor R	51
3.3	Conclusão	51
4	RESULTADOS E ANÁLISES	53
4.1	Caso 1: Sem Afundamento de Tensão	53
4.2	Caso 2: Com Afundamento de Tensão	57
4.3	Conclusão	61
5	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	65
	REFERÊNCIAS	67

1 Introdução

Este capítulo é dividido em cinco partes. Inicialmente é apresentada a motivação para o desenvolvimento deste trabalho, em seguida são mostrados os objetivos do mesmo. A terceira parte apresenta uma revisão bibliográfica sobre sistemas de conversão de energia eólica disponíveis na literatura e, é feita também, uma descrição da organização do trabalho. Por fim, são apresentadas produções relacionadas a este trabalho.

1.1 Motivação

A demanda por energia elétrica tem crescido exponencialmente, fazendo com que a questão energética venha tendo cada vez mais destaque na atualidade. Devido a essa crescente demanda, a escassez dos recursos naturais e a preocupação com o meio ambiente, as fontes de energia renováveis vêm aumentando sua participação na matriz energética mundial e várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas. A energia cinética contida nos ventos vem se destacando como uma fonte energética limpa e promissora.

Para converter a energia mecânica gerada pelas turbinas em energia elétrica o sistema de geração de energia eólica necessita de geradores, que podem ser classificados de acordo com sua forma de operação, sendo assim, têm-se os geradores com operação de velocidade fixa e os com operação de velocidade variável, como foi explanado por Oliveira e Santos (2008), corroborando com Martins, Guarnieri e Pereira (2008), onde o foi complementado com Jamal, Surtipito e Syahputra (2016). A potência que é gerada pelos geradores de velocidade variável é maior que a gerada pelo gerador de velocidade fixa. Esses geradores também melhoram o comportamento dinâmico da turbina reduzindo seu ruído a baixas velocidades de vento, segundo Morren e Haan (2005). Dentro dos geradores com velocidade variável os três principais são: i) gerador de indução de rotor gaiola de esquilo (*SCIG – Squirrel Cage Induction Generator*), ii) gerador síncrono a ímã permanente (*PMSG – Permanent Magnet Synchronous Generator*) e, por fim, iii) gerador de indução com dupla alimentação (*DFIG – Doubly Fed Induction Generator*).

De acordo com Datta e Ranganathan (2002), o DFIG vem sendo bastante usado nos últimos anos no sistema de geração eólica devido as muitas vantagens que o mesmo oferece, tais como o controle de velocidade variável, o fator de potência controlável e a redução do preço do conversor. Basicamente o DFIG é um gerador de indução de rotor bobinado com anéis coletores, seu estator é conectado diretamente na rede elétrica e o rotor é interconectado através de um conversor CA-CC-CA, que só precisa lidar com cerca de 25-30% da potência total do DFIG para realizar o controle do gerador. Ibrahim et al. (2011) explanou que o conversor CA-CC-CA é composto por um conversor no lado do

rotor, um conversor no lado da rede conectados através de um banco de capacitores.

Porém, como o DFIG é conectado diretamente na rede elétrica, o mesmo irá apresentar problemas quando houver desequilíbrio nas tensões de alimentação. Quando ocorre um afundamento de tensão, o fluxo do estator do DFIG não consegue acompanhar a mudança súbita na tensão do estator, gerando um componente CC no fluxo do estator. As correntes do estator aumentam e conseqüentemente as do rotor também aumentam. Tais problemas podem ocasionar o aquecimento desigual dos enrolamentos do rotor e estator, o aumento da tensão mecânica no eixo do rotor e a comprometer a estabilidade da rede elétrica, cuja explanação de Morren e Haan (2005) complementado com Mwaniki, Lin e Dai (2017), Flannery e Venkataramanan (2009), Jedtberg et al. (2017) e Ibrahim et al. (2011). Conseqüentemente, o DFIG poderia precisar ser desconectado para proteger as máquinas, porém, devido ao grande número de sistemas de energia eólica que hoje são conectados à rede, seu impacto não pode ser negligenciado e em vez de desconectados, os geradores eólicos devem suportar o sistema elétrico durante momentos de instabilidade na rede elétrica. Uma solução para esses problemas é acrescentar um conversor em série no lado da rede elétrica, com isso, consegue-se eliminar o impacto do desequilíbrio e de afundamentos na tensão da rede.

Este trabalho propõe um sistema de geração eólica baseado em um gerador de indução de rotor bobinado (DFIG) com conversor série no lado da rede elétrica sem transformador. A topologia proposta é composta pelo DFIG, três conversores, um banco de capacitores e filtros indutivos e capacitivos. O DFIG apresenta os enrolamentos do rotor alimentados por um conversor CA-CC-CA de seis braços (Conversor P e R), e os enrolamentos do estator são ligados diretamente à rede elétrica trifásica e conectados a um conversor série (Conversor S). Este Conversor S tem por finalidade fornecer uma tensão trifásica senoidal e equilibrada aos terminais do gerador mesmo se a tensão de alimentação apresentar um afundamento.

Normalmente o conversor em série é conectado à rede elétrica através de um transformador, porém na topologia proposta, o conversor em série é conectado diretamente à rede sem o uso do transformador. Como nessa topologia não será utilizado o transformador, irá existir uma corrente de circulação entre os conversores P e S, o que será corrigido através do sistema de controle. Através do conversor R é possível realizar o controle de velocidade e potência reativa do DFIG. Desse modo, a topologia proposta busca fornecer tensões trifásicas equilibradas nos terminais do gerador, eliminar a corrente de circulação e realizar o controle do barramento CC, bem como o controle de velocidade e potência reativa do DFIG.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de conversão de energia eólica baseado em um gerador de indução de rotor bobinado que solucione os problemas causados por tensões desequilibradas e afundamentos de tensão presentes no sistema elétrico. A inclusão de um conversor série nesta topologia tem por objetivo garantir que as tensões no terminal do gerador sejam trifásicas equilibradas, independente do estado da tensão na rede e sem fazer o uso de transformador. Tendo assim como objetivos específicos fazer uma revisão bibliográfica do tema buscando melhor entendimento do problema e análise das soluções apresentadas, como também elaborar os modelos dinâmicos e em regime permanente da configuração proposta utilizando a rede elétrica trifásica equilibrada e considerando a corrente de circulação entre os conversores, e por fim, desenvolver as estratégias de controle de PWM e assim realizar o controle da potência reativa, da velocidade, da tensão do barramento CC e da corrente de circulação sempre garantindo que as tensões no terminal do gerador sejam trifásicas equilibradas. Serão coletados resultados da topologia proposta via simulação computacional, para que assim seja possível realizar uma comparação com a topologia convencional.

1.3 Revisão Bibliográfica

Diversos trabalhos têm investigado e proposto soluções para reduzir o impacto de problemas na rede elétrica no gerador. Algumas soluções são: introduzir uma *crowbar* no lado do rotor do DFIG, como proposto por Xie, Fox e Flynn (2004), Holdsworth et al. (2003), Morren e Haan (2005), Seman et al. (2006) e Seman, Niiranen e Arkkio (2006); utilizar um restaurador dinâmico de tensão (RDT ou *Dynamic Voltage Restorer (DVR)*), como apresentado em Ibrahim et al. (2011); elaborar estratégias de controle modificadas, como proposto por Hu e He (2009), Luna et al. (2009), Xu, Hu e He (2012), Zarei e Asaei (2013), Oliveira et al. (2015) e Mendes et al. (2015) ou inserir conversores adicionais no lado da rede, como explicam Flannery e Venkataramanan (2007), Flannery e Venkataramanan (2008), Liao et al. (2011) e Yao et al. (2013).

A *crowbar* é instalada entre o rotor do DFIG e o inversor do lado do rotor, e tem como função limitar a corrente no rotor e fornecer uma derivação para a mesma, ou seja, quando a corrente do rotor excede um valor limiar, o conversor é bloqueado e a corrente passa por um caminho alternativo. Em Xie, Fox e Flynn (2004), esse caminho alternativo é uma impedância adicional. A topologia proposta por Morren e Haan (2005) é apresentada na Fig. 1.1(a) onde a derivação para a corrente é realizada através de um conjunto de resistores que estão conectados aos enrolamentos do rotor. Já na topologia proposta por Seman et al. (2006), mostrada na Fig. 1.1(b), é utilizada uma *crowbar* passiva, e seu circuito consiste em uma ponte de diodo trifásico que retifica as correntes do rotor e um

tiristor em série com um resistor R. Por fim, a Fig. 1.1(c) apresenta a topologia utilizada por Seman, Niiranen e Arkkio (2006) em que é empregada uma *crowbar* ativa controlável.

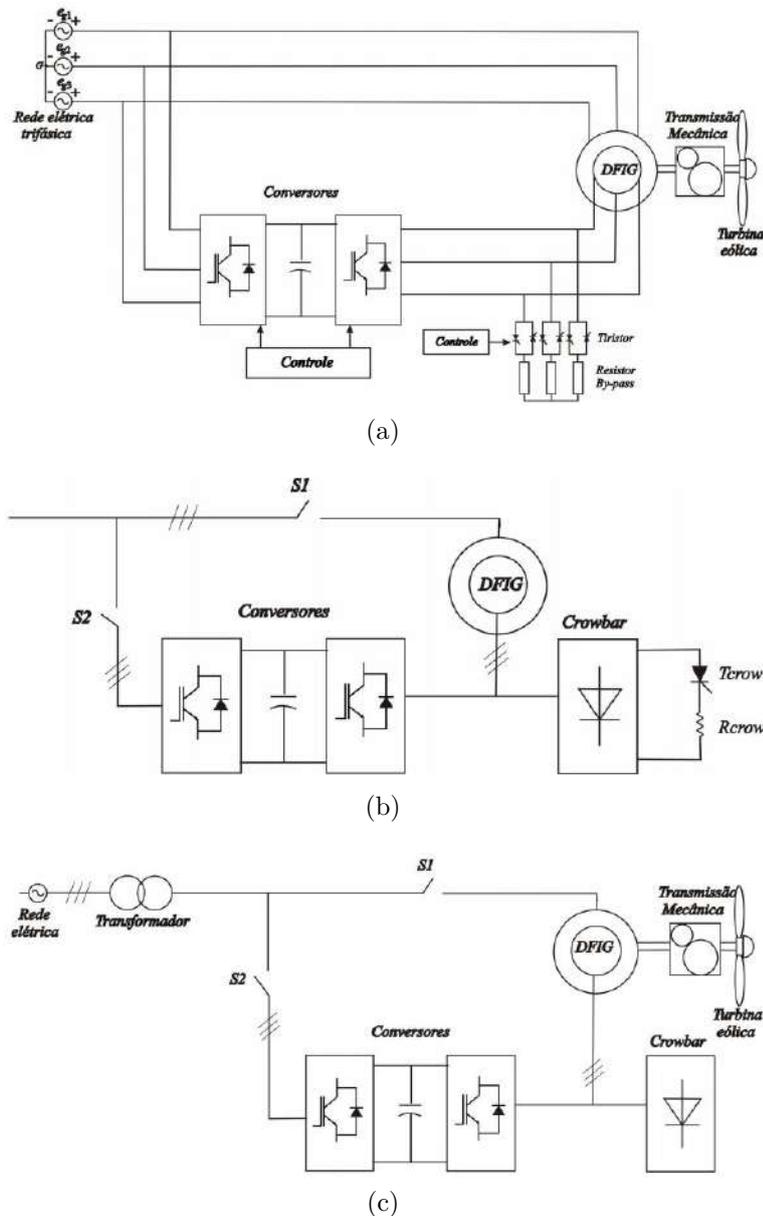


Figura 1.1 – (a) Topologia proposta por (MORREN; HAAN, 2005). (b) Topologia proposta por (SEMAN et al., 2006). (c) Topologia proposta por (SEMAN; NIIRANEN; ARKKIO, 2006).

Ibrahim et al. (2011) propõe conectar um DVR em série entre a rede e o DFIG, como mostrado na Fig. 1.2, em que a tensão de saída do DVR será adicionada à tensão da rede para manter uma tensão constante no estator.

Porém, soluções como a instalação de um *crowbar* no circuito do rotor ou a utilização de um DVR não tem um bom desempenho durante um grande afundamento de tensão, podendo causar grandes picos nas correntes do gerador e no torque, como foi explanado por Flannery e Venkataramanan (2007). Além disso, soluções com comutação do Retificador

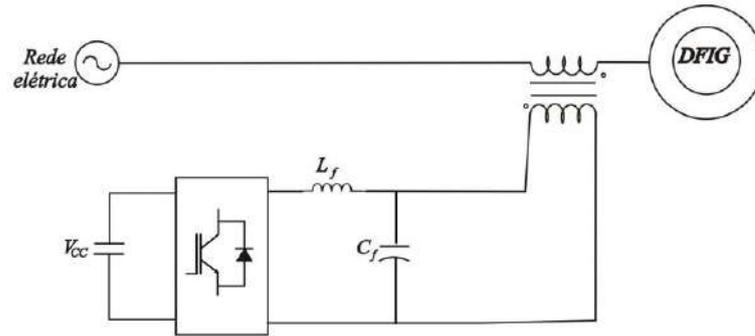


Figura 1.2 – Topologia proposta por (IBRAHIM et al., 2011).

Controlado de Silício (RCS) ou *Silicon Controlled Rectifier (SCR)* são incapazes de suportar afundamentos de tensão nulos (FLANNERY; VENKATARAMANAN, 2007). Yao et al. (2013) argumentou que outra desvantagem do DVR é que seu sistema requer circuitos de proteção com interruptores *by-pass* para evitar sobrecarga nos conversores, fazendo com que aumente o custo e o uso do mesmo se torna pouco atrativo economicamente.

Foram propostas várias soluções utilizando estratégias de controle para solucionar o problema causado durante afundamentos e desequilíbrio da rede. A topologia proposta por Hu e He (2009) é mostrada na Fig. 1.3(a), neste trabalho foi realizado o controle da corrente do rotor utilizando um controlador PI Ressonante sintonizado ao dobro da frequência da rede. O controle proposto por Luna et al. (2009) leva o nome de Controle Orientado ao Referencial da Tensão no Referencial do Rotor, do inglês *Voltage Oriented Control in the Rotor Reference Frame (VOC-RRF)*, em que tem por finalidade controlar o gerador sem introduzir ondulação de torque, sua topologia proposta é mostrada na Fig. 1.3(b). Xu, Hu e He (2012), Zarei e Asaei (2013), Oliveira et al. (2015) e Mendes et al. (2015) utilizam topologia similar a topologia apresentada na Fig. 1.3(b), o que muda são as estratégias de controle. Em Xu, Hu e He (2012) é proposto um sistema de controle que visa reduzir as oscilações na potência ativa, equilibrar o balanceamento nos enrolamentos do rotor sem perdas de correntes harmônicas, eliminar as correntes harmônicas do estator de sequência negativa e eliminar as ondulações no torque eletromagnético. Para isso os autores utiliza um controlador PI convencional com um compensador ressonante de dupla frequência. Zarei e Asaei (2013) utiliza uma estratégia de controle de torque direta preditiva. A estratégia de controle proposta por Oliveira et al. (2015) é aplicada no conversor do lado do rotor, utilizando controladores síncronos ressonantes para regular os componentes positivos e negativos das correntes do rotor. Por fim, Mendes et al. (2015) propõe uma estratégia de saturação para melhorar o desempenho do sistema.

Apesar de obter respostas satisfatórias aos afundamentos de tensões, o uso de estratégias de controle modificadas resulta em uma solução comprometida entre a redução oscilações de dupla frequência no torque eletromagnético e obtenção de correntes balanceadas do estator e rotor (FLANNERY; VENKATARAMANAN, 2007; FLANNERY;

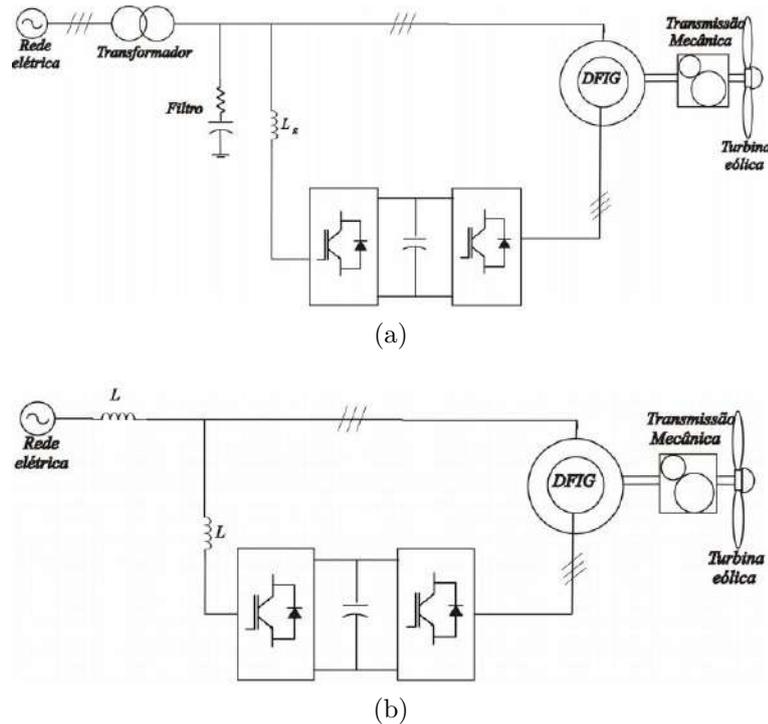


Figura 1.3 – (a) Topologia proposta por (HU; HE, 2009). (b) Topologia proposta por (LUNA et al., 2009).

VENKATARAMANAN, 2008; LIAO et al., 2011; YAO et al., 2013). Geralmente, estratégias de controle escolhem suprimir as oscilações no torque eletromagnético em detrimento do equilíbrio das correntes do estator, como sugeriu Liao et al. (2011). Assim, o aquecimento desigual dos enrolamentos do estator causados por esse desequilíbrio nas correntes do estator irão degradar o isolamento das bobinas do estator, reduzindo sua vida útil (HU; HE, 2009; LUNA et al., 2009; XU; HU; HE, 2012; ZAREI; ASAEI, 2013; OLIVEIRA et al., 2015; MENDES et al., 2015).

Outra solução que vêm sendo proposta é conectar um conversor adicional em série no lado da rede. Duas topologias são propostas por Flannery e Venkataramanan (2007), como mostrado na Fig. 1.4(a) e (b), na primeira o conversor em série é conectado diretamente no DFIG, e na segunda o conversor em série é conectado através de um transformador de injeção. Outra topologia proposta por esses autores, Flannery e Venkataramanan (2008), é apresentada na Fig. 1.5(a), em que o conversor convencional conectado no lado da rede e ao barramento CC é substituído por um retificador de diodo. Por fim, Liao et al. (2011) e Yao et al. (2013) propõem a topologia apresentada na Fig. 1.5(b) em que o conversor em série também é conectado através de um transformador de injeção.

Observa-se que ao utilizar um conversor adicional em série no lado da rede é possível eliminar os desequilíbrios na tensão da rede, reduzindo assim a oscilação com a frequência dupla da rede no torque eletromagnético, na potência ativa e reativa e também é possível obter correntes equilibradas no estator. Isso melhoraria ainda mais a capacidade de superar

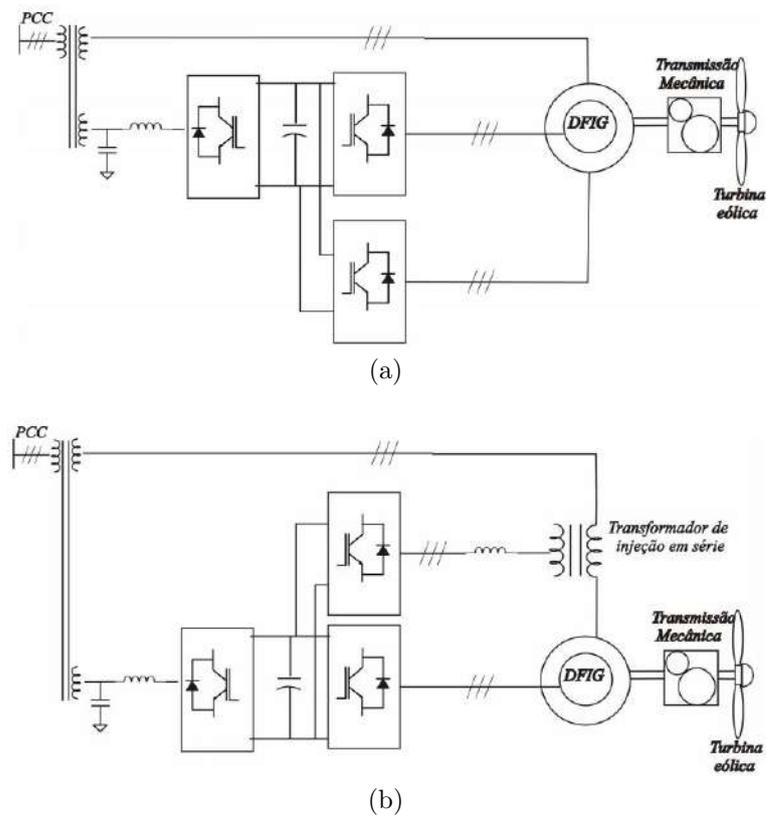


Figura 1.4 – Topologias propostas por (FLANNERY; VENKATARAMANAN, 2007).

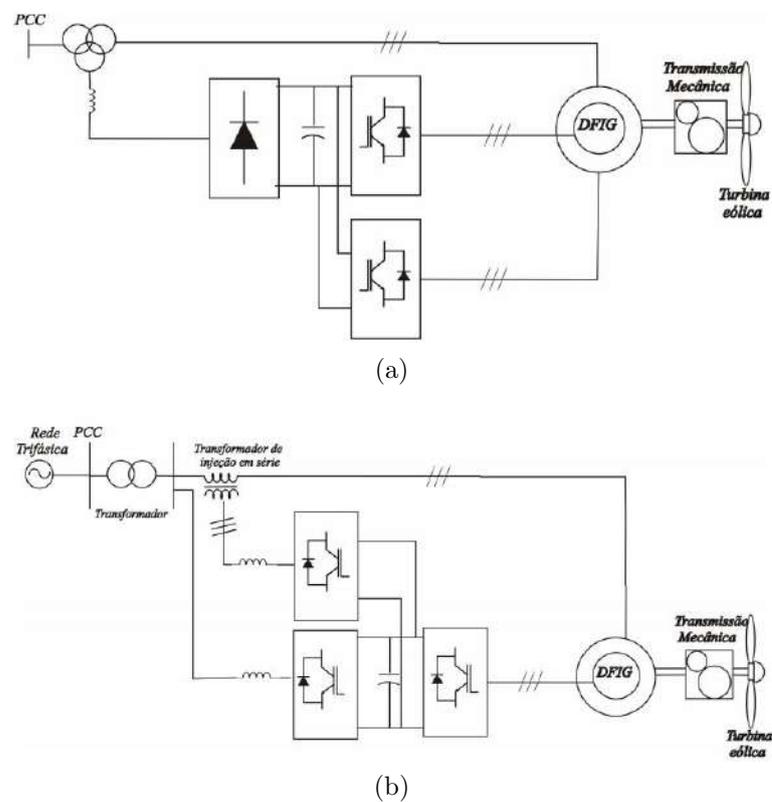


Figura 1.5 – (a) Topologia proposta por (FLANNERY; VENKATARAMANAN, 2008). (b) Topologia proposta por (LIAO et al., 2011) e (YAO et al., 2013).

as baixas tensões, conhecido na literatura como *Low Tension Ride-Through (LVRT)*, do sistema de geração eólica utilizando o DFIG. Além disso, controles convencionais, como controle vetorial ou controle direto de potência, conhecido como *Direct Power Control (DPC)* podem ser utilizados no conversor em série, como foi explanado pelos autores Flannery e Venkataramanan (2007), Flannery e Venkataramanan (2008), Liao et al. (2011) e Yao et al. (2013).

A configuração com retificador de diodo contém um número reduzido de interruptores e mantém o conversor conectado ao lado da rede para estabilizar o fluxo do estator e garantir excelente capacidade de *Low Tension Ride-Through (LVRT)*. No entanto, o uso desse conversor só é viável na operação com velocidade subsíncrona, na qual o fator de potência da unidade do gerador é sacrificado para permitir a regulação do fluxo do estator. Enquanto estiver em operação com velocidade subsíncrona, o conversor em série está desativado e o retificador de diodo assume a regulação da tensão do barramento CC, anteriormente citado por Flannery e Venkataramanan (2008). As demais topologias com o conversor em série apesar de apresentar bom desempenho, têm a necessidade do uso de um ou dois transformador, o que eleva o custo do sistema.

1.4 Organização do trabalho

Este trabalho foi organizado em cinco capítulos. No primeiro capítulo é apresentada uma introdução sobre este trabalho, como também as motivações, objetivos, revisão bibliográfica e produções relacionadas. No capítulo dois é apresentada a topologia proposta e o modelamento matemática de cada um dos componentes desta topologia. No terceiro capítulo é mostrado o desenvolvimento das estratégias PWM e de controle dos conversores R, S e P. No capítulo quatro, são apresentados os resultados obtidos e a análise dos mesmos. Por fim, no capítulo cinco, são trazidas as conclusões do trabalho.

1.5 Produções Relacionadas

Como fruto do desenvolvimento deste trabalho foi produzido o seguinte artigo:

Wind Energy Conversion System based on DFIG with Series Grid Side Converter without Transformer. Publicado em *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* em Cincinnati, OH, USA, em outubro de 2017.

2 Modelo do Sistema

Este capítulo é dividido em cinco partes. Inicialmente é apresentada a topologia proposta. As demais seções têm como objetivo apresentar o desenvolvimento dos modelos dos componentes do sistema estudado, tais como o modelo da máquina, o modelo dos conversores Série (S) e Paralelo (P), o modelo do conversor no lado do rotor (R), o modelo do filtro, e por fim o modelo da turbina eólica.

2.1 Topologia Proposta

A topologia proposta é apresentada na Figura 2.1, que é composta pelo Gerador de Indução de rotor Bobinada, mais conhecido como *Doubly-Fed Induction Generator* (DFIG), três conversores, um barramento CC composto por um banco de capacitores e filtros indutivos e capacitivos. O DFIG apresenta os enrolamentos do rotor alimentados por um conversor CA-CC-CA (Conversores P e R), e os enrolamentos do estator são ligados diretamente à rede elétrica trifásica e conectados a um conversor série (Conversor S). O Conversor S tem por finalidade fornecer uma tensão trifásica senoidal e equilibrada aos terminais do gerador mesmo se a tensão de alimentação estiver sofrido um afundamento de tensão. Como nessa topologia não será utilizado o transformador, irá existir uma corrente de circulação entre os conversores P e S, o que será corrigido através do sistema de controle. Por meio do conversor R é possível realizar o controle da velocidade do rotor e potência reativa do DFIG. O controle do barramento CC é realizado pelo conversor P (AHMED, 2000) (MOHAN N.; UNDELAND, 2002) (ROCHA, 2008).

Para realizar o estudo do sistema proposto é importante ter em mente a transformação odq . As equações são aplicadas para mudar as grandezas do modelo 123 para o modelo odq , cuja representações são relacionadas conforme ilustrado nas equações (2.1) e (2.2).

$$x_{s123}^s = P_s x_{sodq}^g \quad (2.1)$$

$$x_{r123}^r = P_r x_{rodq}^g \quad (2.2)$$

onde:

x_{s123} e x_{sodq} são as matrizes de variáveis do estator no referencial 123 e odq , respectivamente;

x_{r123} e x_{rodq} são as matrizes de variáveis do rotor no referencial 123 e odq , respectivamente;

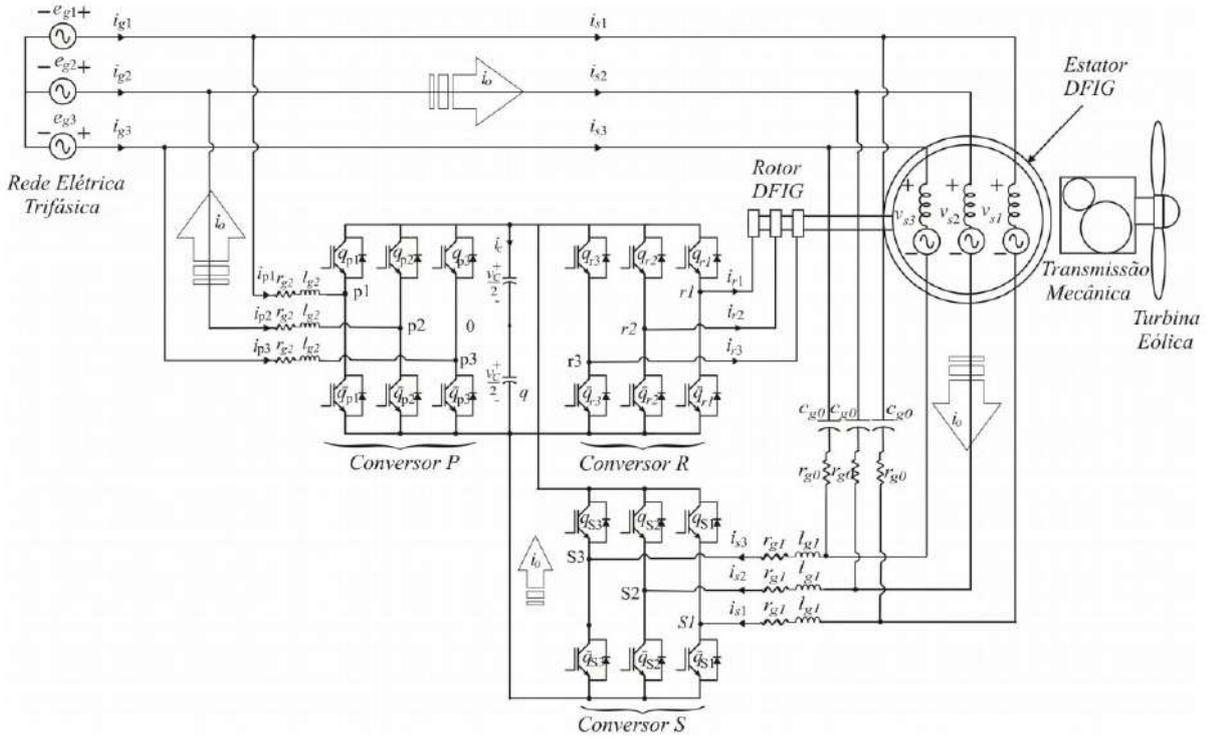


Figura 2.1 – Topologia Proposta

P_s e P_r são as matrizes de transformação do estator e do rotor, respectivamente;

O expoente g indica o referencial genérico.

As matrizes de transformação do estator e do rotor são definidas por:

$$P_s = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\delta_g) & -\text{sen}(\delta_g) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\delta_g - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\delta_g - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\delta_g - \frac{4\pi}{3}) & -\text{sen}(\delta_g - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$P_r = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\delta_g - \theta_r) & -\text{sen}(\delta_g - \theta_r) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\delta_g - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\delta_g - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\delta_g - \theta_r - \frac{4\pi}{3}) & -\text{sen}(\delta_g - \theta_r - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

onde:

θ_r é o ângulo entre o eixo do rotor e o eixo do estator;

δ_g é o ângulo do eixo d em relação ao eixo do estator.

Para alterar as grandezas do modelo 123 para o odq , aplica-se uma transformação de variáveis definida pelas equações (2.1) e (2.2), sendo a equação (2.1) para o estator e a equação (2.2) para o rotor. Nesse trabalho, as grandezas odq do estator e do rotor

são definidas nos referenciais do estator e do rotor, respectivamente (JACOBINA, 2005). Desta maneira, para a matriz de transformação P_s é feito $\delta_g = 0$ e para a matriz P_r do rotor é feito $\delta_g - \theta_r = 0$.

2.2 Modelo da Máquina

A máquina de indução pode ser representada por um modelo vetorial em um referencial genérico, indicado pelo expoente "g", como mostrado nas equações (2.5) a (2.10):

$$v_r^g = r_r i_r^g + \frac{d\lambda_r^g}{dt} + j(\omega_g - \omega_r)\lambda_r^g \quad (2.5)$$

$$v_s^g = r_s i_s^g + \frac{d\lambda_s^g}{dt} + j\omega_g \lambda_s^g \quad (2.6)$$

$$\lambda_s^g = l_s i_s^g + l_m i_r^g \quad (2.7)$$

$$\lambda_r^g = l_r i_r^g + l_m i_s^g \quad (2.8)$$

$$c_e = 2l_m \text{Im}(i_s^g i_r^{g*}) = -2l_m \text{Im}(i_s^{g*} i_r^g) \quad (2.9)$$

$$P(c_e - c_m) = J \frac{d\omega_r}{dt} + F\omega_r. \quad (2.10)$$

onde:

v_r e v_s são os vetores das tensões rotórica e estatórica, respectivamente;

i_r e i_s são os vetores das correntes rotórica e estatórica, respectivamente;

λ_r e λ_s são os vetores dos fluxos rotórico e estatórico, respectivamente;

r_r e r_s são as resistências ohmicas rotórica e estatórica, respectivamente;

l_r e l_s são as indutâncias cíclicas rotórica e estatórica, respectivamente;

l_m é indutância cíclica mútua;

ω_g é a frequência de rotação do referencial genérico "g";

ω_r é a frequência angular do rotor "r";

c_e é o conjugado eletromecânico;

c_m é o conjugado mecânico;

J é o momento de inércia;

F é o coeficiente de atrito;

P é o número de pares de polo;

$Im(x)$ é a parte imaginária de x .

Com o objetivo de realizar o controle das correntes do rotor, é necessário escrever as equações de estados das correntes rotóricas i_r^g em função das tensões do rotor. As correntes em função dos fluxos são obtidas usando as equações (2.7) e (2.10), e em seguida substituí essas correntes na equação (2.5) (JACOBINA, 2005).

$$v_r^g = \frac{r_r}{\sigma l_r} \lambda_r^g + \frac{d\lambda_r^g}{dt} + j(\omega_g - \omega_R) \lambda_r^g - \frac{l_m}{\sigma l_s \tau_r} \lambda_s^g \quad (2.11)$$

Sendo $\tau_r = \frac{l_r}{r_r}$ e $\sigma = 1 - \frac{l_m^2}{l_s l_r}$, que são a constante de tempo rotórica e o coeficiente de dispersão da máquina, respectivamente. Isolando $\frac{d\lambda_s^g}{dt}$ mostrada na equação (2.6), tem-se:

$$\frac{d\lambda_s^g}{dt} = v_s - r_s i_s - j\omega_g \lambda_s^g \quad (2.12)$$

A partir das equações (2.7) e (2.10), encontra-se o fluxo estatórico em função do fluxo rotórico e da corrente estatórica. O modelo dinâmico para o controle de corrente é então obtido através da substituição do fluxo estatórico encontrado e da equação (2.12) substituída na equação (2.11).

$$v_r^g = \left(r_r + \frac{r_s l_m^2}{l_s^2}\right) i_r + \sigma l_r \frac{di_r}{dt} + j(\omega_g - \omega_R) \sigma l_r i_r - \left(j\omega_R + \frac{1}{\tau_s}\right) \frac{l_m}{l_s} \lambda_s + \frac{l_m}{l_s} v_s \quad (2.13)$$

Para efeitos de uma abordagem *Single Input - Single Output* (SISO), o modelo pode ser reescrito como:

$$v_r^g = r_k i_r^g + l_k \frac{di_r}{dt} + e_k \quad (2.14)$$

onde $r_k = \left(r_r + \frac{r_s l_m^2}{l_s^2}\right)$, $l_k = \sigma l_r$ e $e_k = j(\omega_g - \omega_R) \sigma l_r i_r - \left(j\omega_R + \frac{1}{\tau_s}\right) \frac{l_m}{l_s} \lambda_s + \frac{l_m}{l_s} v_s$.

2.3 Modelo dos Conversores S e P

Os Conversores S e P são representados pelas seguintes equações no referencial do estator:

$$e_{g1}^s = r_{g1}i_{s1}^s + l_{g1}\frac{di_{s1}^s}{dt} + v_{s1}^s + v_{S1}^s \quad (2.15)$$

$$e_{g2}^s = r_{g1}i_{s2}^s + l_{g1}\frac{di_{s2}^s}{dt} + v_{s2}^s + v_{S2}^s \quad (2.16)$$

$$e_{g3}^s = r_{g1}i_{s3}^s + l_{g1}\frac{di_{s3}^s}{dt} + v_{s1}^s + v_{S3}^s \quad (2.17)$$

$$e_{g1}^p = r_{g2}i_{p1}^s + l_{g2}\frac{di_{p1}^s}{dt} + v_{p1}^s \quad (2.18)$$

$$e_{g2}^p = r_{g2}i_{p2}^s + l_{g2}\frac{di_{p2}^s}{dt} + v_{p2}^s \quad (2.19)$$

$$e_{g3}^p = r_{g2}i_{p3}^s + l_{g2}\frac{di_{p3}^s}{dt} + v_{p1}^s \quad (2.20)$$

$$v_{n0} = \frac{1}{6}(v_{S10}^s + v_{S20}^s + v_{S30}^s + v_{p10}^s + v_{p20}^s + v_{p30}^s) \quad (2.21)$$

$$i_{g1} = i_{s1} + i_{p1} \quad (2.22)$$

$$i_{g2} = i_{s2} + i_{p2} \quad (2.23)$$

$$i_{g3} = i_{s3} + i_{p3} \quad (2.24)$$

sendo:

$$v_{S1}^s = v_{S10}^s - v_{n0}^s \quad (2.25)$$

$$v_{S2}^s = v_{S20}^s - v_{n0}^s \quad (2.26)$$

$$v_{S3}^s = v_{S30}^s - v_{n0}^s \quad (2.27)$$

$$v_{p1}^s = v_{p10}^s - v_{n0}^s \quad (2.28)$$

$$v_{p2}^s = v_{p20}^s - v_{n0}^s \quad (2.29)$$

$$v_{p3}^s = v_{p30}^s - v_{n0}^s \quad (2.30)$$

onde:

v_{S1}^s , v_{S2}^s e v_{S3}^s são as tensões do conversor S;

v_{p1}^s , v_{p2}^s e v_{p3}^s são as tensões do conversor P;

v_{S10}^s , v_{S20}^s e v_{S30}^s são as tensões de polo do conversor S;

v_{p10}^s , v_{p20}^s e v_{p30}^s são as tensões de polo do conversor P;

v_{n0}^s é a tensão entre o ponto central da rede e o ponto central do barramento CC;

r_{g1} e r_{g2} são as resistências dos filtros;

l_{g1} e l_{g2} são as indutâncias dos filtros.

Como nesta topologia não é feito o uso do transformador, ocorre a formação de uma malha de circulação entre os conversores S e P, na qual se pode escrever as seguintes equações:

$$-r_{g2}i_{p1} - l_{g2}\frac{di_{p1}}{dt} + v_{S1} + r_{g1}i_{s1} + l_{g1}\frac{di_{s1}}{dt} + v_{p10} - v_{s10} = 0 \quad (2.31)$$

$$-r_{g2}i_{p2} - l_{g2}\frac{di_{p2}}{dt} + v_{S2} + r_{g1}i_{s2} + l_{g1}\frac{di_{s2}}{dt} + v_{p20} - v_{s20} = 0 \quad (2.32)$$

$$-r_{g2}i_{p3} - l_{g2}\frac{di_{p3}}{dt} + v_{S3} + r_{g1}i_{s3} + l_{g1}\frac{di_{s3}}{dt} + v_{p30} - v_{s30} = 0 \quad (2.33)$$

Para encontrar a tensão de circulação (v_o), soma-se as equações (2.31)-(2.33), ou seja:

$$v_o = -r_a \sum i_{pk} - l_a \frac{d}{dt} \sum i_{pk} + \sum v_{Sk} + r_s \sum i_{sk} + l_s \frac{d}{dt} \sum i_{sk} \quad (2.34)$$

sendo:

$$v_o = -v_{S10} - v_{S20} - v_{S30} + v_{p10} + v_{p20} + v_{p30} \quad (2.35)$$

A partir das correntes de entradas dos conversores, as correntes de circulação de cada conversor são definidas por:

$$i_{1o} = i_{s1} + i_{s2} + i_{s3} \quad (2.36)$$

$$i_{2o} = i_{p1} + i_{p2} + i_{p3} \quad (2.37)$$

onde:

i_{s1} , i_{s2} e i_{s3} são as correntes de entrada do conversor S;

i_{p1} , i_{p2} e i_{p3} são as corrente de entrada conversor P;

i_{1o} é a corrente de circulação do conversor S;

i_{2o} é a corrente de circulação do conversor P.

Por fim, é possível expressar a corrente de circulação entre os conversores (i_o) em função das correntes de circulação de cada conversor:

$$i_o = i_{1o} = -i_{2o} \quad (2.38)$$

Substituindo os valores encontrados na equação (2.34), tem-se:

$$r_{g2}i_o + l_{g2}\frac{di_o}{dt} + \sum v_{Sk} + r_{g1}i_o + l_{g1}\frac{di_o}{dt} = v_o \quad (2.39)$$

Sendo $r_{g1} = r_{g2} = r$ e $l_{g1} = l_{g2} = l$, o modelo dos conversores S e P pode ser descrito por:

$$2ri_o + 2l \frac{di_o}{dt} + \sum v_{Sk} = v_o \quad (2.40)$$

2.4 Modelo do Conversor R

O Conversor R é representado pelo seguinte modelo:

$$v_{r1} = v_{r10} - v_{rg0} \quad (2.41)$$

$$v_{r2} = v_{r20} - v_{rg0} \quad (2.42)$$

$$v_{r3} = v_{r30} - v_{rg0} \quad (2.43)$$

onde:

v_{r1} , v_{r2} e v_{r3} são as tensões rotóricas;

v_{r10} , v_{r20} e v_{r30} são as tensões de polo do conversor R;

v_{rg0} é a tensão entre o ponto central do gerador e o ponto central do barramento CC.

2.5 Modelo do Filtro

Devido a presença de harmônicas, o sincronismo com o DFIG não estava sendo alcançado. Para isso, foi desenvolvido um filtro RLC entre o conversor em série e os terminais do DFIG, e um filtro RL entre o conversor P e a rede elétrica. Estes filtros formam uma malha entre os conversores S e P, e seu circuito pode ser simplificado pelo circuito apresentado na Figura 2.2.

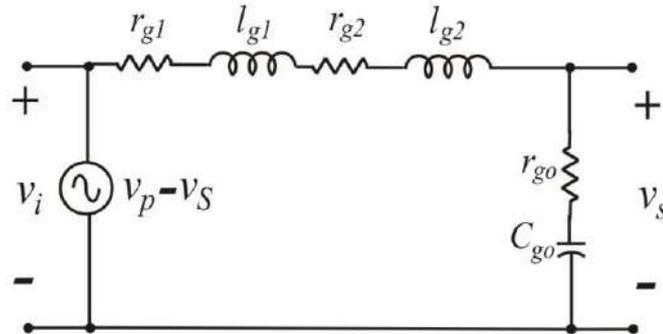


Figura 2.2 – Filtro.

Sendo $r_{g0} = R$, $r_{g1} = r_{g2} = r$ e $c_{g0} = C$, o modelo do filtro pode ser descrito por:

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{V_s(s)}{V_p(s) - V_S(s)} = \frac{R + \frac{1}{sC}}{(2r + R) + s(l_{g1} + l_{g2}) + \frac{1}{sC}} \quad (2.44)$$

O diagrama de bode do filtro utilizado é apresentado na Fig. 2.3, nela é mostrado o módulo e a fase do sinal de saída. No gráfico referente ao módulo pode-se observar a frequência de corte representada no pico da curva. Na frequência de chaveamento, em 10kHz, o ganho foi de -32,7 db, o que mostra que o filtro consegue atenuar as componentes de alta frequência presentes na tensão de saída.

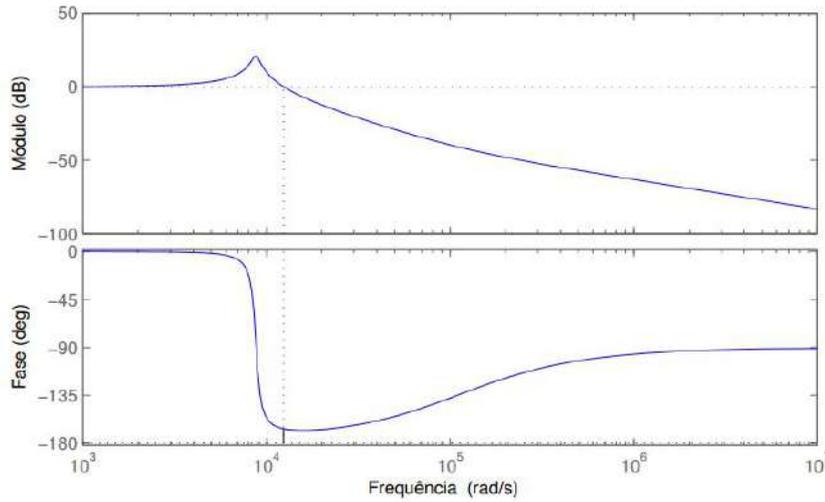


Figura 2.3 – Diagrama de Bode.

2.6 Modelo da Turbina Eólica

A potência mecânica disponível no vento e a potência elétrica podem ser expressas, de acordo com Campos (2004), como:

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3 \quad (2.45)$$

$$P_{ele} = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3 C_p \quad (2.46)$$

onde:

ρ é a densidade do ar (kg/m^3);

r é o raio do rotor da turbina (m)

v é a velocidade do vento (m/s);

C_p é o coeficiente de potência da turbina.

O coeficiente de potência representa a fração de energia que pode ser extraída do vento. Esta grandeza é relacionada com a velocidade de ponta de pá λ (ou tip-speed-ratio) e o ângulo de inclinação das pás β (RECH A.; VOLTOLINI, 2012).

A velocidade de ponta da pá pode ser expressa por:

$$\lambda = \frac{\omega_T r}{v} \quad (2.47)$$

onde:

ω_T é a velocidade angular da turbina (rad/s);

r é o raio do rotor da turbina (m);

v é a velocidade do vento (m/s^2).

A partir da velocidade aferida é possível encontrar o coeficiente de potência pela equação a seguir (ROCHA, 2008):

$$C_t(\lambda) = a_0 + a_1\lambda + a_2\lambda^2 \quad (2.48)$$

onde $a_0 = 0,0520$, $a_1 = 0,0058$ e $a_2 = -0,00075$.

O torque aerodinâmico produzido pela turbina é:

$$T_{te} = \frac{1}{2} \rho \pi r^3 v^2 \frac{C_p}{\lambda} \quad (2.49)$$

Foi adotado neste trabalho o modelo de duas massas apresentado na Fig. 2.4.

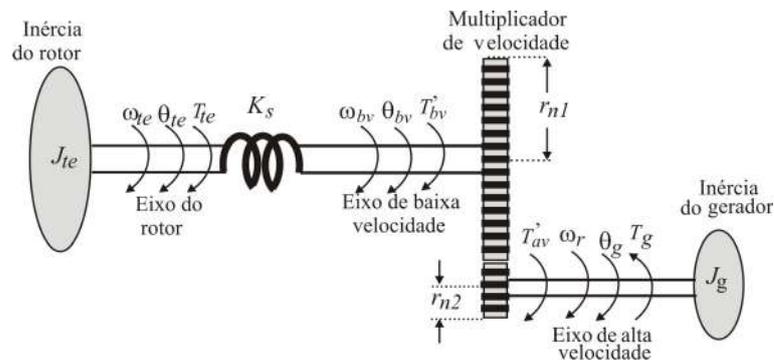


Figura 2.4 – Modelo de duas massas da turbina eólica.

A equação que representa o comportamento dinâmico da turbina eólica para este modelo, é:

$$J_{te} \frac{d\omega_{te}}{dt} = T_{te} - T_{bv} - F_{te} \omega_{te} \quad (2.50)$$

onde:

$T_{bv} = K_s(\theta_{te} - \theta_{bv})$ é o torque no eixo de baixa velocidade no referencial do rotor eólico;

θ_{te} é o deslocamento do eixo do rotor;

θ_{bv} é o deslocamento no eixo de baixa velocidade;

F_{te} é o atrito do rotor eólico;

ω_{te} é a velocidade no eixo do rotor eólico.

Foram adotadas as seguintes relações de velocidade e conjugado:

$$\frac{\omega_r}{\omega_{bv}} = \frac{r_{n1}}{r_{n2}} \quad (2.51)$$

$$\frac{T'_{av}}{T'_{bv}} = \frac{r_{n2}}{r_{n1}} \quad (2.52)$$

onde:

ω_r e ω_{bv} são as velocidades no eixo de alta e baixa velocidade, respectivamente;

r_{n1} e r_{n2} são os raios das engrenagens conectadas ao eixo de baixa velocidade e ao eixo do gerador;

T'_{av} e T'_{bv} são os conjugados aplicados ao eixo do gerador e ao eixo de baixa velocidade no referencial do gerador, respectivamente.

As equações foram desenvolvidas adotando a convenção motor. Portanto, o torque aplicado no eixo do gerador é definido como:

$$T'_{av} = -\frac{r_{n2}}{r_{n1}} T'_{bv} \quad (2.53)$$

2.7 Conclusão

Neste capítulo foram explicadas detalhadamente a topologia proposta, e apresentados os modelos matemáticos da máquina de indução, dos conversores S, R e P e da turbina eólica. Também foi mostrado o filtro desenvolvido para melhorar o funcionamento do sistema.

3 Estratégias

A divisão deste capítulo se dá em duas partes. Na primeira, é apresentada a estratégia de controle e na segunda, é apresentada a estratégia PWM ambas desenvolvidas para os conversores R, S e P.

Na Fig. 3.1 é apresentado o diagrama do funcionamento completo do sistema, que terão suas partes detalhadas ao longo deste capítulo.

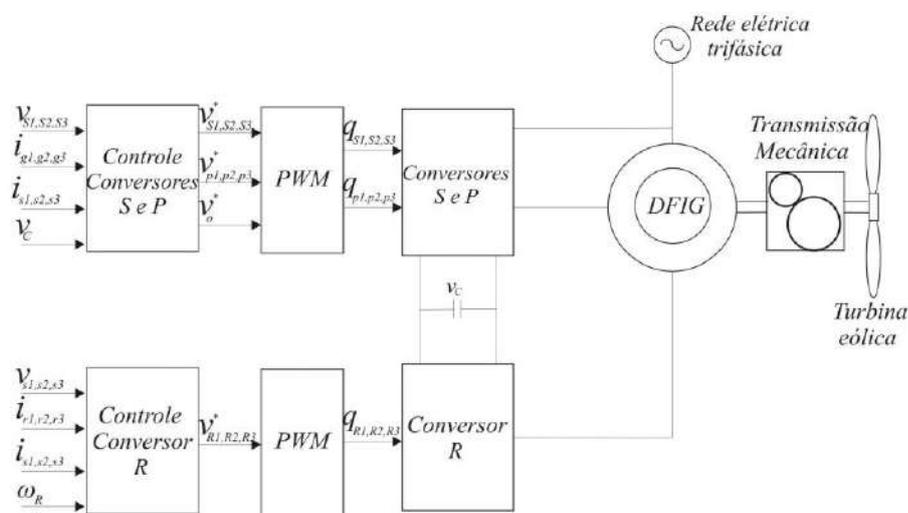


Figura 3.1 – Diagrama de blocos geral.

3.1 Estratégia de Controle

O controle do sistema, também, foi dividido em duas partes: i) controle dos conversores S e P, em que é realizado o controle da tensão do estator do DFIG, da tensão do barramento CC e da corrente de circulação; ii) controle do conversor R, em que é realizado o controle da potência reativa e da velocidade do rotor.

Para desenvolvimento das estratégias de controle foi necessário projetar o controlador PI, o controlador PI Modificado ou Ressonante e a *Phase Locked Loop* (PLL). Foi utilizado o controlador PI pois a máquina tem os parâmetros conhecidos.

3.1.1 Controlador PI

Para projeto do controlador PI convencional parte-se da equação do modelo da máquina. Colocando a equação (2.14) no domínio da frequência e desprezando a perturbação (e_k), tem-se:

$$V_r(s) = r_k I_r(s) + l_k s I_k(s) \quad (3.1)$$

$$\frac{I_k(s)}{V_r(s)} = \frac{1}{r_k + s l_k} = G(s). \quad (3.2)$$

Em seguida, é feito o equacionamento do controlador $F(s)$ baseado na metodologia apresentada em Harnfors e Nee (1998):

$$F(s) = \frac{\alpha}{s} G^{-1}(s) = \frac{\alpha}{s} (r_k + s l_k) \quad (3.3)$$

$$F(s) = \frac{\alpha}{s} r_k + \alpha l_k. \quad (3.4)$$

onde α é a largura de banda de malha fechada e $G^{-1}(s)$ a inversa de $G(s)$.

Sabendo que a equação do controlador PI é dada por:

$$F(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (3.5)$$

Comparando a equação (3.5) com a equação (3.4), pode-se observar que:

$$K_p = \alpha l_k \quad (3.6)$$

$$K_i = \alpha r_k \quad (3.7)$$

Portanto, a variável desejada (x_{desej}) após o controlador pode ser obtida por:

$$x_{desej} = K_p(\text{erro}) + K_i \int (\text{erro}) dt \quad (3.8)$$

3.1.2 Controlador PI Modificado

Uma das funções de um controlador é garantir um erro de regime permanente nulo, o controlador PI convencional só garante isto se as grandezas forem contínuas. Portanto, se tem a necessidade de utilizar o controlador PI Modificado, também conhecido como Controlador Ressonante, quando as grandezas controladas são senoidais. A versão discreta do controlador ressonante proposta por Jacobina et al. (2001), é dada por:

$$x_1(t) = \cos(\omega_e h) x_1(t-h) + \frac{1}{\omega_e} \sin(\omega_e h) x_2(t-h) + 2k_i \frac{1}{\omega_e} \sin(\omega_e h) E(t-h) \quad (3.9)$$

$$x_2(t) = -\omega_e \sin(\omega_e h) x_1(t-h) + \cos(\omega_e h) x_2(t-h) + 2k_i [\cos(\omega_e h) - 1] E(t-h) \quad (3.10)$$

$$x_{desej}(t) = x_1 + k_p E(t) \quad (3.11)$$

onde:

x_1 e x_2 são variáveis auxiliares;

x_{desej} é a variável desejada;

k_i e k_p são os ganhos dos controladores;

E é o erro;

Ω_e é a velocidade angular da máquina.

3.1.3 Phase Locked Loop (PLL)

O diagrama de blocos da PLL é apresentado na Fig. 3.2, proposto por Filho et al. (2008). Neste trabalho, a PLL tem função de detectar a posição angular θ da tensão da rede e_g . A tensão v_{sd} no referencial da tensão deve ser nula, então é feita uma comparação entre v_{sd}^a e 0. O resultado desta comparação passa por um controlador PI que resulta na variação da frequência angular estimada $\Delta\omega$, que é somada com a frequência angular da rede ω para obter a frequência angular estimada ω . Essa frequência estimada é submetida a um integrador gerando assim a posição angular estimada θ da tensão da rede e_g . Com esta posição estimada é possível colocar a tensão v_{sd} no referencial da tensão, fechando a malha da PLL.

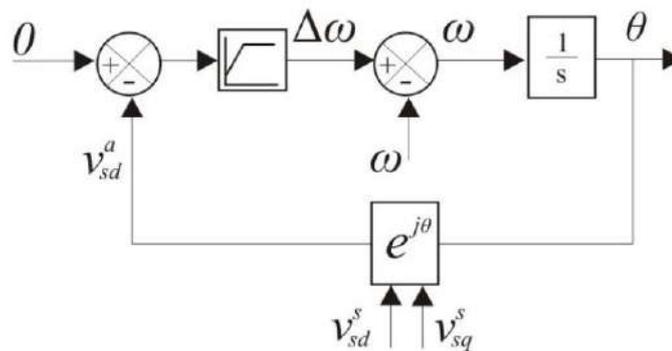


Figura 3.2 – Diagrama de blocos PLL

3.1.4 Controle dos Conversores S e P

A principal finalidade dos conversores S e P é controlar a tensão do estator do DFIG, a tensão do barramento CC e a corrente de circulação, conforme ilustrado no diagrama de blocos mostrado na Fig. 3.3

Para o controle da tensão do estator do DFIG as tensões v_{s1} e v_{s2} do estator do DFIG são ajustadas fazendo uma comparação com a tensão de referência desejada para a rede, resultado nas tensões de referência v_{s1}^* e v_{s2}^* que serão utilizadas na *Pulse Width Modulation* (PWM).

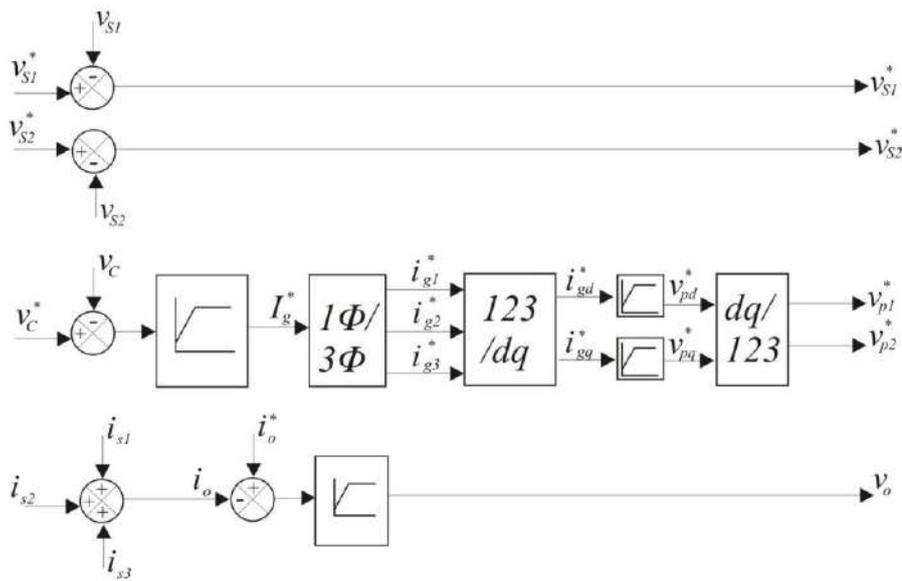


Figura 3.3 – Diagrama de blocos Controle Conversores S e P

O erro proveniente da comparação da tensão do barramento CC com sua referência é submetido ao controlador PI, o que resulta na amplitude da corrente I_g . Em seguida, com auxílio da posição estimada θ_g das tensões da rede e utilizando a amplitude calculada, são geradas as correntes trifásica de referência. Essas correntes são então convertidas para o referencial odq estacionário, onde são comparadas com as correntes obtidas diretamente do sistema. O resultado dessa comparação é submetido a um controlador PI Modificado (Controlador Ressonante), que resulta nas tensões odq de referência. Em seguida, as tensões odq de referência são convertidas para 123, sendo utilizadas como referência para a PWM.

A corrente de circulação i_o é definida pela soma das correntes i_{s1} , i_{s2} e i_{s3} . O erro entre a referência da corrente de circulação e a corrente calculada, é submetido a um controlador PI Modificado (Controlador Ressonante), resultando na tensão de circulação v_o que será utilizada na PWM.

Por fim, as tensões v_{S1}^* , v_{S2}^* , v_{p1}^* , v_{p2}^* e v_o são encaminhadas a PWM para que a mesma gere os comando necessários para realizar os respectivos controles.

3.1.5 Controle do Conversor R

O controle do Conversor R tem por finalidade regular a potência reativa e a velocidade do rotor. A Fig. 3.4 apresenta o diagrama de blocos para a estratégia de controle do conversor R. É realizado a comparação da potência reativa e da velocidade do sistema com sua referência, o resultado dessas comparações passam por dois controladores PI, resultando nas correntes de referência i_{rd}^* e i_{rq}^* . As correntes i_{rd}^* e i_{rq}^* são comparadas com as correntes i_{rd}^a e i_{rq}^a do sistema, seus erros são submetidos a um controlador PI para se obter as tensões rotóricas de referência v_{rd}^s e v_{rq}^s . Como essas tensões estão no referencial

da tensão, é utilizada uma PLL para colocar a tensão rotórica no referencial do rotor. Após isso, as tensões rotóricas são convertidas para o sistema 123, e serão as tensões utilizadas como referência para a PWM.

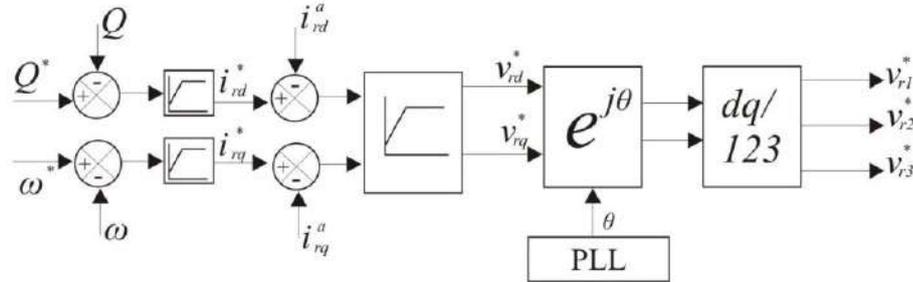


Figura 3.4 – Diagrama de blocos Controle Conversor R

3.2 Estratégia PWM

A estratégia de Modulação por Largura de Pulso, do inglês *Pulse Width Modulation* (*PWM*), foi implementada para o chaveamento dos conversores R, S e P, no qual foi utilizada a estratégia PWM do tipo escalar simétrico.

3.2.1 Estratégia PWM dos Conversores S e P

As tensões de referências são definidas pelas equações (3.12)-(3.18), onde v_{S1}^* , v_{S2}^* , v_{S3}^* , v_{p1}^* , v_{p2}^* , v_{p3}^* e v_o^* são as tensões de referências determinadas pelos controladores.

$$v_{S1}^* = v_{S10}^* - v_{n0}^* \quad (3.12)$$

$$v_{S2}^* = v_{S20}^* - v_{n0}^* \quad (3.13)$$

$$v_{S3}^* = -v_{S30}^* - v_{n0}^* \quad (3.14)$$

$$v_{p1}^* = v_{p10}^* - v_{n0}^* \quad (3.15)$$

$$v_{p2}^* = v_{p20}^* - v_{n0}^* \quad (3.16)$$

$$v_{p3}^* = v_{p30}^* - v_{n0}^* \quad (3.17)$$

$$v_o^* = -v_{S10}^* - v_{S20}^* - v_{S30}^* + v_{p10}^* + v_{p20}^* + v_{p30}^* \quad (3.18)$$

Para determinar as tensões de polo de referência são necessárias oito equações. Portanto, a solução para este problema é utilizar uma tensão auxiliar v_x , com isso, as

tensões de polo de referência passam a ser definidas por:

$$v_{S10}^* = v_{S1}^* + v_x^* \quad (3.19)$$

$$v_{S20}^* = v_{S2}^* + v_x^* \quad (3.20)$$

$$v_{S30}^* = -v_{S1}^* - v_{S2}^* - \frac{v_o^*}{2} + v_x^* \quad (3.21)$$

$$v_{p10}^* = v_{p1}^* + v_x^* \quad (3.22)$$

$$v_{p20}^* = v_{p2}^* + v_x^* \quad (3.23)$$

$$v_{p30}^* = -v_{p1}^* - v_{p2}^* - \frac{v_o^*}{2} + v_x^* \quad (3.24)$$

onde:

v_{S10}^* , v_{S20}^* e v_{S30}^* são as tensões de referência do conversor S determinada pelos controladores;

v_{p10}^* , v_{p20}^* e v_{p30}^* são as tensões de referência do conversor P determinada pelos controladores;

v_o^* é a tensão de circulação;

v_x^* é uma tensão auxiliar.

Para determinar a tensão auxiliar v_x^* , encontra-se o v_{xmax}^* e v_{xmin}^* como mostrado nas equações (3.25) e (3.26).

$$v_{xmax}^* = \frac{v_c^*}{2} - \max\{v_{S1}^*, v_{S2}^*, -v_{S1}^* - v_{S2}^* - \frac{v_o^*}{2}, v_{p1}^*, v_{p2}^*, -v_{p1}^* - v_{p2}^* - \frac{v_o^*}{2}\} \quad (3.25)$$

$$v_{xmin}^* = -\frac{v_c^*}{2} - \min\{v_{S1}^*, v_{S2}^*, -v_{S1}^* - v_{S2}^* - \frac{v_o^*}{2}, v_{p1}^*, v_{p2}^*, -v_{p1}^* - v_{p2}^* - \frac{v_o^*}{2}\} \quad (3.26)$$

Com os valores encontrados através das equações (3.25) e (3.26) e levando em consideração o fator de distribuição de roda livre (μ), com $0 \leq \mu \leq 1$, têm-se:

$$v_x^* = \mu v_{xmax}^* + (1 - \mu)v_{xmin}^* \quad (3.27)$$

Os estados das chaves dos conversores são obtidos pela comparação das tensões de polo definidas pelas equações (3.19) a (3.24) com uma onda triangular, denominada de portadora PWM.

3.2.2 Estratégia PWM do Conversor R

As tensões de polo de referência são definidas pelas equações (3.28) a (3.30), onde v_{r1}^* , v_{r2}^* e v_{r3}^* são as tensões de referências determinadas pelos controladores.

$$v_{r1}^* = v_{r10}^* - v_{g0}^* \quad (3.28)$$

$$v_{r2}^* = v_{r20}^* - v_{g0}^* \quad (3.29)$$

$$v_{r3}^* = v_{r30}^* - v_{g0}^* \quad (3.30)$$

Sabendo que o retificador fornece as tensões v_{r1}^* , v_{r2}^* e v_{r3}^* simétricas e equilibradas, apenas duas dessas equações são independentes, impedindo a solução deste sistema. Para solucionar este problema é necessário utilizar uma tensão auxiliar v_h^* , com isso, as tensões de polo de referência passam a ser definidas por:

$$v_{r10}^* = v_{r1}^* + v_h^* \quad (3.31)$$

$$v_{r20}^* = v_{r2}^* + v_h^* \quad (3.32)$$

$$v_{r30}^* = v_{r3}^* + v_h^* \quad (3.33)$$

Para determinar a tensão auxiliar v_h^* , encontra-se o v_{hmax}^* e v_{hmin}^* como mostrado nas equações (3.34) e (3.35).

$$v_{hmax}^* = \frac{E}{2} - \max\{v_{r1}^*, v_{r2}^*, v_{r3}^*\} \quad (3.34)$$

$$v_{hmin}^* = -\frac{E}{2} - \min\{v_{r1}^*, v_{r2}^*, v_{r3}^*\} \quad (3.35)$$

Com os valores encontrados através das equações (3.34) e (3.35) e levando em consideração o fator de distribuição de roda livre (μ), com $0 \leq \mu \leq 1$, têm-se:

$$v_h^* = \mu v_{hmax}^* + (1 - \mu)v_{hmin}^* \quad (3.36)$$

Os estados das chaves dos conversores são obtidos pela comparação das tensões de polo definidas pelas equações (3.31) a (3.33) com uma onda triangular, denominada de portadora PWM.

3.3 Conclusão

Neste capítulo foram apresentadas detalhadamente as estratégias desenvolvidas neste trabalho. Dentro das estratégias de controle foi apresentado o projeto do controlador PI, do controlador PI ressonante e da *PLL*, e mostrado o desenvolvimento do sistema de controle dos conversores R, S e P. Também foi apresentada a estratégia PWM desenvolvida para os três conversores.

4 Resultados e Análises

Neste capítulo serão apresentados os resultados de simulação digital realizados através do *software PSIM*[®] para as topologias apresentadas. É feita uma comparação da topologia proposta, sem o uso do transformador, com a topologia convencional proposta por Flannery e Venkataramanan (2007) e apresentada na Fig. 1.4(a), com o uso do transformador. O primeiro conjunto de resultados é realizado para o caso em que a rede elétrica está simétrica e equilibrada com a amplitude desejada, sendo ilustrado nas Figuras 4.1 a 4.5. O segundo conjunto de resultados apresenta um afundamento de tensão simétrico, esse resultado é ilustrado nas Figuras 4.6 a 4.10.

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam os parâmetros do DFIG e da turbina eólica, respectivamente.

Tabela 4.1 – Parâmetros do DFIG.

Parâmetro	Valor
Indutância do estator (l_s)	614,1 mH
Indutância do rotor (l_r)	614,1 mH
Indutância de magnetização (l_m)	599,2 mH
Resistência do estator (r_s)	3 Ω
Resistência do rotor (r_r)	2,9876 Ω
Número de polos	4
Momento de inércia	0,0013 J

Tabela 4.2 – Parâmetros da Turbina Eólica.

Parâmetro	Valor
Raio da turbina (R)	1,4 m
Ângulo de inclinação das pás (β)	0 °
Densidade do ar (ρ)	1,7 kg/m^3
Velocidade do vento (v)	10 m/s
r_{n1}/r_{n2}	6
Momento de inércia (J_{te})	0,01 kgm^2
Atrito do rotor eólico (F_{te})	0,01 Nms/rad
K_s	5 Nms/rad

4.1 Caso 1: Sem Afundamento de Tensão

No primeiro caso estudado pode-se observar o desempenho do sistema quando a rede elétrica não tem nenhum afundamento de tensão, ou seja, com a amplitude em seu

valor desejado.

A Tabela 4.1 apresenta os parâmetros utilizados em simulação para o Caso 1.

Tabela 4.3 – Parâmetros de Simulação do Caso 1.

Parâmetro	Valor
Tempo de Simulação	1,2 s
Passo de Cálculo	$1 \cdot 10^{-6}$
Amplitude da tensão da Rede Elétrica (e_g)	220 V
Frequência da Rede Elétrica	60 Hz
Frequência de Chaveamento	10 kHz
Capacitância do Barramento CC	4400 μ F
Tensão do Barramento CC	600 V
Resistência do Filtro	0,21 Ω
Indutância do Filtro	4 mH
Capacitância do Filtro	3 μ F

As correntes do sistema são apresentadas na Fig. 4.1 e são divididas em duas colunas. Na primeira coluna são apresentados os resultados referentes a topologia sem o uso do transformador, enquanto que a segunda coluna é referente a topologia com o uso do transformador. A Fig. 4.1(a) mostra as correntes da rede elétrica (i_{g1} , i_{g2} e i_{g3}) senoidais. Devido ao acoplamento, a corrente de circulação presente na topologia sem o transformador afeta o desempenho do filtro, o que explica a presença de componentes harmônicas na corrente mostrada na Fig. 4.1(a) na topologia sem o transformador. As correntes do rotor (i_{r1} , i_{r2} e i_{r3}) e do estador (i_{s1} , i_{s2} e i_{s3}) do DFIG são apresentadas nas Fig. 4.1(b) e 4.1(c), respectivamente, observa-se que as mesmas apresentam comportamento bem similar em ambas as topologias. Por fim, as correntes do conversor p (i_{p1} , i_{p2} e i_{p3}) são apresentadas na Fig. 4.1(d), nota-se a presença de componentes harmônicas nas mesmas, o que não compromete o sistema.

A corrente de circulação, apresentada na Fig. 4.2 tem valor nulo, o que mostra o bom funcionamento do controle. A corrente de circulação só está presente na topologia sem transformador.

As tensões da rede elétrica (e_{g1} , e_{g2} e e_{g3}) são mostradas na Fig. 4.3(a), sendo apresentada nas topologias com e sem transformador. Na Fig. 4.3(b) tem-se as tensões no estador do DFIG (v_{s1} , v_{s2} e v_{s3}), pode-se observar que as mesmas são similares as tensões impostas pela rede elétrica.

Na Fig. 4.4 são apresentados os resultados da tensão do barramento CC, das potências ativa e reativa e da velocidade do rotor. Novamente, a primeira coluna é referente a topologia sem o transformador e a segunda coluna com o uso de transformador. A referência imposta à tensão do barramento CC é 600 V, pode-se observar na Fig. 4.4(a) que a mesma está controlada. Na Fig. 4.4(b) são apresentados os resultados das potências

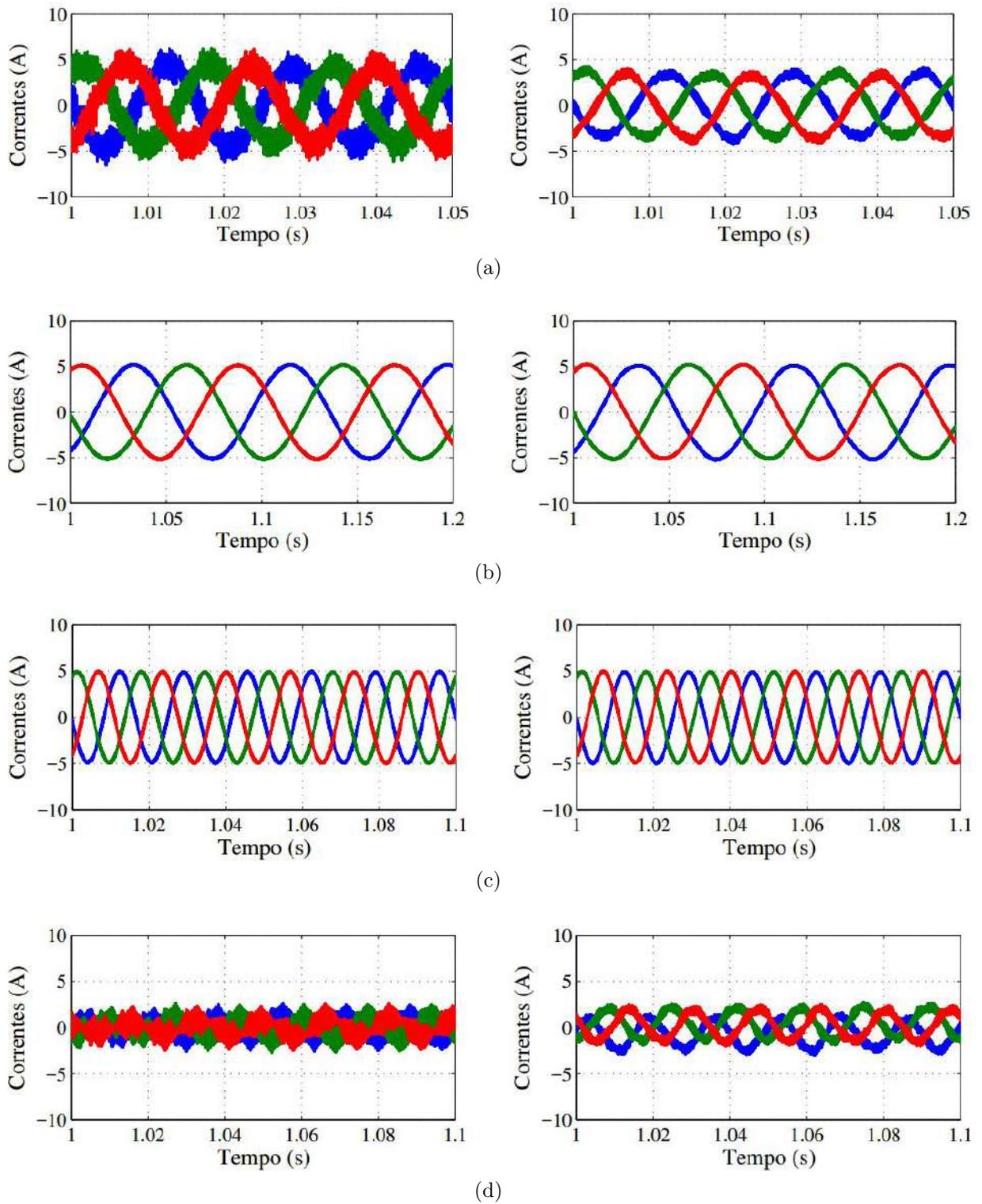


Figura 4.1 – Resultados de Simulação sem Afundamento de Tensão (a) Correntes i_{g1} , i_{g2} e i_{g3} (b) Correntes i_{r1} , i_{r2} e i_{r3} (c) Correntes i_{s1} , i_{s2} e i_{s3} (d) Correntes i_{p1} , i_{p2} e i_{p3} . Topologias sem (lado esquerdo) e com o transformador (lado direito).

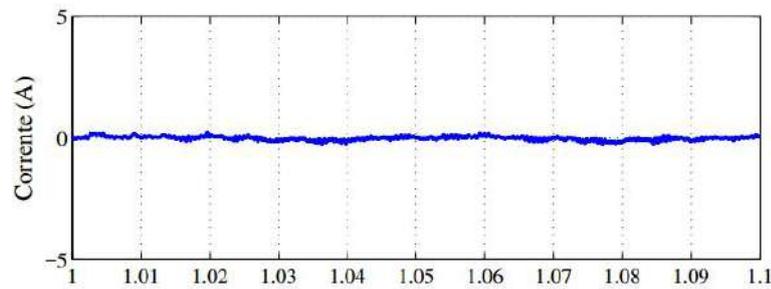


Figura 4.2 – Resultados de simulação sem afundamento de tensão. Corrente de circulação na topologia sem o capacitor.

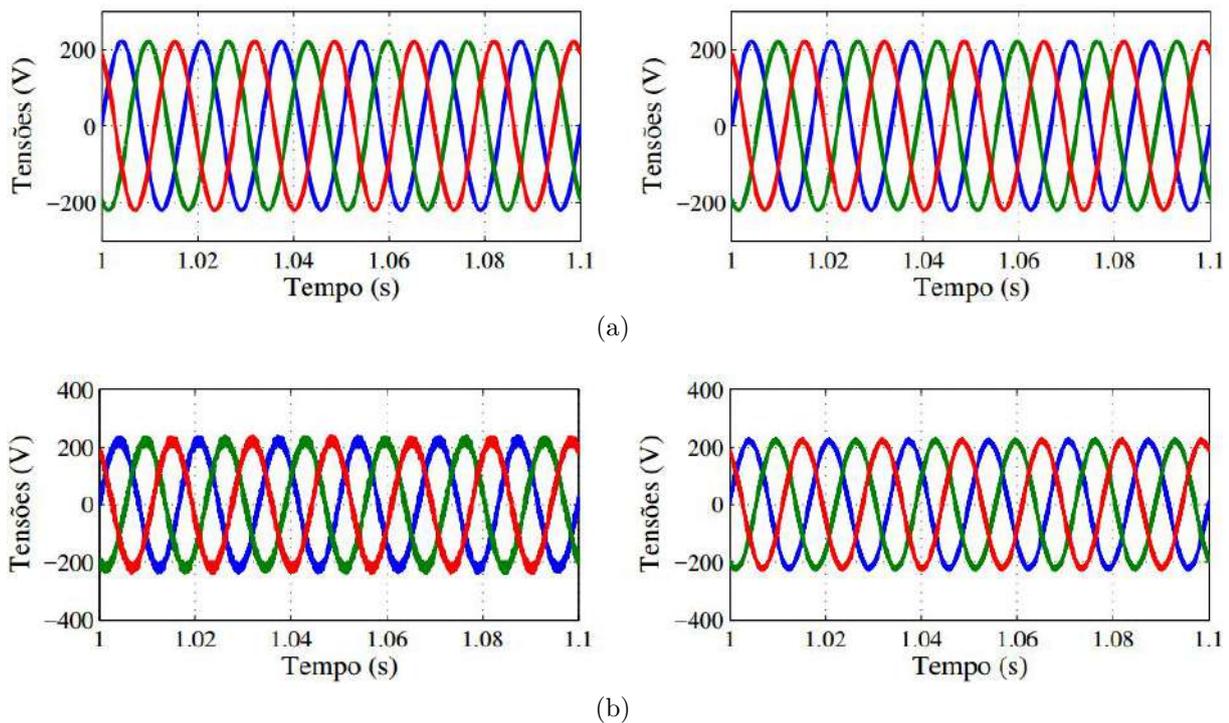


Figura 4.3 – Resultados de simulação sem afundamento de tensão. (a) Tensões da rede (b) Tensões no terminal do estator. Topologia sem o transformador (lado esquerdo) e topologia com o transformador (lado direito).

ativa e reativa. É realizado o controle da potência reativa, fazendo com que a mesma tenha o valor nulo, como pode ser observado na figura. A velocidade do gerador é mostrada na Fig. 4.4(c), a mesma está seguindo sua referência que é 300 rad/s .

Ainda sobre o controle realizado, a Fig. 4.5(a) apresenta as correntes dq do rotor no referencial da tensão. As suas respectivas referências também são mostradas no gráfico, mostrando o bom desempenho do sistema de controle. Por fim, o conjugado mecânico (c_m) imposto no DFIG pela turbina eólica é mostrado na Fig. 4.5 (b).

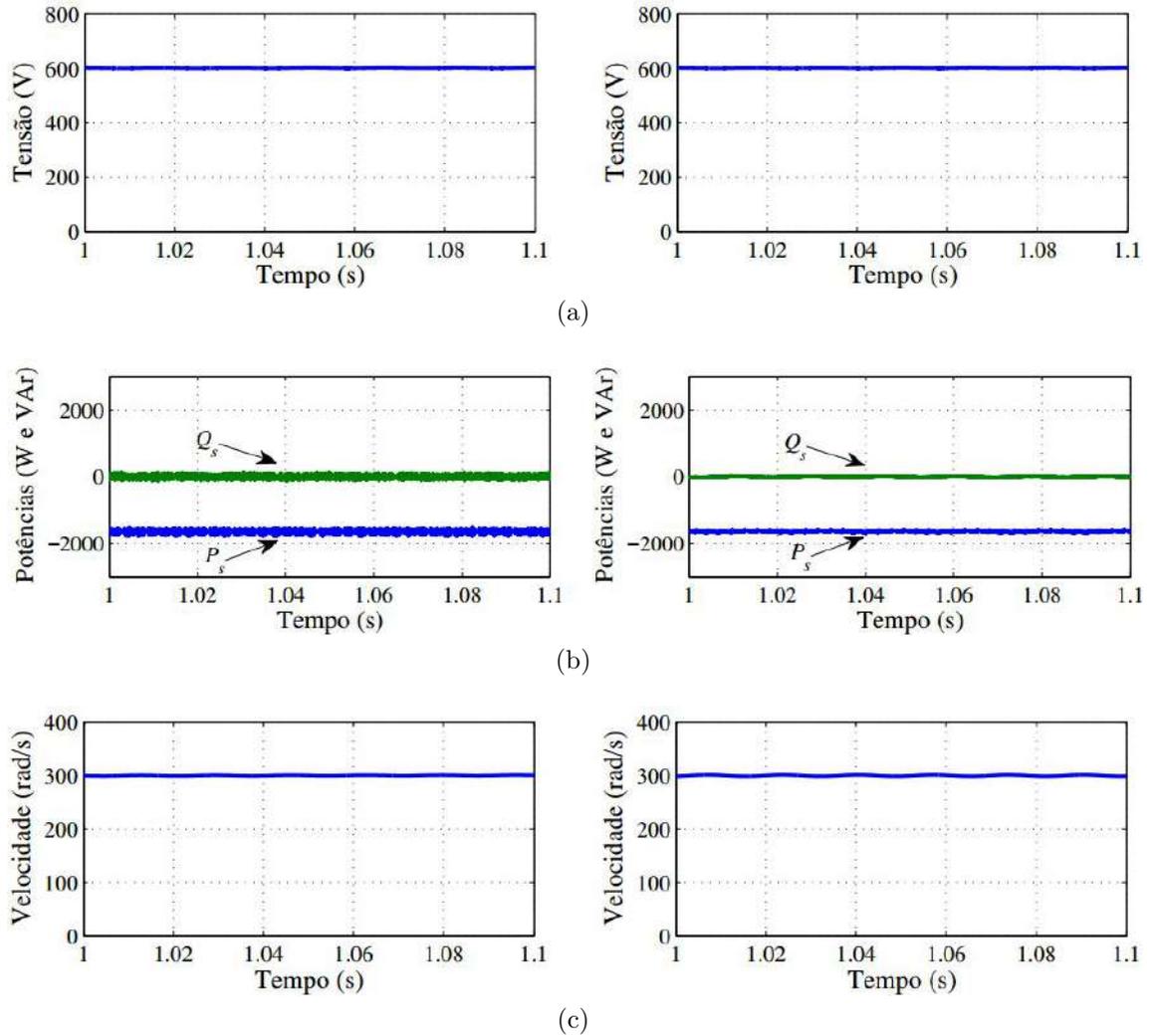


Figura 4.4 – Resultados de simulação sem afundamento de tensão. (a) Tensão no barramento CC (b) Potências ativa e reativa (c) Velocidade do rotor. Lado esquerdo topologia sem transformador e lado direito topologia com transformador.

4.2 Caso 2: Com Afundamento de Tensão

No segundo conjunto de resultados estudados pode-se observar o desempenho do sistema quando a rede elétrica apresenta um afundamento de cerca de 10%, passando agora a ter a amplitude de 200 V, como mostrado na Tabela 4.4 onde são apresentados os parâmetros utilizados na simulação.

As correntes do sistema são apresentadas na Fig. 4.6 e são divididas em duas colunas. Na primeira coluna são apresentados os resultados referentes a topologia sem o uso do transformador, enquanto que a segunda coluna é referente a topologia com o uso do transformador

A Fig. 4.6(a) mostra as correntes da rede elétrica (i_{g1} , i_{g2} e i_{g3}) senoidais, em relação ao primeiro conjunto de medições, nota-se que a corrente da rede na topologia sem o transformador apresenta a presença de mais componentes harmônica. Isso pode

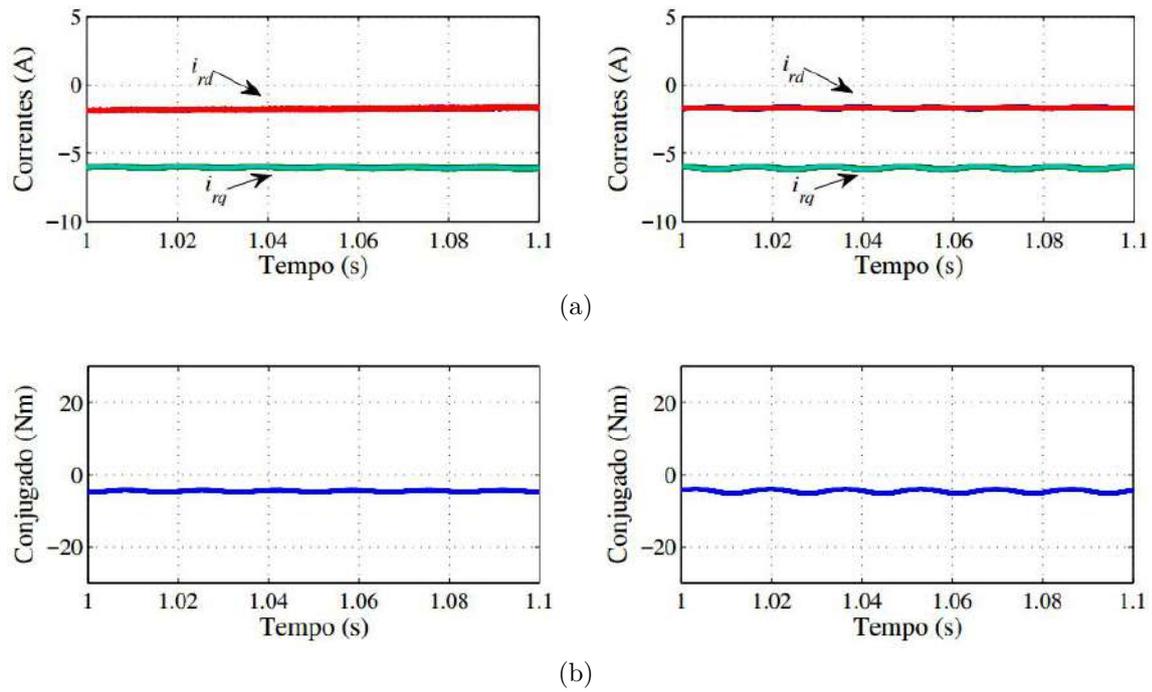


Figura 4.5 – Resultados de simulação sem afundamento de tensão. (a) Correntes dq do rotor (b) Conjugado. Lado esquerdo topologia sem transformador e lado direito topologia com transformador.

Tabela 4.4 – Parâmetros de Simulação do Caso 2.

Parâmetro	Valor
Tempo de Simulação	1,2 s
Passo de Cálculo	$1 \cdot 10^{-6}$
Amplitude da tensão da Rede Elétrica (e_g)	200 V
Frequência da Rede Elétrica	60 Hz
Frequência de Chaveamento	10 kHz
Capacitância do Barramento CC	4400 μ F
Tensão do Barramento CC	600 V
Resistência do Filtro	0,21 Ω
Indutância do Filtro	4 mH
Capacitância do Filtro	3 μ F

ser explicado pelo fato que devido ao acoplamento, a corrente de circulação presente na topologia sem o transformador afeta o desempenho do filtro. As correntes do rotor (i_{r1} , i_{r2} e i_{r3}) e do estador (i_{s1} , i_{s2} e i_{s3}) do DFIG são apresentadas nas Figs. 4.6(b) e 4.6(c) respectivamente, observa-se que as mesmas apresentam comportamento bem similar em ambas as topologias. Por fim, as correntes do conversor p (i_{p1} , i_{p2} e i_{p3}) são apresentadas na Fig. 4.6(d), nota-se a presença de componentes harmônicas nas mesmas, o que não compromete o sistema.

A corrente de circulação, apresentada na Fig. 4.7 tem valor nulo, o que mostra o bom funcionamento do controle, já que sua referência é 0. A corrente de circulação só está presente na topologia sem transformador.

As tensões da rede elétrica (e_{g1} , e_{g2} e e_{g3}) são mostradas na Fig. 4.8(a), sendo apresentada nas topologias com e sem transformador, agora a amplitude da tensão da rede é de 180 V, que consiste em cerca de 10% de afundamento. Na Fig. 4.8(b) tem-se as tensões no estador do DFIG (v_{s1} , v_{s2} e v_{s3}), pode-se observar que as mesmas mantêm a amplitude da tensão em 220 V, mesmo sofrendo o afundamento de 10%, isso se deve ao fato de que o controle do conversor série estar apresentando bom funcionamento. Nota-se também que a tensão na topologia sem o transformador sente um pouco o efeito do chaveamento, mas nada que comprometa o sistema.

Na Fig. 4.9 são apresentados os resultados da tensão do barramento CC, das potências ativa e reativa e da velocidade do rotor. Novamente, a primeira coluna é referente a topologia sem o transformador e a segunda coluna com o uso de transformador. A referência imposta à tensão do barramento CC é 600 V, pode-se observar na Fig. 4.9(a) que a mesma está controlada. Na Fig. 4.9(b) são apresentados os resultados das potências ativa e reativa. É realizado o controle da potência reativa, fazendo com que a mesma tenha o valor nulo, como pode ser observado na figura. A velocidade do gerador é mostrada na Fig.4.9(c), a mesma está seguindo sua referência que é 300 *rad/s*.

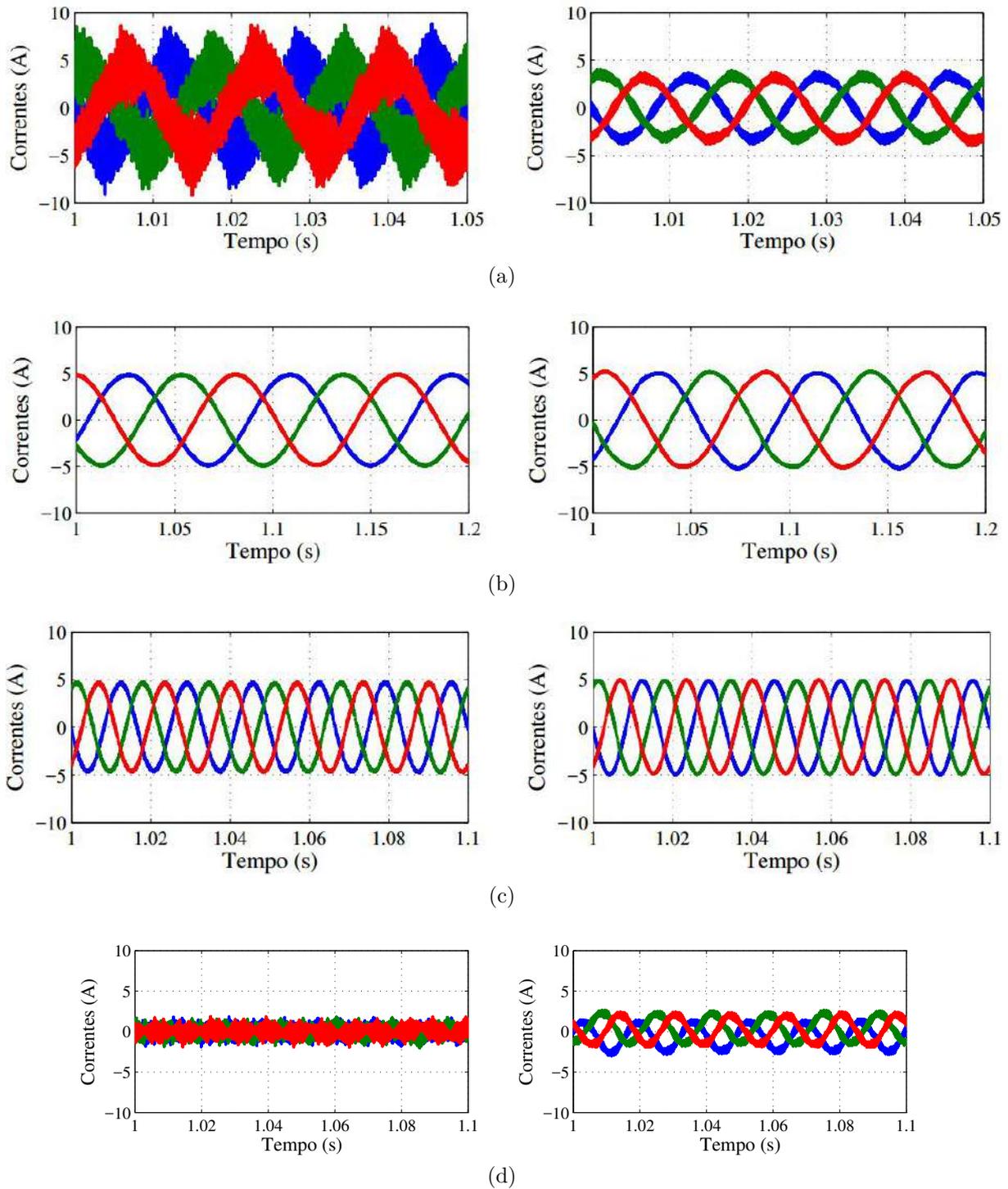


Figura 4.6 – Resultados de Simulação com afundamento de tensão. (a) Correntes i_{g1} , i_{g2} e i_{g3} (b) Correntes i_{r1} , i_{r2} e i_{r3} (c) Correntes i_{s1} , i_{s2} e i_{s3} (d) Correntes i_{p1} , i_{p2} e i_{p3} . Topologias sem (lado esquerdo) e com o transformador (lado direito).

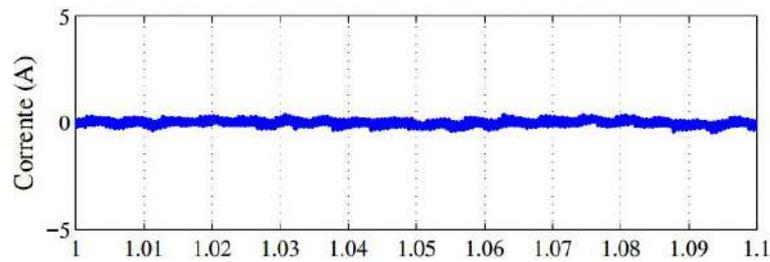


Figura 4.7 – Resultados de simulação com afundamento de tensão. Corrente de circulação na topologia sem transformador.

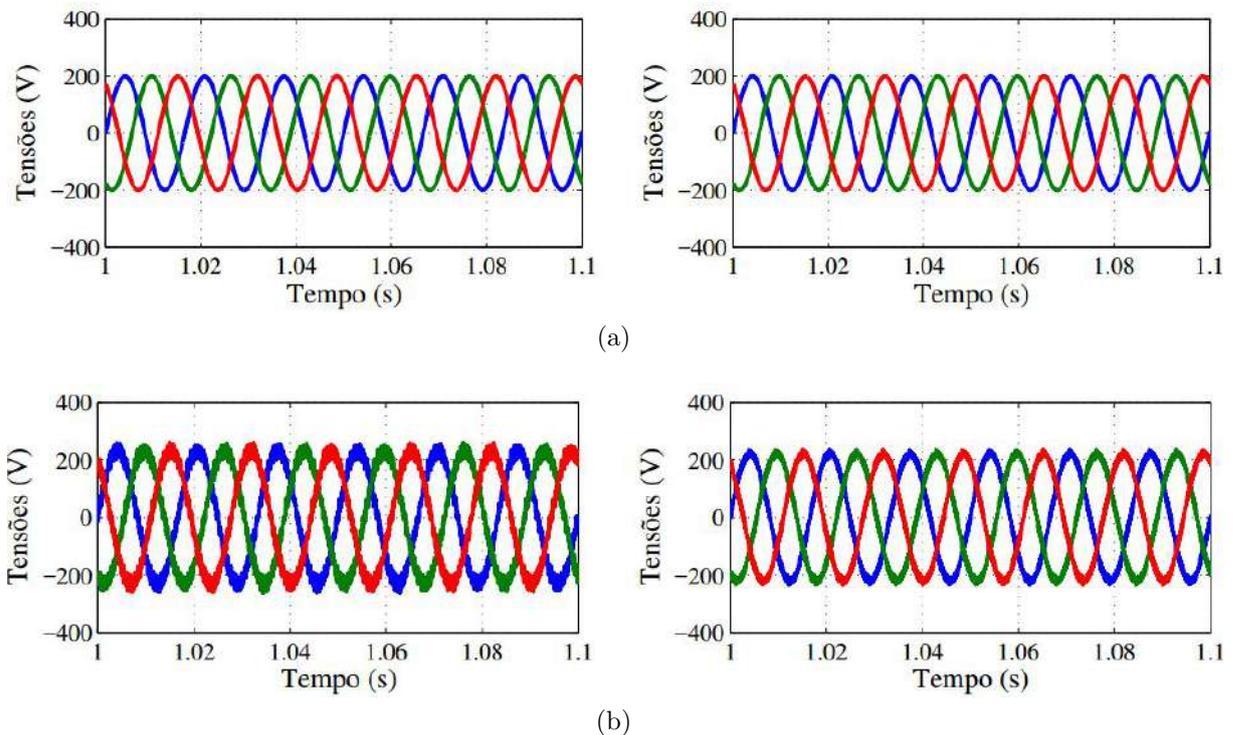


Figura 4.8 – Resultados de simulação com afundamento de tensão. (a) Tensões da rede (b) Tensões no terminal do estator. Topologia sem o transformador (lado esquerdo) e topologia com o transformador (lado direito).

Ainda sobre o controle realizado, a Fig. 4.10(a) apresenta as correntes dq do rotor no referencial da tensão. As suas respectivas referências também são mostradas no gráfico, mostrando o bom desempenho do sistema de controle. Por fim, o conjugado mecânico (c_m) imposto no DFIG pela turbina eólica é mostrado na Fig. 4.10(b).

4.3 Conclusão

Através dos resultados de simulação apresentados nesta seção em duas situações, com e sem afundamento de tensão, foi mostrado que ao inserir um conversor em série entre a rede e o estator do DFIG sem a necessidade do uso de um transformador as tensões no DFIG foram mantidas equilibradas, eliminando assim os problemas causados

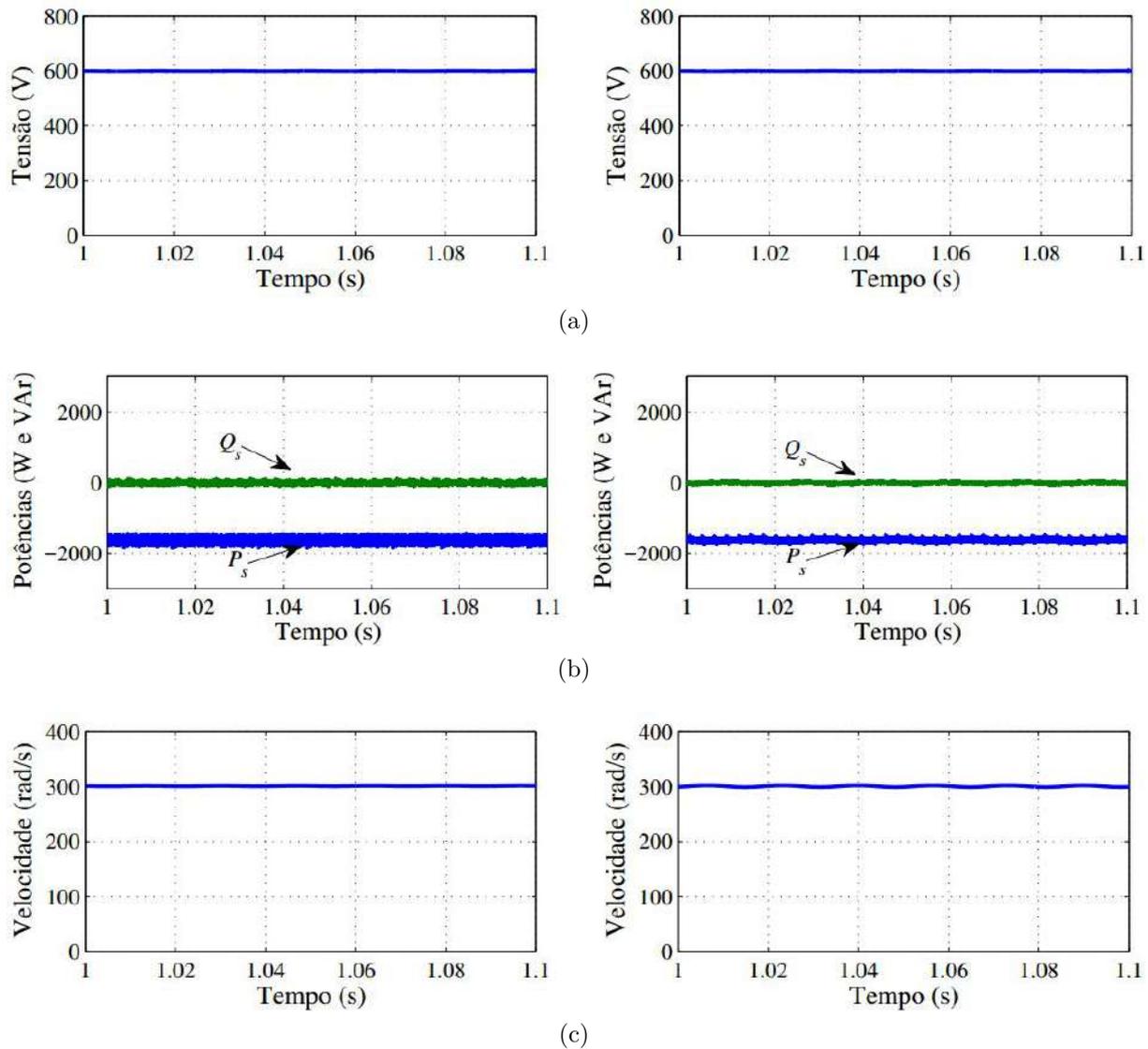


Figura 4.9 – Resultados de simulação com afundamento de tensão. (a) Tensão no barramento CC (b) Potências ativa e reativa (c) Velocidade do rotor. Topologia sem o transformador (lado esquerdo) e topologia com o transformador (lado direito).

por instabilidades nas tensões da rede. O sistema de controle garantiu que a corrente de circulação presente entre os conversores e o DFIG tem o valor nulo, eliminando assim a necessidade do transformador entre a rede elétrica e o estator do DFIG. Também foi apresentado o bom desempenho do sistema de controle da tensão do barramento CC, da potência reativa e da velocidade do rotor.

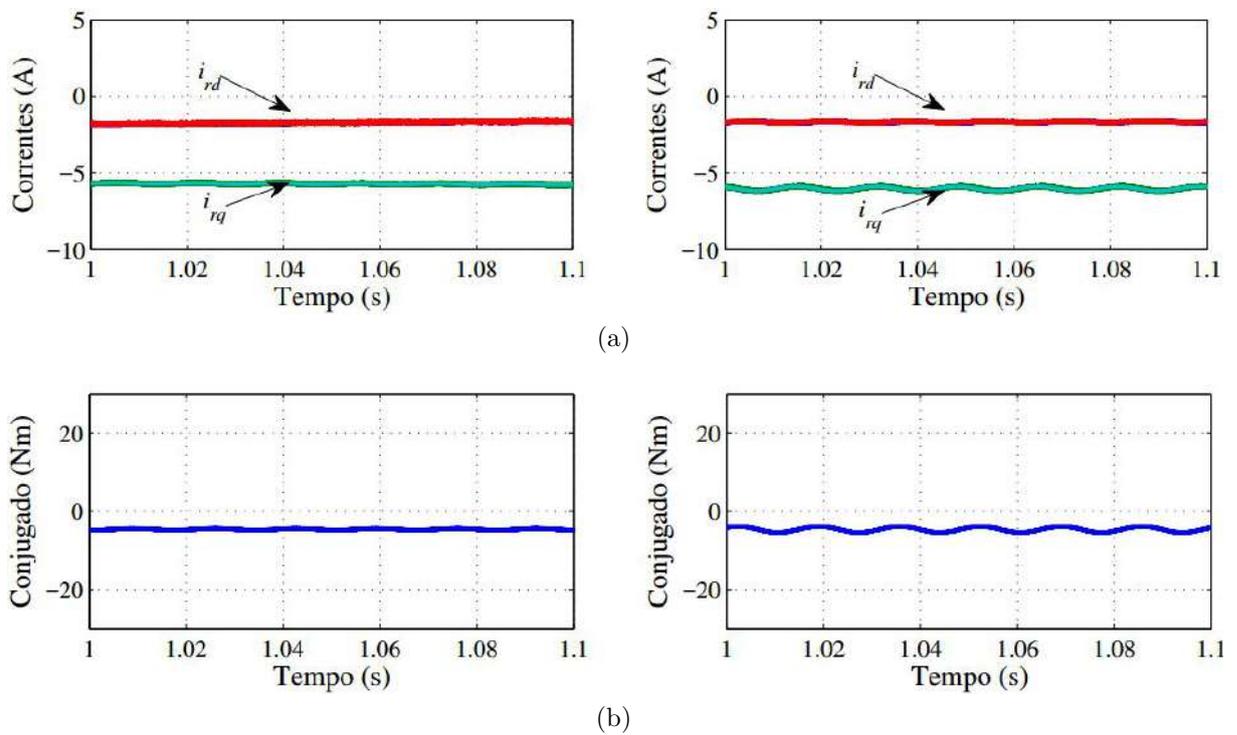


Figura 4.10 – Resultados de simulação sem afundamento de tensão. (a) Correntes dq do rotor (b) Conjugado. Lado esquerdo topologia sem transformador e lado direito topologia com transformador.

5 Conclusões e Perspectivas Futuras

Neste trabalho foi apresentado um sistema de conversão de energia eólica baseado em um gerador de indução de rotor bobinado que utiliza um conversor em série conectado entre a rede e o estator do DFIG sem o uso de transformador para solucionar os problemas causados por instabilidades nas tensões da rede. Foi feita uma comparação com a topologia convencional.

A topologia proposta com a inserção de um conversor em série e com o sistema de controle elaborado foram capazes de manter as tensões equilibradas no estator do DFIG, eliminando assim os problemas relacionados aos afundamentos de tensão na rede elétrica, como a oscilação da dupla frequência no torque eletromagnético, o aumento do estresse mecânico no eixo do rotor e o aumento nas correntes do estator que levam a um aquecimento desiguais dos enrolamentos.

Através da análise entre a topologia proposta e a topologia convencional foi possível observar que as mesmas apresentam desempenho similar, mostrando que o uso de transformador, característica da topologia convencional, não é necessário.

Através de simulações computacionais foi possível verificar que o controle da velocidade do rotor, da potência reativa, da velocidade e da tensão do barramento CC estão funcionando de maneira adequada. O controle também garante que a corrente de circulação presente na topologia proposta é nula.

Com isso, é mostrado que é possível realizar solucionar os problemas causados pela instabilidade das tensões da rede elétrica sem a necessidade de usar transformador, eliminando então a necessidade do mesmo e consequentemente diminuindo o custo do sistema.

Como perspectiva futura o filtro deverá ser melhor estudado, para que se possa obter melhor desempenho do sistema durante grandes desequilíbrios e afundamentos na rede.

Referências

AHMED, A. *Power Eletronics for Technology*. 1. ed. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2000. Citado na página 35.

CAMPOS, F. G. R. de. *Geração de Energia a Partir de uma Fonte Eólica com Gerador Assíncrono Conectado a Conversor Estático Duplo*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. Citado na página 42.

DATTA, R.; RANGANATHAN, V. T. Variable-speed wind power generation using doubly fed wound rotor induction machine—a comparison with alternative schemes. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 17, n. 3, p. 414–421, Sep 2002. ISSN 0885-8969. Citado na página 27.

FILHO, R. M. S. et al. Comparison of three single-phase pll algorithms for ups applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 55, n. 8, p. 2923–2932, Aug 2008. Citado na página 47.

FLANNERY, P. S.; VENKATARAMANAN, G. Evaluation of voltage sag ride-through of a doubly fed induction generator wind turbine with series grid side converter. In: *2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1839–1845. ISSN 0275-9306. Citado 8 vezes nas páginas 15, 29, 30, 31, 32, 33, 34 e 53.

FLANNERY, P. S.; VENKATARAMANAN, G. A fault tolerant doubly fed induction generator wind turbine using a parallel grid side rectifier and series grid side converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 23, n. 3, p. 1126–1135, May 2008. ISSN 0885-8993. Citado 6 vezes nas páginas 15, 29, 31, 32, 33 e 34.

FLANNERY, P. S.; VENKATARAMANAN, G. Unbalanced voltage sag ride-through of a doubly fed induction generator wind turbine with series grid-side converter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 45, n. 5, p. 1879–1887, Sept 2009. ISSN 0093-9994. Citado na página 28.

HARNEFORS, L.; NEE, H. P. Model-based current control of ac machines using the internal model control method. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 34, n. 1, p. 133–141, 1998. Citado na página 46.

HOLDSWORTH, L. et al. Comparison of fixed speed and doubly-fed induction wind turbines during power system disturbances. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, v. 150, n. 3, p. 343–352, May 2003. ISSN 1350-2360. Citado na página 29.

HU, J.; HE, Y. Modeling and enhanced control of dfig under unbalanced grid voltage conditions. *Electric Power Systems Research*, v. 79, n. 2, p. 273 – 281, 2009. ISSN 0378-7796. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779608001934>>. Citado 4 vezes nas páginas 15, 29, 31 e 32.

IBRAHIM, A. O. et al. A fault ride-through technique of dfig wind turbine systems using dynamic voltage restorers. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 26, n. 3, p. 871–882, Sept 2011. ISSN 0885-8969. Citado 6 vezes nas páginas 15, 27, 28, 29, 30 e 31.

- JACOBINA, C. B. *Sistema de Acionamento Estático de Máquina Elétrica*. 1. ed. [S.l.]: UFCG, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.
- JACOBINA, C. B. et al. Modeling and control of unbalanced three-phase systems containing pwm converters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 37, n. 6, p. 1807–1816, Nov 2001. Citado na página 46.
- JAMAL, A.; SURIPTO, S.; SYAHPUTRA, R. Performance evaluation of wind turbine with doubly-fed induction generator. *IJAER International Journal of Applied Engineering Research*, v. 7, p. 4999–5004, 2016. Citado na página 27.
- JEDTBERG, H. et al. Impacts of unbalanced grid voltages on lifetime of dc-link capacitors of back-to-back converters in wind turbines with doubly-fed induction generators. In: *2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 816–823. Citado na página 28.
- LIAO, Y. et al. Operation and control of a grid-connected dfig-based wind turbine with series grid-side converter during network unbalance. *Electric Power Systems Research*, v. 81, n. 1, p. 228 – 236, 2011. ISSN 0378-7796. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779610002129>>. Citado 6 vezes nas páginas 15, 29, 31, 32, 33 e 34.
- LUNA, A. et al. Control of dfig-wt under unbalanced grid voltage conditions. In: *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 370–377. ISSN 2329-3721. Citado 4 vezes nas páginas 15, 29, 31 e 32.
- MARTINS, F.; GUARNIERI, R.; PEREIRA, E. O aproveitamento da energia eólica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 30, n. 1, p. 1304, 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779608001934>>. Citado na página 27.
- MENDES, V. F. et al. Doubly-fed induction generator control during unbalanced grid conditions. In: *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6. Citado 3 vezes nas páginas 29, 31 e 32.
- MOHAN N.; UNDELAND, T. M. e. R. W. P. *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. 3. ed. [S.l.]: John Wiley e Sons, INC, 2002. Citado na página 35.
- MORREN, J.; HAAN, S. W. H. de. Ridethrough of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 20, n. 2, p. 435–441, June 2005. ISSN 0885-8969. Citado 5 vezes nas páginas 15, 27, 28, 29 e 30.
- MWANIKI, J.; LIN, H.; DAI, Z. A concise presentation of doubly fed induction generator wind energy conversion systems challenges and solutions. *Journal of Engineering*, v. 2017, p. 13, 2017. Citado na página 28.
- OLIVEIRA, T. F. F. de; SANTOS, H. I. dos. Uso da energia eólica como alternativa para mitigar o agravamento do efeito estufa. *I- Universidade Católica de Goiás*, p. 1–18, Dez 2008. Citado na página 27.

OLIVEIRA, A. C. de et al. A stationary stator reference frame control of dfig under unbalanced voltage conditions. In: *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6. Citado 3 vezes nas páginas 29, 31 e 32.

RECH A., C. R.; VOLTOLINI, H. Modelagem e simulação de uma turbina eólica com torque e potência na saída. *SICITE XVII*, 2012. Citado na página 42.

ROCHA, N. *Sistemas Estáticos de Geração Eólica com Gerador de Indução a partir de Fonte Eólica*. Dissertação (Dissertação) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 43.

SEMAN, S.; NIIRANEN, J.; ARKKIO, A. Ride-through analysis of doubly fed induction wind-power generator under unsymmetrical network disturbance. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 21, n. 4, p. 1782–1789, Nov 2006. ISSN 0885-8950. Citado 3 vezes nas páginas 15, 29 e 30.

SEMAN, S. et al. Performance study of a doubly fed wind-power induction generator under network disturbances. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 21, n. 4, p. 883–890, Dec 2006. ISSN 0885-8969. Citado 3 vezes nas páginas 15, 29 e 30.

XIE, B.; FOX, B.; FLYNN, D. Study of fault ride-through for dfig based wind turbines. In: *2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies. Proceedings*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 1, p. 411–416 Vol.1. Citado na página 29.

XU, H.; HU, J.; HE, Y. Integrated modeling and enhanced control of dfig under unbalanced and distorted grid voltage conditions. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 27, n. 3, p. 725–736, Sept 2012. ISSN 0885-8969. Citado 3 vezes nas páginas 29, 31 e 32.

YAO, J. et al. Enhanced control of a dfig-based wind-power generation system with series grid-side converter under unbalanced grid voltage conditions. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 28, n. 7, p. 3167–3181, July 2013. ISSN 0885-8993. Citado 6 vezes nas páginas 15, 29, 31, 32, 33 e 34.

ZAREI, M. E.; ASAEI, B. Predictive direct torque control of dfig under unbalanced and distorted stator voltage conditions. In: *2013 12th International Conference on Environment and Electrical Engineering*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 507–512. Citado 3 vezes nas páginas 29, 31 e 32.