



Luan Lúcio da Cunha

Análise Teórica da Máquina de Indução Duplamente Alimentada Atuando como Gerador Eólico

Brasil

Abril, 2022



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Luan Lúcio da Cunha

Matrícula: 20161040070287

Título do Trabalho: Análise Teórica da Máquina de Indução Duplamente Alimentada Atuando como Gerador Eólico.

Autorização - Marque uma das opções

1. (x) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2** ou **3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Itumbiara-GO, 19 / 05 / 2022.
Local Data

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Luan Lúcio da Cunha

Análise Teórica da Máquina de Indução Duplamente Alimentada Atuando como Gerador Eólico

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Goiás - Campus Itumbiara, como requisito parcial para obtenção do título de Graduado em Engenharia Elétrica.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – IFG

Bacharelado em Engenharia Elétrica

Orientador: Marcos Antônio Arantes de Freitas

Brasil

Abril, 2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C972a Cunha, Luan Lúcio da
 Análise teórica da máquina de indução duplamente alimentada
 atuando como gerador eólico. Luan Lúcio da Cunha. -- Itumbiara,
 2022.
 80 p. : il. color.

 Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia
 Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
 de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2022.

 Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio Arantes de Freitas

 1. Energia eólica 2. Geração distribuída de energia elétrica
 3. Energia - Fontes alternativas.
 I. Título. II. Freitas, Marcos Antônio Arantes de. III.
 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

CDD 621.312136

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Biblioteca Maria Gabriela Pacheco Pardey / Câmpus Itumbiara
Bibliotecário: Eduardo Pereira Resende CRB1/3266



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA

Termo de Aprovação

Luan Lúcio da Cunha

Análise Teórica da Máquina de Indução duplamente alimentada Atuando como Gerador Eólico

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Itumbiara, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado, em 13 de Maio de 2022, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcos Antônio Arantes de Freitas - Orientador

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Prof. Dr. Roberlam Gonçalves de Mendonça - Membro

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Prof. Dr. Victor Régis Bernardeli - Membro

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Documento assinado eletronicamente por:

- **Roberlam Gonçalves de Mendonca**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 19/05/2022 18:42:14.
- **Marcos Antonio Arantes de Freitas**, DIRETOR - CD2 - CP-ITUMBIA, em 19/05/2022 18:13:06.
- **Victor Regis Bernardeli**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 19/05/2022 16:32:15.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 19/05/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 283675

Código de Autenticação: 90f875757c



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Avenida Furnas, nº 55, Bairro Village Imperial, ITUMBIARA / GO, CEP 75524-010
(64) 2103-5612 (ramal: 5612)

*“Conhecer-se é dominar-se,
dominar-se é triunfar.” (Jigoro Kano)*

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente à Deus, por ter permitido que eu tivesse saúde, determinação e por sempre me mostrar o caminho certo. Aos meus pais e irmãos, que me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho. Aos professores, pelas correções e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional ao longo do curso.

*“Não vos amoldeis às estruturas deste mundo,
mas transformai-vos pela renovação da mente,
a fim de distinguir qual é a vontade de Deus:
o que é bom, o que Lhe é agradável, o que é perfeito.
(Bíblia Sagrada, Romanos 12, 2)*

Resumo

A preocupação em reduzir a poluição fóssil e substituí-la por energia limpa e renovável tem estimulado a pesquisa na busca de outras formas de geração de energia, como por exemplo a energia eólica, fonte que utiliza as correntes de ar para a geração de eletricidade. Neste contexto tem-se observado um crescimento exponencial a exploração de outras fontes produtoras, principalmente a geração de energia eólica, que se comparada com outras fontes de energia renováveis, tem várias vantagens, quais sejam: necessitam de pouca área de terra, seus custos são baixos em todo o sistema, há uma possível disponibilidade regular de energia offshore e, grande facilidade de instalação. Assim, para contribuir nesse cenário, o presente trabalho demonstra e introduz uma análise teórica da máquina de indução duplamente alimentada, atuando como Gerador Eólico. Foi realizado um estudo do GIDA e apresentada a modelagem matemática e simulação computacional no Matlab®/Simulink™. A abordagem matemática foi amplamente utilizada na modelagem do mecanismo turbina eólica e do gerador de indução duplamente alimentado (GIDA) conforme foram descritas. A estratégia de controle vetorial utilizado para o controle ativo de filtragem e de compensação da energia distorcida, demonstra o desequilíbrio da corrente no lado da carga. O controlador do lado da máquina é utilizado para atenuação dos harmônicos e desequilíbrio de tensão e da corrente no ponto de acoplamento comum. Por fim, o trabalho possui como objetivo construir um modelo de simulação do GIDA no ambiente MATLAB. Os resultados da simulação mostram os desempenhos das correntes de estator e rotor em todos os três modos. A precisão da modelação matemática também pode ser verificada através dos resultados da simulação.

Palavras-chave: Energia eólica, Turbina Eólica, Gerador de Indução Duplamente Alimentado, Controle Vetorial, Simulação Computacional, Matlab/Simulink.

Abstract

A source of energy sought as a source of renewable energy, which uses as sources of clean and renewable energy for other forms of electrical energy. In this year it was observed a growth of sources, mainly, that are generators of other renewable energy sources, mainly the ones that are generators of other renewable energy sources, have several advantages, of energy sources, of their source costs, which are energy generators and source costs. system-wide, there is regular availability of offshore power and ease of installation. Thus, to contribute to this scenario, the work demonstrates and introduces an analysis of the Machine Theory presented of Doubly Fed production, as a Wind Generator. A DFIG study was carried out and a mathematical modeling and computational simulation were presented in Matlab®/Simulink™. The mathematical approach used was used in the modeling of the turbocharged mechanism and doubly fed generator (DFIG) as they were approved. A vector control strategy used for air load control and air force compensation, demonstrating the control of aerodynamic current from load distortion. The machine side controller is used to attenuate harmonics and common voltage and current at the connection point. Finally, the work aims to build a simulation model of DFIG in the MATLAB environment. The simulation results show the performance of stator and rotor currents in all three modes. The accuracy of the mathematical modeling can also be verified through the simulation results.

Keywords: Wind Energy, Wind Turbine, Doubly Powered Induction Generator, Vector Control, Computer Simulation, Matlab/Simulink.

Lista de ilustrações

Figura 2.1 – Configuração Geral de uma Máquina de Indução Duplamente Alimentada	22
Figura 3.1 – Desenho do estator de uma máquina de indução	24
Figura 3.2 – Diagrama em corte de um motor de indução típico com rotor gaiola de esquilo.	25
Figura 3.3 – Diagrama em corte de um motor de indução de rotor bobinado.	25
Figura 4.1 – Configuração básica da máquina de indução duplamente alimentada	31
Figura 4.2 – Gerador de indução duplamente alimentado (GIDA) atuando em velocidade subsíncrona	32
Figura 4.3 – Gerador de indução duplamente alimentado (GIDA) atuando em velocidade supersíncrona	33
Figura 4.4 – Modos de operação	34
Figura 6.1 – Configuração Geral de Alimentação do GIDA	40
Figura 6.2 – Circuito Elétrico Equivalente de uma Fase em Regime Permanente	41
Figura 6.3 – Circuito elétrico equivalente monofásico do GIDA com parâmetros do rotor, com correntes e tensões reduzidas ao estator	42
Figura 6.4 – Os quatro modos de operação do DFIG atendendo a potência ativa	44
Figura 6.5 – Diferentes quadros de referência para representar vetores espaciais do GIDA	46
Figura 6.6 – Modelo do GIDA no modelo $\alpha\beta$	47
Figura 6.7 – Modelo GIDA no modelo DQ	49
Figura 6.8 – Quadro de Referência DQ Rotativo Síncrono Alinhado com o Vetor de Espaço de Fluxo de Estator	49
Figura 6.9 – Malhas de controle de corrente do DFIG	50
Figura 6.10–Sistema Equivalente de Segunda Ordem de Controle de Corrente em Malha Fechada com Reguladores PI	51
Figura 6.11–Sistema de Malha Fechada Q_s e W_m (T_{load} considerado a zero)	53
Figura 6.12–Magnitudes mais representativas do GIDA multi-megawatt em torque constante na operação do motor com velocidade variável	54
Figura 6.13–Círculos de Limite de Tensão e Corrente Juntamente com Linhas Constantes Q_s e T_{em} Constantes (somente $Q_s > 0$ e $T_{em} < 0$ mostrado)	56
Figura 6.14–Dois exemplos de pontos de operação baixo (1) e alto (2)	56
Figura 6.15–Coeficiente C_p de uma Turbina Eólica de Três Pás	57

Figura 6.16–Curvas de potência de uma turbina eólica de velocidade variável com regulagem de passo de vários megawatts. a) $P_m = f(V_w, \omega_m)$, b) Projeção no plano (V_w, ω_m) , c) Projeção no plano (P_m, ω_m) , d) Projeção no plano (P_m, V_w) .	59
Figura 6.17–(a) Controle Geral de uma Turbina Eólica Baseada em DFIG e (b) Malhas de Controle em Diferentes Zonas de Operação	62
Figura 7.1 – Visão Geral dos Blocos da Simulação Computacional	64
Figura 7.2 – Visão Parcial da Fonte de Tensão Trifásica, Turbina Eólica e Máquina Assíncrona	64
Figura 7.3 – Visão Parcial da Máquina Assíncrona, Transformador e Conversores	65
Figura 7.4 – Controladores	65
Figura 7.5 – Turbina Eólica	66
Figura 7.6 – Diagrama de Blocos da Turbina Eólica	66
Figura 7.7 – Diagrama de Blocos do MPPT	67
Figura 7.8 – Controlador Proporcional Integral	67
Figura 7.9 – Transformador	67
Figura 7.10–Diagrama de Blocos	68
Figura 7.11–Resultado da Simulação Computacional. Em [a] Velocidade Subsíncrona; [b] Velocidade Supersíncrona;	68
Figura 7.12–[a] Conjugado para Velocidade Subsíncrona; [b] Conjugado para Velocidade Supersíncrona.	69
Figura 7.13–Resultado da simulação computacional. Em [a] Id - Velocidade Subsíncrona; [b] Id - Velocidade Supersíncrona.	69
Figura 7.14–Resultado da simulação computacional.[a] Iq - Velocidade Subsíncrona; [b] Iq - Velocidade Supersíncrona.	69
Figura 7.15–Comportamento da tensão do estator quando acontece um afundamento de tensão	70
Figura 7.16–Comportamento da corrente com a ativação da proteção	70
Figura 7.17–Comportamento da Corrente do Rotor	70
Figura 7.18–Comportamento da Corrente do Estator com Afundamento de Tensão	71
Figura 7.19–Comportamento do Torque com afundamento de tensão	71
Figura 7.20–Resultado da Simulação Computacional. Em [a] tensão estator; [b] Iq	71
Figura 7.21–Resultado da Simulação Computacional.[a] Torque; [b] Velocidade.	72
Figura 7.22–Comportamento do sistema tensão do estator quando acontece um afundamento de tensão	72
Figura 7.23–Comportamento do sistema tensão do estator quando acontece um afundamento de tensão	72
Figura 7.24–Comportamento da Corrente de Eixo Direto e de Eixo em Quadratura	73
Figura 7.25–Comportamento da Corrente do Estator e da corrente do Rotor	73

Figura 7.26–Torque	73
Figura 7.27–Corrente do Rotor	74
Figura A.1–Parâmetros do GIDA	79
Figura A.2–Parametros do GIDA	80

Lista de tabelas

Tabela 7.1 – Parâmetros da Máquina Simulada	63
---	----

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Considerações Iniciais	16
1.2	Panorama da Energia Eólica	17
2	OBJETIVOS	20
2.1	Objetivos Gerais	20
2.2	Justificativa	20
2.3	Organização do Trabalho	22
3	PRINCÍPIOS INTRODUTÓRIOS DA MÁQUINA DE INDUÇÃO	23
3.1	Considerações Iniciais	23
3.2	Introdução	23
3.3	Aspectos Construtivos	24
3.3.1	Carcaça	24
3.3.2	Estator	24
3.3.3	Rotor	25
3.4	Operação como Gerador	25
3.5	Métodos de Acionamento e Controle	27
3.5.1	Controle Escalar	27
3.5.2	Controle Vetorial	28
3.5.3	Controle Direto de Torque (DTC - Direct Torque Control)	28
4	GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADO	30
4.1	Considerações Iniciais	30
4.2	Introdução	30
4.3	Modos de Operação	32
4.3.1	Operação Subsíncrona	32
4.3.2	Operação Síncrona	32
4.3.3	Operação Supersíncrona	33
4.4	Operação com Torque Positivo e Torque Negativo	33
4.5	Imposição de Afundamento de Tensão da Rede	34
4.6	Elevação na Tensão da Rede	34
4.7	Distorção na Rede Trifásica	35
5	PRINCIPAIS GRANDEZAS DA MÁQUINA DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADA	36

5.1	Considerações Iniciais	36
5.2	Velocidade	36
5.3	Fator de Potência	36
5.4	Rendimento	37
5.5	Conjugado	37
6	MODELAGEM MATEMÁTICA DO GIDA E DA TURBINA EÓLICA	39
6.1	Considerações Iniciais	39
6.2	Aspectos Básicos do GIDA	39
6.3	Modelagem Dinâmica	45
6.3.1	Modelo $\alpha\beta$	45
6.3.2	Modelo DQ	48
6.3.3	Loops de Controle de Potência e Velocidade	51
6.3.4	Análise de Estado Estacionário	53
6.3.5	Restrições de Corrente e Tensão	54
6.4	Sistemas de Conversão de Energia Eólica Baseados em GIDA	57
6.4.1	Aerodinâmica da Turbina Eólica	57
6.4.2	Zonas de Controle da Turbina	58
6.4.3	Controle de Turbina	59
7	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
7.1	Considerações Iniciais	63
7.2	Diagrama de Blocos	64
7.2.1	Modelo de Turbina Eólica	65
7.2.2	Controle do Rotor	66
7.2.2.1	MPPT (Ponto de Máxima Potência)	66
7.2.3	Controlador Proporcional Integral	66
7.2.3.1	Transformador	67
7.2.3.2	Proteção Crowbar	67
7.3	Resultados das Simulações	68
7.3.1	GIDA em Operação Subsíncrona e Síncrona	68
7.3.2	Análise Simétrica de Quedas de Tensão em Turbinas Eólicas	69
7.3.3	Análise Assimétrica de Quedas de Tensão em Turbinas Eólicas	71
8	CONCLUSÃO	75
	REFERÊNCIAS	76

APÊNDICES	78
APÊNDICE A – LINHAS DE CÓDIGOS ARQUIVO.M	79

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1 Considerações Iniciais

Diante das mudanças climáticas devido ao avanço mundial das fabricas movidas a energia fóssil, observou-se a necessidade de desenvolver novas fontes de energia limpa. Sendo assim passou a produzir turbinas eólicas que utilizava a energia cinética das massas de ar. Esse tipo de usina ganhou popularidade por produzir energia limpa e por utilizar recursos naturais, tendo os primeiros modelos sido desenvolvidos para trabalhar à velocidade fixa (OLIVEIRA, 2009). Basicamente os primeiros sistemas eólicos eram compostos por um acoplamento entre uma turbina eólica, uma caixa de câmbio e uma máquina de indução diretamente conectada à rede, utilizando-se de uma partida suave para energizar a máquina (CANEDO, 2007).

Conforme Canedo (2007), embora seja simples, confiável e robusto, as turbinas eólicas de velocidade fixa eram consideradas ineficientes devido às flutuações de energia provocadas pela instabilidade da velocidade das massas de ar, instabilidade essa que ressoava na rede e prejudicava a qualidade de energia elétrica. Assim com o desenvolvimento das turbinas eólicas de velocidade variável em 1990 houve um grande impulso para a indústria de energia eólica com a melhoria no controle da turbina que reduzia as flutuações de potência.

Com o desenvolvimento da tecnologia das turbinas eólicas, estudos mostraram que para ser mais eficiente a turbina deveria operar em uma velocidade ideal, o que possibilitaria a extração ótima de energia do vento. Neste contexto, foram testadas diferentes configurações e estudos no setor eólico com o objetivo de possibilitar que a turbina pudesse trabalhar na velocidade mais próxima do ideal, uma delas foi a utilização do gerador de indução duplamente alimentado (GIDA), que, inclusive é o mais utilizado atualmente no desenvolvimento de projetos de parques eólicos.

A tecnologia utilizando o GIDA para a geração de energia eólica permite o controle

da velocidade da turbina, permitindo que ele busque a velocidade ideal de geração. Essa configuração consiste no acoplamento de uma turbina, uma caixa de engrenagens e uma máquina de indução duplamente conectado à rede que está conectada diretamente ao estator de circuito, onde todos estão conectados indiretamente a partir dos circuitos do rotor utilizando os conversores para o devido funcionamento.

Os principais inconvenientes deste tipo de configuração são os anéis deslizantes e escovas que acabam deixando espaço para a necessidade de mais manutenções. Seu controle é feito através do controle da tensão aplicada aos circuitos do rotor, ajustando o ângulo de inclinação das lâminas da turbina (ângulo de incidência da lâmina e a direção do vento), que está desenhando aerodinamicamente as pás da turbina para que possa empatar com a velocidade do vento, quando esta excede um controle de instalação de limite pré-definido.

O cenário recente demonstra que o mercado não está mais apenas crescendo em direção à geração centralizada, mas sim em outra direção como a geração distribuída. A vantagem da geração distribuída de energia é que ela é amplamente aceita pela comunidade industrial e acadêmica.

Neste contexto, o clássico gerador de indução trifásico que utiliza o rotor enrolado é um dos tipos mais populares de máquinas utilizadas para a operação. Para obter energia limpa, vários controles de estratégia estão sendo utilizados para tentar manter constante a aplicação de velocidade variável, como por exemplo o controle de torque direto ou controle vetorial. Esses métodos têm sido utilizados para controlar as potências reativas e ativas.

1.2 Panorama da Energia Eólica

No Brasil, o aproveitamento da energia eólica avançou somente a partir de 2004, com a chegada do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa). Este programa nacional, contemplado no regime feed-in, realizou a contratação de 54 parque eólicos, que totalizaram 1,4 GW.

Nesses anos, as condições não eram favoráveis para a compra de aerogeradores, pois não possuía a devida competição na fabricação ou mesmo na produção de aerogeradores e nessa época o câmbio era desvalorizado, dificultando de maneira expressiva o desenvolvimento dos parques eólicos, que possuíam previsão de estarem em funcionamento até dezembro de 2006.

Em 2005, foi criado um novo modelo no sistema elétrico brasileiro, o modelo de leilões. Esse modelo utiliza o menor preço para contratação de projetos de geração de energia elétrica. Porém, até 2008, os projetos eólicos não se apresentavam competitivos em comparação com as outras fontes. Somente a partir de 2009, com a operação de leilões focados para fontes alternativas, que a fonte eólica começou a ser negociada em ambiente

regulado, e somente no ano de 2011, o sistema de energia eólica começou a disputar com as demais fontes convencionais de energia elétrica (CGEE, 2012).

O Brasil possui um considerável potencial eólico, avaliado em 272TWh por ano, segundo especialistas, esse resultado foi obtido através de torres anemométricas instaladas a 50 metros de altura. Este valor é correspondente a uma capacidade instalada de 143 GW. Novas torres de coletas serão instaladas a uma altura de 80 a 100 metros, desse modo com essas novas torres e com ajustes técnicos adequados nas turbinas, fica facilmente demonstrado que a potência de geração eólica pode ser duas ou três vezes superior à de outros métodos convencionais utilizados (TOLMASQUIM, 2012).

Antes de iniciar qualquer etapa na construção de um parque eólico é importante realizar um estudo para identificar o perfil do vento naquela localidade, tendo como base de estudo a velocidade do vento e sua direção. Essa avaliação será feita através da medição da velocidade média e direção do vento, por um período de um ano, terá-se a média anual o que possibilitará verificar o potencial da força do vento. Aí sim, de posse dessas informações o investidor terá dados ao seu dispor para definir o retorno financeiro daquele investimento.

A título de exemplo em 2003, a capacidade de geração de energia eólica dos EUA aumentou em mais de 30%. As usinas eólicas de vários tamanhos já estavam em operação em 32 estados e tinha a capacidade total de geração de 6374 MW de potência, o suficiente para atender às necessidades energéticas de mais de 3 milhões de lares.

Neste contexto o Programa de Tecnologias Eólicas e Hidrelétricas foi um elemento-chave no desenvolvimento de formas mais eficientes para produzir eletricidade através de energia eólica mais barata e competitiva. Esse fato impulsionou o crescimento da energia eólica nos últimos 30 anos, com essa parceria foi possível reduzir o custo de energia eólica em mais de 80%.

Nota-se claramente que as tecnologias de energia eólica percorreram um longo caminho, mas percebe-se que será capaz de alimentar de forma integral residências, comércios, indústrias e até mesmo fazer a alimentação de várias cidades. Pesquisadores e pessoas ligadas a indústria veem isto como uma pequena fração de uma cultura eólica que pode fornecer inicialmente pelo menos 6% da energia no Brasil. Os parques eólicos que já existem até o momento, tem um grande potencial de aproveitar os recursos eólicos em nosso país. Entretanto, nossa nação também desfruta de uma abundância de recursos de baixa velocidade do vento. Sendo assim fica constatado a necessidade de previamente realizar um estudo para definir se o local onde será instalado é “mais fácil e mais econômico instalar o sistema eólico”.

Nessa mesma linha engenheiros e pesquisadores estão trabalhando de forma incansável para ajudar a indústria eólica a desenvolver novas tecnologias que sejam lucrativas

e de baixo custo em ambientes de baixa velocidade do vento. Além de desenvolver tais tecnologias em escala de utilização, o Programa Eólico trabalha para aumentar a eficiência de pequenos sistemas eólicos para serem aplicados em residências, na agricultura e nos comércios.

CAPÍTULO 2

Objetivos

2.1 Objetivos Gerais

O objetivo desse estudo é apresentar uma modelagem matemática e analisar o desempenho do Gerador de Indução Duplamente Alimentado por meio de uma simulação computacional.

2.2 Justificativa

Desde a revolução industrial com o crescimento das indústrias a nível mundial e, com a utilização crescente de combustíveis fósseis que geraram grande poluição ambiental afetando integralmente o meio ambiente, surgiu a necessidade no meio político mundial de tomar decisões no tocante a proteção do meio ambiente.

Neste contexto recentemente os países mais ricos do mundo se reunirão para discutir o aquecimento global e as ações que devem ser tomadas preservar o meio ambiente, tendo como resultado algumas decisões importantes, entre elas melhorar a porcentagem de energia produzida por fontes renováveis. Citamos por exemplo o Protocolo de Kyoto e outras regulamentações importantes que tratam de problemas ambientais e do efeito estufa.

Nessa mesma linha o Parlamento Europeu aprovou o documento 2001/77/CE sobre a "promoção e utilização da energia elétrica produzida por fontes renováveis", prevendo que, antes de 2020, 22% do total de energia energética consumida deveria ser produzida por fontes renováveis.

Neste contexto, cientistas e engenheiros vem dedicando muitos esforços para aumentar a eficiência dos sistemas de geração de energia renovável baseados no vento, sol, hidro e biomassa. A energia eólica atraiu bastante atenção pelo fato de ser uma das tecnologias mais interessantes, especialmente se consideramos a grande evolução e desenvolvimentos

ocorridos na última década.

A geração de energia elétrica produzida pelo vento depende de diferentes fatores, em particular a velocidade do vento e as características do gerador da turbina eólica. A produção de energia eólica é imprevisível, varia com o tempo e depende de diversos fatores externos que pode acabar gerando flutuação nas saídas de energia dos sistemas de conversão de energia eólica. Esta natureza variável de geração de energia requer uma análise mais cuidadosa, pois o projeto e gerenciamento humano do sistema de geração são desenvolvidos com a utilização de vários métodos. Portanto para estudar o comportamento dos geradores eólicos, devemos observar as diferentes soluções técnicas criadas para diferentes casos, para obtermos das turbinas eólicas em uma faixa de 1 kW a 3 MW ou mais, a máxima de sua eficiência e confiabilidade.

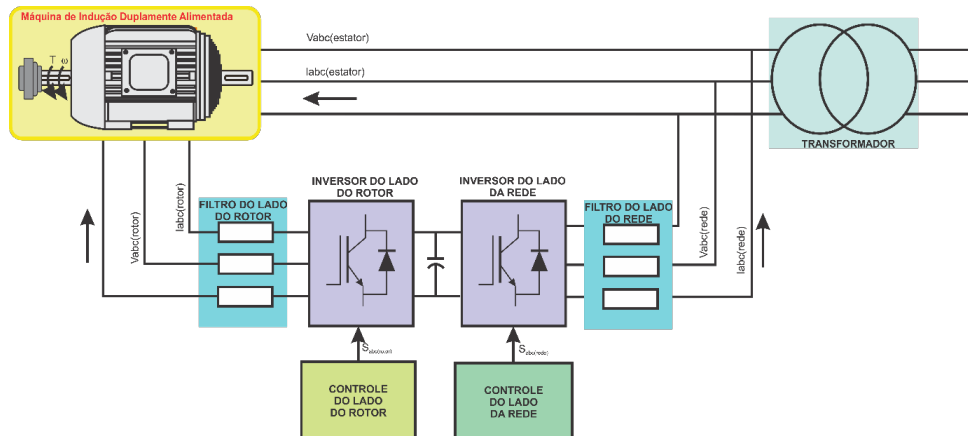
Tradicionalmente a geração de energia eólica tem usado geradores de indução de velocidade fixa que representam uma solução simples e robusta, então as turbinas de velocidade variável têm sido a que possui uma maior geração, por permitir um controle estendido tanto da potência ativa quanto reativa, pois apresenta menos flutuação na potência de saída.

A principal solução adotada para a realização de aerogeradores é a sua divisão, pelo ponto de vista elétrico de acordo com sua potência, podemos dividi-los nas seguintes categorias: gerador de indução padrão com gaiola de esquilo conectado diretamente à rede; gerador de indução de rotor bobinado com resistência variável do rotor; gerador de indução duplamente alimentado; gerador síncrono ou de indução com conversor de potência em tamanho real.

Dessa forma haverá uma espécie de controle sobre o conversor interligado ao gerador, que terá a função de controlar a velocidade do rotor e a potência reativa injetada ou consumida pelo gerador através do estator. Também será interligado e conectado um conversor no lado da rede, que controlará a tensão no barramento CC e a potência ativa que o rotor troca com a rede. A partir disso, será implementado o modelo matemático da máquina no software Matlab/Simulink.

Nota-se, que o torque de partida dos motores de indução é baixo. No caso de um motor de indução com anel deslizante, o torque de partida pode ser aumentado pela adição de resistência externa no circuito do rotor. Mas tem ressalvas, pois não podemos obter alto torque de partida no caso de motor de indução com gaiola de esquilo.

Figura 2.1 – Configuração Geral de uma Máquina de Indução Duplamente Alimentada



Fonte: (ABAD; IWANSKI, 2014)

2.3 Organização do Trabalho

O trabalho está organizado como segue: No capítulo 3 os aspectos construtivos do motor síncrono de relutância é apresentado, seguido da operação da máquina como gerador e os métodos de acionamento e controle da máquina; Em 4 é apresentado uma visão geral sobre o gerador de indução duplamente alimentado, modos de operação, operação com torque positivo e torque negativo; Em 5 é apresentado as principais grandezas da máquina de indução duplamente alimentada; Em 6 é apresentado a modelagem matemática do GIDA e da turbina eólica; Em 7 os resultados obtidos por meio da simulação são obtidos e discutidos; Em 8, o trabalho é concluído.

CAPÍTULO 3

Princípios Introdutórios da Máquina de Indução

3.1 Considerações Iniciais

Este capítulo ocupa-se em apresentar características de projeto, modelos de rotores e a influência das técnicas construtivas no desempenho da máquina e os métodos de acionamento e controle da máquina de indução. E além disso, discorrer sobre o funcionamento da máquina de indução operando como gerador.

3.2 Introdução

As máquinas de indução ou máquinas assíncronas são as máquinas elétricas mais utilizadas comercialmente, principalmente no ambiente industrial. Essas máquinas são conhecidas como máquinas de indução por causa do campo mutuamente acoplado e pelo fato da tensão que é produzida no rotor é induzida ao invés de ser produzida através de um conjunto de fios como nas máquinas CC em que é necessário uma corrente CC para que a máquina comece a operar.

Esse tipo de máquina que não possui partes que se degradam rapidamente o que a torna uma máquina robusta e com baixa exigência de manutenção. Além disso, o seu custo de produção é razoavelmente baixo o que aumenta a sua viabilidade em relação aos demais tipos de máquinas.

Pela sua alta robustez, essa máquina pode ser usada para situações de uso pesado o que possibilita sua aplicação até mesmo nos ambientes mais hostis, como por exemplo, ambientes com poeira, ambientes com presença de umidade, explosivos, etc. (SANTOS, 2013). Todavia, em aplicações em que a velocidade precise variar pode ser necessário a utilização de mais alguns equipamentos/componentes a mais.

Em máquinas de indução o controle de velocidade é mais difícil de ser realizado,

principalmente porque os métodos de controle de velocidade convencionais apresentam baixa eficiência e baixo rendimento. Uma alternativa moderna utilizada para contornar essa desvantagem é a utilização de conversores estáticos que realizam a mudança de velocidade, que além de modificar a tensão permite também alterar a frequência, seja do estator ou do rotor. (FRANCHI, 2009).

3.3 Aspectos Construtivos

A máquina de indução apresenta uma estrutura simples. Ela é composta basicamente de três partes: a carcaça, o estator e o rotor. Sendo o estator a parte imóvel da composição e o rotor a parte que se movimenta.

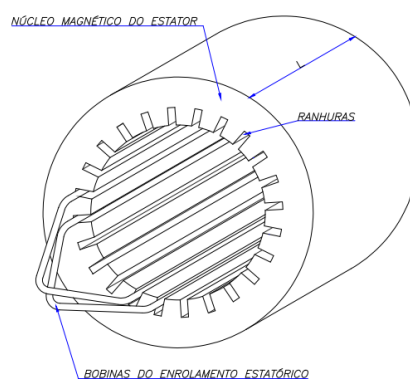
3.3.1 Carcaça

A carcaça é a parte da máquina que serve de sustentação para as demais. Normalmente é construída com ferro fundido, mas também pode ser construída com alumínio. O ferro fundido é um material que apresenta uma boa resistência e baixo preço (SOBRINHO et al., 2008). A carcaça é desenvolvida de forma que haja uma maior superfície de contato com o ar para elevar a dissipação térmica.

3.3.2 Estator

O estator é constituído por uma parte ferromagnética que possui ranhuras distribuídas de forma iguais. A parte ferromagnética é responsável por reduzir as perdas e aumentar o rendimento, enquanto as ranhuras são um excelente meio para transmissão de calor (TEIXEIRA, 2006). É nas ranhuras que são alojadas as bobinas que compõem o enrolamento do estator, assim como é demonstrado na figura 3.1.

Figura 3.1 – Desenho do estator de uma máquina de indução



Fonte: (ABAD; IWANSKI, 2014).

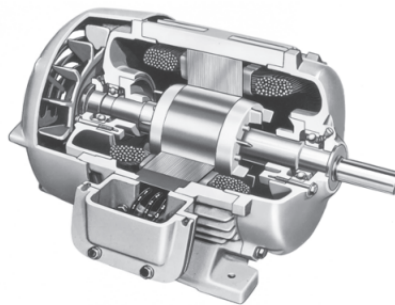
3.3.3 Rotor

Da mesma forma que o estator, o rotor possui uma parte ferromagnética que possui ranhuras com bobinas onde estará o enrolamento do rotor. Porém, há dois tipos de rotores que podem ser colocados no interior do estator da máquina de indução. Um deles é conhecido como rotor gaiola de esquilo e o outro de rotor bobinado ([CHAPMAN, 2013](#)).

No rotor em gaiola de esquilo existe barras condutoras nas ranhuras que promovem um circuito elétrico fechado, o que não permite acesso ao enrolamento rotórico, assim como pode ser observado na figura 3.2. Esse tipo de rotor é conhecido por gaiola de esquilo porque se parece com aquelas rodas em que esquilos correm.

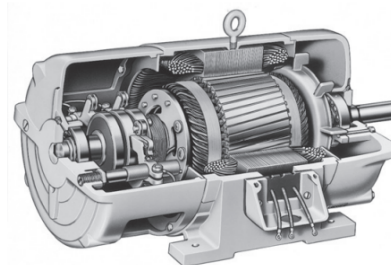
No rotor bobinado tem um núcleo ferromagnético com superfície com ranhuras onde é colocada o enrolamento trifásico parecido com o enrolamento do estator. As bobinas então são conectadas à três anéis e o acesso ao rotor é realizado através dos anéis e das escovas de carvão, assim como é ilustrado na figura 3.3.

Figura 3.2 – Diagrama em corte de um motor de indução típico com rotor gaiola de esquilo.



Fonte: ([CHAPMAN, 2013](#)).

Figura 3.3 – Diagrama em corte de um motor de indução de rotor bobinado.



Fonte: ([CHAPMAN, 2013](#)).

3.4 Operação como Gerador

No momento em que a máquina de indução está trabalhando como gerador, é transmitida à rede elétrica a energia que foi gerada a partir da fonte mecânica. Perdas do

mesmo tipo daquelas que são notadas no funcionamento como motor, como por exemplo, perdas no cobre, perdas magnéticas e as perdas por atrito e ventilação não podem ser identificadas na situação de operação como gerador.

Quando a máquina de indução está em operação, ela provoca o surgimento de correntes em ambos os enrolamentos do estator e rotor, desta forma produz campos magnéticos girantes que exercem influência mutua no entreferro. O campo girante formado a partir das correntes no estator gira na velocidade síncrona. O campo produzido pelo rotor, da mesma forma será girante utilizando o estator como referência, dado o fato que o campo do rotor é resultado do campo produzido pelo estator (CHAPMAN, 2013).

Os campos descritos induzem tensões no estator de frequência igual à de alimentação e produz tensões no rotor com a frequência de escorregamento. É importante destacar que a indução de tensões no rotor, seja ele bobinado ou de gaiola de esquilo, só ocorrerá se a velocidade de rotação for distinta da velocidade síncrona. Senão, não haveria variação no enlace do fluxo e, da mesma forma, indução de tensão no enrolamento das fases do rotor.

A velocidade de rotação ao qual o campo girante está submetido, gerada pelo estator da máquina de indução é dada pela seguinte equação.

$$n_s = 120 \cdot \frac{f_s}{p} \quad (3.1)$$

Onde:

f_s - frequência da rede;

p - número de polos;

n_s - velocidade de rotação do campo girante.

Logo:

$$w_s = \frac{2\pi \cdot n_s}{60} \quad (3.2)$$

Onde: w_s - velocidade do campo girante do estator dado em $[\frac{rd}{s}]$;

Logo:

$$w_r = \frac{2\pi \cdot n_r}{60} \quad (3.3)$$

Onde: w_r - velocidade do campo girante do rotor dado em $[\frac{rd}{s}]$;

Assim, o escorregamento é definido pela equação:

$$s = \frac{(w_s - w_r)}{w_s} \quad (3.4)$$

Sabendo-se que $w'_r = w_s - w_r$, é possível chegar a equação. Onde: w'_r = velocidade de rotação do campo girante do rotor $[\frac{rd}{s}]$.

$$s = \frac{w'_r}{w_s} \quad (3.5)$$

Portanto:

$$f'_r = s \cdot f_s \quad (3.6)$$

Onde: f_s - frequência da tensão do estator

f'_r - frequência induzida do rotor

3.5 Métodos de Acionamento e Controle

O controle avançado de máquinas elétricas requer um controle independente do fluxo magnético e do torque. Por esse motivo, não foi surpreendente que a máquina DC tenha desempenhado um papel importante nos primeiros tempos dos sistemas de acionamento elétrico de alto desempenho, já que o fluxo magnético e o torque são facilmente controlados pelo estator e pela corrente do rotor, respectivamente.

A introdução do controle orientado para o campo significou uma enorme volta no campo dos acionamentos elétricos, visto que com este tipo de controle a robusta máquina de indução pode ser controlada com um alto desempenho. As técnicas de controle podem ser subdivididas em controle escalar, controle vetorial e o controle direto de torque (PAREKH, 2003).

3.5.1 Controle Escalar

A técnica de controle escalar está profundamente relacionada com a aptidão de reduzir os erros em regime permanente e evitar as pequenas mudanças de velocidade dentro de uma determinada atuação da máquina. Essa técnica é utilizada sempre que tiver como objetivo a modificação de grandezas escalares como tensão, corrente ou frequência (SUETAKE; SILVA; GOEDTEL, 2007).

Uma das possibilidades que essa técnica oferece é controlar a velocidade das máquinas de indução, com um fluxo estável, com alta eficiência e com torque máximo sem grandes mudanças. Porém, essa não é uma técnica recomendada para todas as situações, por exemplo, em situações em que é necessária uma resposta mais dinâmica é recomendada a utilização da técnica de controle vetorial (MENDONÇA, 2006).

O principal ponto forte do controle escalar em relação aos demais é a facilidade de implementação, além é claro de seu baixo custo, o que faz dele a melhor opção em aplicações quando não se é necessário um desempenho dinâmico extraordinário.

3.5.2 Controle Vetorial

O controle vetorial surgiu para resolver um obstáculo que até então estava persistindo nas máquinas de indução e que não era um problema na máquina de corrente contínua. Inspirado no motor de corrente contínua esse controle veio para tentar trazer o que havia de melhor que existia que é justamente o seu alto desempenho dinâmico. Ela proporcionou uma série de vantagens à máquina de indução como, por exemplo, o bom controle de velocidade, o controle de torque linear para aplicações de posição e a operação suave.

Nas máquinas de indução existem equações complexas que influenciam umas na outras que dificultam o controle dinâmico da máquina. Então para conquistar um comportamento dinâmico é interessante antes realizar uma simplificação das equações da máquina de indução.

O controle vetorial atua promovendo uma simplificação das equações não lineares e complexas através de uma transformação vetorial que retorna variáveis mais simples e mais fáceis de serem controladas (ARAÚJO et al., 2011).

3.5.3 Controle Direto de Torque (DTC - Direct Torque Control)

Nos anos 80, foi introduzido um novo método de controle para máquinas de indução: o método de controle de torque direto (DTC). A principal diferença entre o controle vetorial e o controle direto é que o DTC vai acionar o inversor a partir das demandas da carga, o que promove o aumento significativamente das mudanças instantâneas de carga.

Essa técnica aplica fundamentos de orientação de campo para o estator e modulação por vetores espaciais, fazendo desse tipo de controle rápido e com alta capacidade de controle de velocidade (GOKHALE; KARRAKER; HEIKKILÄ, 2002).

Entre as vantagens do DTC estão sua simplicidade e a ação no controle do torque, no regime estacionário e no regime transiente. Porém, ele também enfrenta desvantagens como por exemplo dificuldade de controle do torque em situações onde a velocidade de rotação é lenta; não existe falta de controle das correntes; há variação de frequência de comutação e ruído em situações de baixa velocidade. Contudo, nos últimos anos várias soluções vêm sendo apresentadas para melhorar essa técnica de controle.

Teve-se melhorias expressivas como, por exemplo, a implementação de controladores DTC com frequência constante com técnicas PWM e SVM. A operação do controle direto de torque com frequência fixa possibilitou a redução da oscilação de torque e fluxo, aprimorando a eficiência nos momentos iniciais de funcionamento e situações de baixa velocidade.

As constantes frequências de comutação DTC que utiliza a modulação espacial vetorial (DTC-SVM) é uma solução bem discutida; sendo assim a fim de melhorar o desempenho do DTC-SVM, os comparadores de histerese de torque eletromagnético e fluxo do estator foram substituídos por controladores PI.

A lei de controle para acionamento do motor de indução baseada na reconfiguração dinâmica de um algoritmo básico de Controle Direto de Torque (DTC) é associada à Modulação Vetorial Espacial (SVM-DTC) que é ativada para obter a mais excelente dinâmica de torque durante estados transitórios.

O inconveniente do método são as medições incorretas em altas velocidades, de modo que o torque do motor é afetado. O controle direto do torque é projetado com base no controle da separação entre a amplitude e o ângulo do fluxo do estator de referência para diminuir a distorção da corrente em estado estável, minimizando a ondulação de torque eletromagnético e a queda do fluxo estator.

As estratégias para o controle direto do torque (DTC) do motor de indução (IM), no primeiro método é a utilização de um controle de torque direto convencional (C-DTC) onde o torque e o fluxo são regulados pelos controladores de histerese. No segundo caso é feito pelo controle de torque direto por estratégia de modulação vetorial espacial (SVM-DTC), onde o torque e o fluxo são regulados pelos controladores PI (NAVAS; PUMA; FILHO, 2015).

O terceiro é o SVM-DTC fuzzy com controlador de velocidade fuzzy-PI adaptativo, onde o torque e o fluxo são regulados por controladores lógicos fuzzy. Nesse caso a principal característica da estratégia proposta (SVM-DTC) é a redução das ondulações de torque e de fluxo (KUMAR; SARMA; PRASAD, 2016).

CAPÍTULO 4

Gerador de Indução Duplamente Alimentado

4.1 Considerações Iniciais

Este capítulo ocupa-se em apresentar características do GIDA, analisando a sua operação sob velocidade subsíncrona, síncrona e supersíncrona. E além disso, observar a operação com imposição de torque negativo e as condições de imposição de afundamento, elevação e distorção na tensão da rede trifásica da rede.

4.2 Introdução

A energia cinética dos ventos é transformada em energia mecânica por meio das pás ligadas ao eixo, que está diretamente conectada ao rotor do gerador, equipamento que realiza a mudança de energia mecânica em energia elétrica, sendo necessário também para isso um conversor de frequência para que durante as oscilações do vento, as grandezas geradas estejam constantes para conexão à rede de energia elétrica.

Os geradores de energia elétrica com aplicação em usinas eólicas podem ser de vários modelos (assíncronos ou síncronos), e são vários os tipos de geradores assíncronos que são usados em sistemas de conversão de energia eólica: gerador de indução gaiola de esquilo (GIGE), gerador de indução rotor bobinado (GIRB) e o gerador de indução duplamente alimentado (GIDA), sendo este último o modelo a ser estudado ([SALAMEH; KAZDA, 1986](#)).

As vantagens das turbinas eólicas com geradores de indução são a sua construção simples e de baixo custo de implementação. Além disso, não é necessário nenhum dispositivo de sincronização.

A máquina de indução duplamente alimentada possui um aspecto construtivo mais complicado do que a máquina de rotor gaiola de esquilo, pois além do enrolamento trifásico

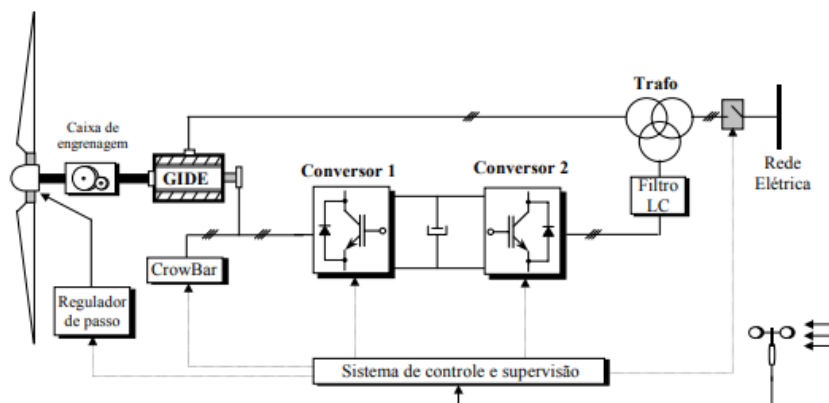
no estator, possui enrolamento trifásico no rotor, nos anéis coletores e no eixo para acesso aos enrolamentos através das escovas de carbono. Logo, o modelo matemático do gerador assíncrono duplamente alimentado é correspondente ao modelo de uma máquina assíncrona com rotor em gaiola de esquilo, com a distinção de ser duplamente alimentado no rotor (JÚNIOR, 2006).

Sendo assim para uma melhor definição na modelagem matemática, é interessante analisar o comportamento do gerador em regime transitório, para tal deve ser utilizado o sistema de transformação de Park, isto é, fazer o uso da estratégia referencial DQ, no qual D faz referência ao eixo direto e o Q se relaciona ao eixo em quadratura da máquina.

Esse tipo de modelagem é muito apropriado para sistemas eólicos, pois, conforme pesquisa realizada, ao ser usada obtém-se uma equivalência ao gerador assíncrono duplamente alimentado com dois conversores estáticos cuja ligação está conectada ao back-to-back com circuito CC ligado no rotor. Entende-se que a rotação da máquina se restringe a uma faixa de 30 a 40% acima e abaixo da rotação síncrona. Por isso, o conversor da máquina terá sua potência dimensionada para a faixa de 30 a 40% acima ou abaixo da potência nominal do gerador.

A máquina de indução duplamente alimentada pode ser vista como uma atuação específica da máquina de indução do rotor bobinado, que possui alimentação independente nos enrolamentos do estator e nos enrolamentos do rotor. Desse modo o arranjo padrão do sistema de geração, valendo-se da máquina de indução de dupla alimentação, tem um aproveitamento da potência de escorregamento, conforme é mostrada na figura 4.1, que demonstra que esse sistema, no caso do estator da máquina está ligado diretamente na rede elétrica. Agora o circuito de rotor é alimentado por dois conversores PWM e por um transformador responsável pela adequação do nível de tensão.

Figura 4.1 – Configuração básica da máquina de indução duplamente alimentada



Fonte: (MARQUES et al., 2004).

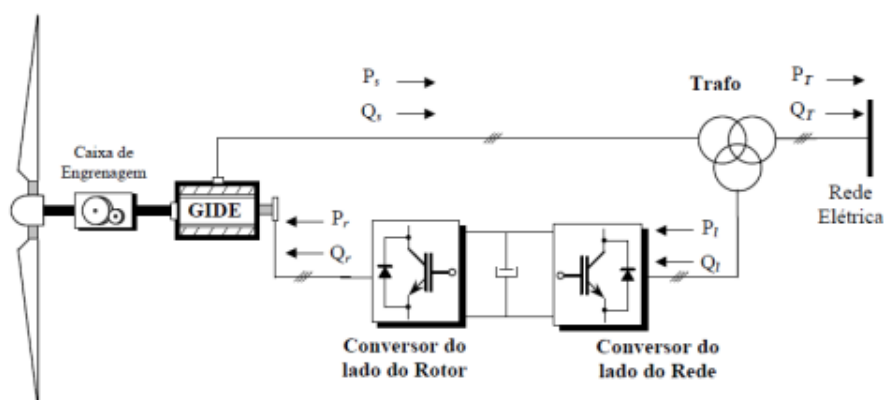
4.3 Modos de Operação

O GIDA para efeitos de funcionamento, ele pode atuar em três pontos de operação, operação subsíncrona, operação síncrona e operação supersíncrona.

4.3.1 Operação Subsíncrona

Nesta situação de operação a velocidade de rotação da máquina é abaixo da velocidade do campo magnético girante. No momento em que a máquina está atuando nessa situação o conversor do lado do rotor trabalha como se fosse um inversor e o conversor do lado da rede como um retificador.

Figura 4.2 – Gerador de indução duplamente alimentado (GIDA) atuando em velocidade subsíncrona



Fonte: (MARQUES et al., 2004).

Dessa maneira no momento em que a máquina está operando nesse modo o rotor consome potência ativa e reativa e o campo girante do gerador vai ser composto pela interação entre a velocidade mecânica do eixo com o campo girante da corrente do rotor (MARQUES, 2004).

Tendo ao final disso uma potência líquida produzida a partir da diferença entre a potência fornecida pelo estator e a consumida pelo rotor.

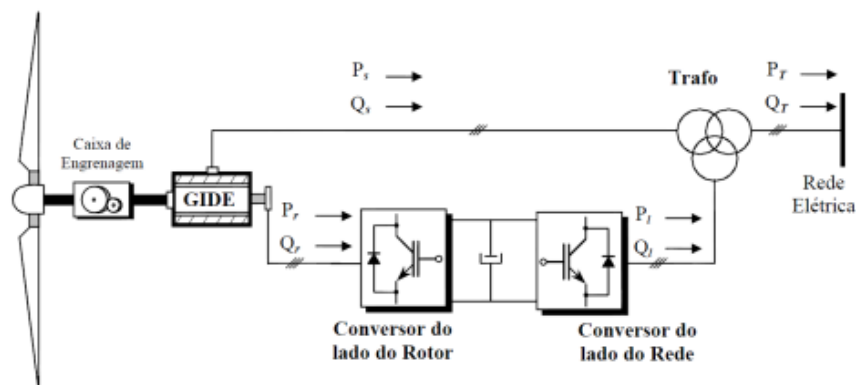
4.3.2 Operação Síncrona

Esse tipo de operação tem como finalidade realizar a sincronização do GIDA com a rede nos primeiros instantes de operação. Ela se inicia fechando a contatora do rotor até que esteja sincronizado com a rede, e depois é acionada a contatora que faz a ligação do estator com a rede.

4.3.3 Operação Supersíncrona

Esta situação de operação pode ser observada no instante em que a velocidade do GIDA é maior do que a do campo magnético girante existente no estator. Nesta situação acontece ao contrário do modo de operação sub-síncrono, nesse caso o conversor do lado do rotor trabalha como retificador e fornece potência ativa e reativa e o conversor do lado da rede como um inversor.

Figura 4.3 – Gerador de indução duplamente alimentado (GIDA) atuando em velocidade supersíncrona



Fonte: (MARQUES et al., 2004).

4.4 Operação com Torque Positivo e Torque Negativo

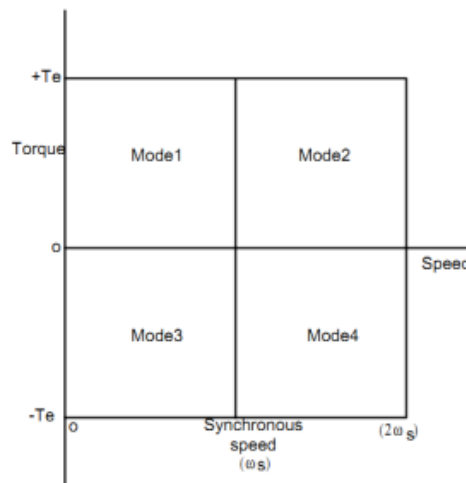
O GIDA apresenta uma grande flexibilidade, em virtude de ser possível trabalhar tanto como motor quanto gerador, a partir dessa premissa é possível operar em quatro modos conforme é representado na figura 4.4.

Entende-se que nos modos de operação 1 e 2 a máquina está funcionando como motor, gerando torque positivo, logo no primeiro modo ele atua no modo subsíncrono, isto é, a velocidade do eixo do rotor está abaixo da velocidade de sincronismo da máquina; agora já no segundo modo de operação, a máquina está com velocidade acima da velocidade síncrona, isto é, a máquina está no modo supersíncrono.

Em contrapartida, nos modos de operação 3 e 4, a máquina está atuando como gerador, portanto a máquina precisa do conjugado mecânico de entrada, por isso que o torque é negativo durante a geração. Cabe ressaltar que existe uma diferença entre as velocidades do eixo e do gerador.

Agora no terceiro modo, a velocidade está no modo subsíncrono, enquanto que, no quarto modo, a velocidade está no modo supersíncrono. Para a geração de energia, o

Figura 4.4 – Modos de operação



Fonte: (LIPO; PANDA; ZARKO, 2005).

gerador trabalha nos modos de operação 3 e 4 (LIPO; PANDA; ZARKO, 2005).

O GIDA é muito mais utilizado para operar como gerador, devido a esse fato os modos de operação 1 e 2 não tem muita relevância para ser utilizados na energia eólica. Contudo, em um sistema ideal, os quatro quadrantes são igualmente relevantes, já que numa situação em que o gerador precise acelerar em um espaço de tempo curto, com o objetivo de atingir a melhor velocidade de operação e ter um rendimento satisfatório, é usado os modos 1 e 2 para acelerar e quebrar a inércia das pás do aerogerador. (LIPO; PANDA; ZARKO, 2005).

4.5 Imposição de Afundamento de Tensão da Rede

O afundamento de tensão é um distúrbio da qualidade de energia elétrico onde ocorre momentaneamente uma diminuição do valor de tensão. Podendo-se ser divididos em três tipos: instantâneo (0,5 – 30 ciclos), momentâneo (0,5 – 3 seg) e temporário (3 seg – 1 minuto).

As principais motivações para a ocorrência do afundamento de tensão está a presença de faltas no sistema e a atuação de disjuntores e religadores (OLIVEIRA, 2016).

4.6 Elevação na Tensão da Rede

A elevação de tensão tem o resultado oposto do afundamento de tensão, no caso ela é um distúrbio onde ocorre momentaneamente um aumento no valor de tensão. Normalmente, a elevação da rede é causada pela saída temporária de cargas, conexão com banco de

capacitores à rede e o incremento de tensão na fase em uma situação em que aconteceu uma falta nas outras fases.

4.7 Distorção na Rede Trifásica

Com o aumento dos parques eólicos é interessante observar o impacto que ele provoca quando é conectado à rede elétrica. Nos GIDA's seu controle back-to-back é fundamentado na atuação dos IGBT's. Essa atuação é feita em uma frequência muito alta o que resulta no aparecimento de uma distorção harmônica.

Para minimizar o surgimento de harmônicos gerados pelo gerador, é utilizados filtros LC para que os ruídos sejam reduzidos, e o sinal injetado na rede elétrica esteja com mais qualidade.

CAPÍTULO 5

Principais Grandezas da Máquina de Indução Duplamente Alimentada

5.1 Considerações Iniciais

Este capítulo ocupa-se em apresentar as principais grandezas do GIDA, discorrendo sobre o escorregamento, rendimento, fator de potência, conjugado e velocidade.

5.2 Velocidade

O modelo de circuito do GIDA foi desenhado a partir da teoria clássica de motores de indução, levando em consideração a máquina com velocidade de rotação do eixo rotor, w_{eixo} , abaixo da velocidade síncrona. Isso fica visível quando se observa o escorregamento, s , que é definido como um atraso da rotação do rotor em relação à rotação do eixo do campo magnético girante no entreferro.

Ao trazermos esse conceito novamente para o GIDA, este poderá trabalhar como gerador, tanto na velocidade subsíncrona quanto na velocidade supersíncrona. Conforme essa definição, no modo subsíncrono o escorregamento será positivo, ao passo que no modo supersíncrono, o escorregamento será negativo ([MARQUES et al., 2004](#)).

5.3 Fator de Potência

A compreensão do fator de potência, FP, é relevante para o entendimento e funcionamento do GIDA. Ele poder ser definido para esta máquina através da equação (5.1), por meio do cosseno do ângulo entre a tensão vista nos terminais do estator, V_s , com

a corrente que percorre pelo estator, I_s .

$$FP = \cos(\theta_{I_s} - \theta_{V_s}) \quad (5.1)$$

O fator de potência no gerador duplamente alimentado pode ser controlado com uma metodologia relativamente barata, de modo que o possibilita trabalhar de maneira semelhante a um gerador síncrono. Isso vai acontecer devido ao fato, de que em cenários de um baixo grau de escorregamento, parte da potência total do GIDA passará através dos enrolamentos do rotor.

Normalmente, o controle de velocidade das turbinas eólicas são feitas com base no controle vetorial por orientação do fluxo do estator, já que este método proporciona a divisão da corrente do rotor do GIDA em componentes de potência ativa e reativa. Por isso, os sistemas de controle de fator de potência são dimensionados de maneira que não desequilibrem o sistema de geração em razão das mudanças transitórias do fator de potência de referência, ou mesmo, devido as oscilações da intensidade do vento, de modo que é necessário forçar a potência reativa ao valor de referência, durante o estado estacionário (BULHÕES; SANTANA, 2014).

5.4 Rendimento

A definição do rendimento do GIDA pode ser entendida através da relação entre a potência de saída e potência de entrada, como representado na equação 5.2.

$$n = \frac{\text{Potência útil de saída}}{\text{Potência de entrada}} = 1 - \frac{\text{Perdas}}{\text{Potência de entrada}} \quad (5.2)$$

5.5 Conjugado

Por meio da f.e.m induzida nos enrolamentos do estator, no momento em que for fornecida a corrente ao sistema no qual o GIDA está conectado, nota-se o surgimento de um conjugado eletromagnético que em busca de equilíbrio vai diretamente ao encontro de conjugado mecânico entregue ao eixo do rotor.

Este conjugado está associado a noção de que, no instante em que a corrente abastece a carga, ela gerará uma onda de fluxo no entreferro, que promoverá um giro na mesma frequência da tensão gerada do GIDA.

Este fluxo vai interagir com o fluxo gerado pela corrente no rotor, promovendo o aparecimento do conjugado eletromagnético que buscará um certo alinhamento entre os dois fluxos magnéticos que vai ficar resistente à rotação do rotor, que associada a máquina

motriz acoplada ao eixo do GIDA produzira um conjugado mecânico de mesmo módulo, que manterá a mesma velocidade de rotação (UMANS, 2014).

$$T_m = \frac{P_{mec}}{w_{eixo}} \quad (5.3)$$

Se desconsiderarmos as perdas mecânicas ocorridas por atrito e pela ventilação da potência da máquina motriz, o conjugado eletromagnético, T_e , será igual ao conjugado mecânico, T_m . Possibilitando deste modo a conservação de energia.

CAPÍTULO 6

Modelagem Matemática do GIDA e da Turbina Eólica

6.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo será feita uma breve abordagem em importantes conceitos da máquina e da turbina utilizada no sistema eólico. Além disso, será apresentada as equações que regem o funcionamento do gerador e da turbina eólica. Por fim, será apresentado sobre os vetores espaciais responsáveis por simplificar algumas expressões.

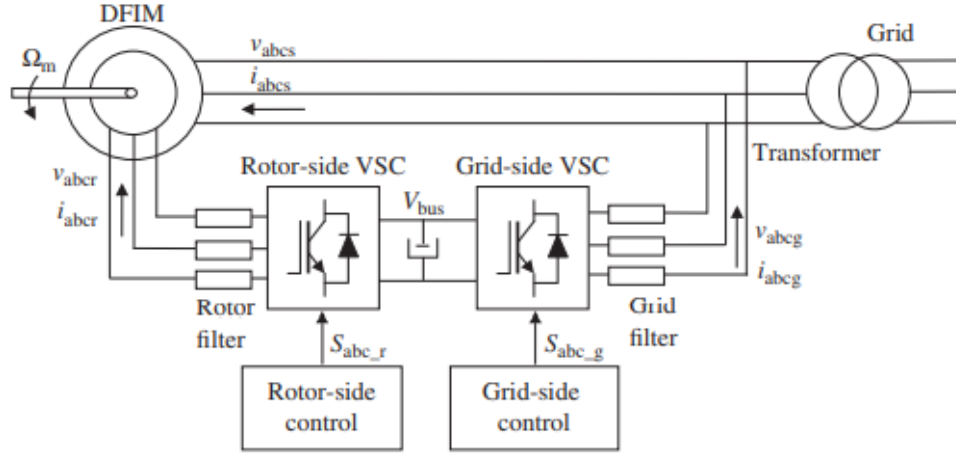
6.2 Aspectos Básicos do GIDA

A configuração típica de alimentação do GIDA é mostrada na Figura 6.1. O estator é alimentado por tensões trifásicas diretamente da rede em amplitude e frequência constantes, criando o campo magnético do estator. O rotor também é alimentado por tensões trifásicas que assumem diferentes amplitudes e frequências em regime permanente para atingir diferentes condições de operação da máquina (velocidade, torque, etc.). Isso é obtido usando um conversor trifásico back-to-back, conforme representado no esquema da figura 6.1.

Este conversor, juntamente com a estratégia de controle apropriada, é responsável por impor as tensões CA do rotor necessárias para controlar o ponto operacional geral do GIDA e realizar a troca de energia através do rotor para a rede. Embora um conversor de fonte de tensão seja mostrado, diferentes configurações ou topologias de conversor podem ser utilizadas (TAVARES, 2017).

As relações entre as diferentes frequências da máquina são aspectos que devem ser conhecidos antes do estudo das equações elétricas do GIDA. Assim, a equação que relaciona w_s (frequência das tensões e correntes do estator), w_r (frequência das tensões e correntes do rotor) e w_m (velocidade elétrica do rotor) é como segue:

Figura 6.1 – Configuração Geral de Alimentação do GIDA



Fonte: (ABU-RUB; MALINOWSKI; AL-HADDAD, 2014)

$$w_s = w_r + w_m \quad (6.1)$$

A relação entre a velocidade mecânica do eixo Ωm e a velocidade elétrica depende dos pares de polos da máquina:

$$w_m = p \cdot \Omega m \quad (6.2)$$

As unidades dessas duas equações são dadas em rad/s. O escorregamento da máquina é definido da seguinte forma:

$$s = \frac{w_s - w_m}{w_s} = \frac{w_r}{w_s} \quad (6.3)$$

As relações anteriores também se mantêm representadas em unidades diferentes, por exemplo, em Hz ou rev/min. Na maioria das aplicações, os enrolamentos do estator são conectados diretamente à rede e, portanto, w_s é constante. Essa frequência também é conhecida como frequência síncrona. No entanto, w_r obviamente depende da velocidade elétrica do eixo w_m , o que leva a três modos de operação da máquina dependentes da velocidade:

$$w_m < w_s \Rightarrow w_r > 0 \Rightarrow s > 0 \Rightarrow \text{Operação Subsíncrona} \quad (6.4)$$

$$w_m > w_s \Rightarrow w_r < 0 \Rightarrow s < 0 \Rightarrow \text{Operação Supersíncrona} \quad (6.5)$$

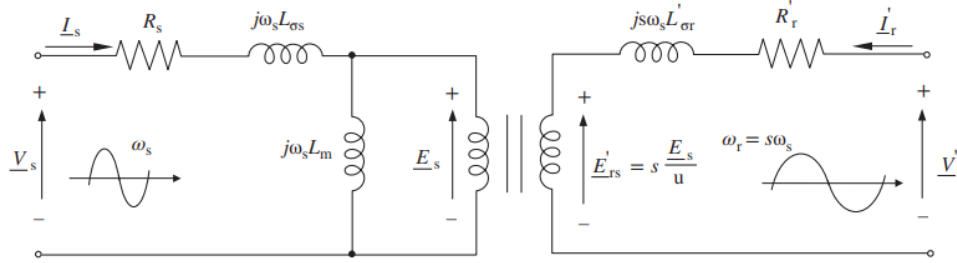
$$w_m = w_s \Rightarrow w_r = 0 \Rightarrow s = 0 \Rightarrow \text{Operação Síncrona} \quad (6.6)$$

Tendo chegado a este ponto, a Figura 6.2 mostra o circuito de estado estacionário equivalente de um GIDA.

É um modelo idealizado no qual apenas uma fase do estator e rotor é representada. Devido à simetria da máquina, as outras duas fases são modeladas de forma semelhante.

Foi assumido que a máquina é simétrica e balanceada em estrutura e que a magnetização é linear.

Figura 6.2 – Circuito Elétrico Equivalente de uma Fase em Regime Permanente



Fonte: (ABU-RUB; MALINOWSKI; AL-HADDAD, 2014)

Como afirmado anteriormente, supõe-se que os enrolamentos do estator são alimentados por tensões trifásicas diretamente da rede, enquanto o rotor também é alimentado por tensões trifásicas, mas independente das tensões do estator. A magnitude elétrica e os parâmetros mais representativos do modelo são os seguintes:

As Magnitudes elétricas do estator e rotor (fasores):

R_s : Resistência do Estator (Ω);

R'_r : Resistência do Rotor (Ω);

L_m : Indutância Mútua (H);

L_s : Indutância de Dispersão do Estator (H);

$L'_{\sigma r}$: Indutância de Dispersão do Rotor (H);

N_s , N_r : Estator, Enrolamentos do Rotor, Número de Voltas por Fase.

A frequência do circuito do estator é ω_s , enquanto a frequência do rotor depende da velocidade de rotação, conforme revelado pela expressão (5.1). As impedâncias de dispersão do estator e rotor são calculadas de acordo com a frequência correspondente do estator e rotor. A relação entre o estator e as voltas do rotor por fase é fornecida pelo coeficiente u :

$$u = \frac{N_s}{N_r} \quad (6.7)$$

Algumas variações construtivas podem afetar este coeficiente, enquanto o estator induzido e a fem do rotor são relacionados por:

$$E'_{rs} = s \cdot \frac{E_s}{u} \quad (6.8)$$

Observe que a relação das amplitudes depende do escorregamento (ou velocidade de rotação), enquanto para o caso particular quando $u=1$ e a máquina está parada ($s=1$), tanto o estator induzido quanto o fem do rotor são iguais.

Em geral, para facilitar a análise, este circuito é modificado para ser equivalente com estator reduzido, referindo-se suas magnitudes com os parâmetros do rotor ao estator, por meio das seguintes equivalências:

$$R_r = R'_r \cdot u^2 \quad (6.9)$$

$$L_{\sigma r} = L'_{\sigma r} \cdot u^2 \quad (6.10)$$

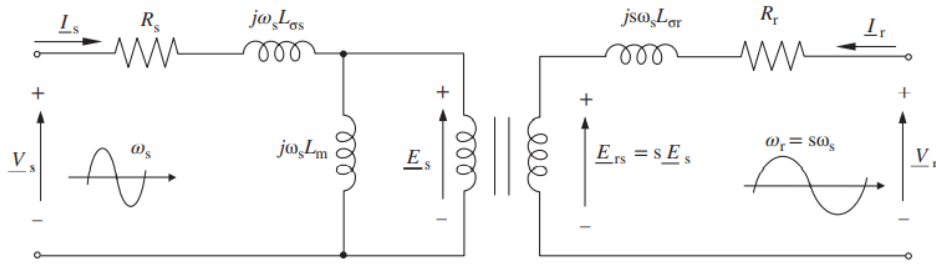
$$L_r = \frac{I'_r}{u} \quad (6.11)$$

$$V_r = V'_r \cdot u \quad (6.12)$$

$$E_{rs} = E'_{rs} \cdot u \quad (6.13)$$

A notação adotada denota magnitudes e parâmetros reais do rotor com o sobrescrito primo ($'$), enquanto os com estator reduzido ficam sem o sobrescrito primo ($'$). Isso nos fornece o equivalente circuito de fase da Figura 6.3.

Figura 6.3 – Circuito elétrico equivalente monofásico do GIDA com parâmetros do rotor, com correntes e tensões reduzidas ao estator



Fonte: (ABU-RUB; MALINOWSKI; AL-HADDAD, 2014).

$$V_r - s \cdot E_s = (R_r + j s_s \cdot L_r) I_r \Rightarrow \frac{V_r}{s} - E_s = \left(\frac{R_r}{s} + j \omega_s L_{\sigma r} \right) I_r \quad (6.14)$$

Portanto, o circuito equivalente final é obtido referindo-se o rotor ao estator, onde todas as magnitudes são da mesma frequência.

As equações elétricas deste circuito de estado estacionário equivalente, incluindo os fluxos do estator e do rotor, são resumidas da seguinte forma

Tensão:

$$V_s = R_s \cdot I_s + j\omega_s \cdot L_{\sigma s} \cdot I_s + j\omega_s \cdot L_m \cdot (I_s + I_r) \quad (6.15)$$

$$\frac{V_r}{s} = \frac{R_r}{s} \cdot I_r + j\omega_s \cdot L_{\sigma r} \cdot I_r + j\omega_s \cdot L_m \cdot (I_s + I_r) \quad (6.16)$$

Fluxo:

$$\psi_s = L_m \cdot (I_s + I_r) + L_{\sigma s} \cdot I_s = L_s \cdot I_s + L_m \cdot I_r \quad (6.17)$$

$$\psi_r = L_m \cdot (I_s + I_r) + L_{\sigma r} \cdot I_r = L_m \cdot I_s + L_r \cdot I_r \quad (6.18)$$

Onde $L_s = L_m + L_{\sigma s}$ sendo a indutância do estator e $L_r = L_m + L_{\sigma r}$ sendo a indutância do rotor. De todas essas equações elétricas, é possível derivar o diagrama fasorial para qualquer condição operacional da máquina.

Logo o balanço de potência ativa básico do GIDA revela que, adotando uma convenção de motor, a adição da potência ativa do estator P_s e da potência ativa do rotor P_r , é igual à potência mecânica no eixo P_m menos as perdas de cobertura no estator e rotor ($P_{cus} = 3 \cdot R_s |I_s|^2$ e $P_{cur} = 3 \cdot R_r |I_r|^2$):

$$P_s + P_r = P_{cus} + P_{cur} + P_m \quad (6.19)$$

Valores positivos de P_s e P_r são interpretados como a potência absorvida pela máquina, enquanto um valor positivo de P_m significa potência mecânica desenvolvida pelo motor através do eixo. Portanto, a eficiência da máquina específica para a operação do motor ou gerador pode ser calculada de acordo com as seguintes fórmulas:

$$n = \frac{P_m}{P_s + P_r} \text{ se } P_m > 0 \quad (6.20)$$

$$n = \frac{P_s + P_r}{P_m} \text{ se } P_m < 0 \quad (6.21)$$

Por outro lado, as potências do estator ativo e do rotor, juntamente com as potências reativas, podem ser calculadas pelas seguintes fórmulas clássicas:

$$P_s = 3\text{Re}(V_s \cdot I_s^*) \quad P_r = 3\text{Re}(V_r \cdot I_r^*) \quad (6.22)$$

$$Q_s = 3\text{Im}(V_s \cdot I_s^*) \quad Q_r = 3\text{Im}(V_r \cdot I_r^*) \quad (6.23)$$

Portanto, ao substituir as equações de tensão do estator e do rotor (6.15) (6.16) nas expressões de potência (6.22) - (6.23), é possível desenvolver expressões de potência mostrando sua dependência dos parâmetros, correntes e escorregamento da máquina:

$$P_s = 3R_s \cdot |I_s|^2 + 3 \cdot \omega_s \cdot L_m \cdot I_m(I_s I_r^*) \quad P_r = 3R_r \cdot |I_r|^2 + 3s\omega_s L_m I_m(I_s I_r^*) \quad (6.24)$$

$$Q_s = 3\omega_s \cdot L_s \cdot |I_s|^2 + 3s\omega_s \cdot L_m \cdot \text{Re}(I_s I_r^*) \quad Q_r = 3s\omega_s \cdot L_r \cdot |I_r|^2 + 3s \cdot \omega_s \cdot L_m \cdot \text{Re}(I_s \cdot I_r^*) \quad (6.25)$$

No entanto, por definição, o torque eletromagnético desenvolvido no eixo é igual a

$$P_{mec} = T_{em} \cdot \Omega_{mec} = T_{em} \cdot \frac{\omega_m}{p} \quad (6.26)$$

Assim, ao substituir nesta expressão, equações equivalentes de potência (6.24) e uma expressão de torque que depende dos parâmetros e correntes da máquina podem ser encontradas:

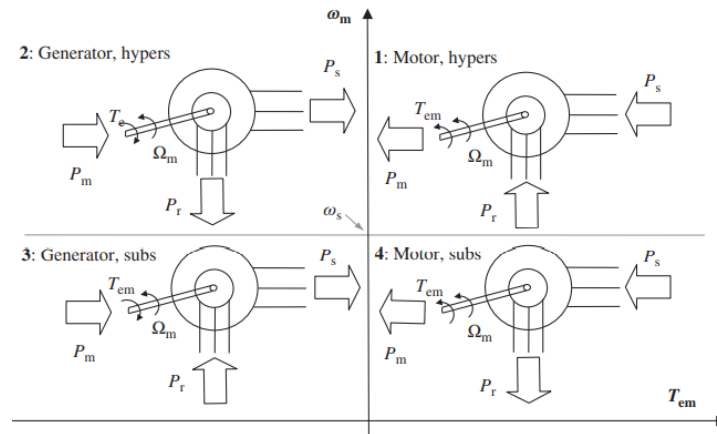
$$T_{em} = 3p \cdot L_m \cdot I_m(I_r^* I_s) \quad (6.27)$$

Outras expressões de torque equivalente podem ser derivadas, se na última expressão, os fluxos são incluídos de acordo com as Equações 6.17 e 6.18:

$$T_{em} = 3p \frac{L_m}{L_s} \cdot I_m(\Psi_s \cdot I_r^*) = 3p \cdot I_m(\Psi_s^* \cdot I_s) = 3p \cdot I_m(\Psi_r \cdot I_r^*) \quad (6.28)$$

$$= 3p \frac{L_m}{L_r} \cdot I_m(\Psi_r^* \cdot I_s) = 3 \cdot \frac{L_m}{\sigma L_r L_s} p I_m(\Psi_r^* \Psi_s) \quad (6.29)$$

Figura 6.4 – Os quatro modos de operação do DFIG atendendo a potência ativa



Fonte: (ABU-RUB; MALINOWSKI; AL-HADDAD, 2014).

Onde $\sigma = \frac{(1-L_m^2)}{L_s \cdot L_r}$. Percebe-se que ao assumir uma tensão do estator constante V_s devido a uma conexão direta à rede, a amplitude necessária da tensão do rotor depende principalmente do escorregamento ou velocidade.

Portanto, é possível distinguir quatro combinações possíveis de torque (positivo ou negativo) e velocidade (subsíncronismo e hipersíncronismo), que conduzem aos quatro modos quadrantes de operação do GIDA, conforme ilustrado na figura 6.4. Note que somente no hipersíncronismo, quando o escorregamento é negativo, as potências ativas do estator e do rotor apresentam um sinal equivalente.

6.3 Modelagem Dinâmica

6.3.1 Modelo $\alpha\beta$

No desenvolvimento do modelo $\alpha\beta$ dinâmico do GIDA, a teoria do vetor espacial é aplicada às equações elétricas básicas da máquina e, novamente, como no modelo de estado estacionário que foi considerado, a máquina é considerada ideal e linear. A Figura 6.5 mostra os três diferentes referenciais rotativos tipicamente utilizados para desenvolver modelos baseados em vetores espaciais do GIDA. O referencial do estator ($\alpha\beta$) é um referencial estacionário, o referencial do rotor (DQ) gira em ω_m e o referencial síncrono (dq) gira em ω_s .

Os subscritos “s”, “r” e “a” são usados para denotar que um vetor espacial é referência ao estator, rotor e referenciais síncronos, respectivamente.

Portanto, as três bobinas do estator e do rotor separadamente, usando a teoria do vetor espacial, podem ser representadas por duas bobinas estacionárias $\alpha\beta$ para o estator e duas bobinas rotativas DQ para o rotor, fornecendo as seguintes equações de tensão:

$$v_s^s = R_s \cdot I_s^s + \frac{d\Psi_s^s}{dt} \quad (6.30)$$

$$v_r^r = R_r \cdot I_r^r + \frac{d\Psi_r^r}{dt} \quad (6.31)$$

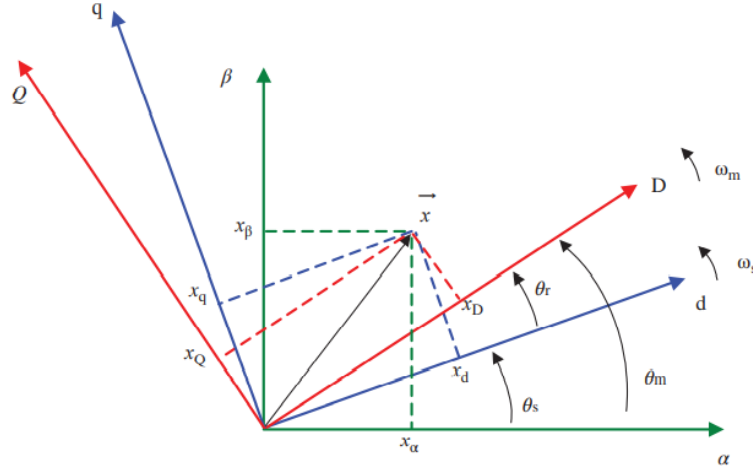
Se ambas as equações de tensão são representadas no referencial estacionário $\alpha\beta$, então a equação do rotor deve ser multiplicada por $e^{j\theta_m}$, o que produz o seguinte conjunto de equações:

$$v_s^s = R_s \cdot I_s^s + \frac{d\Psi_s^s}{dt} \Rightarrow v_{\alpha s} = R_s \cdot i_{\alpha s} + \frac{\Psi_{\alpha s}}{dt} \quad (6.32)$$

$$v_s^s = R_s \cdot I_s^s + \frac{d\Psi_s^s}{dt} \Rightarrow v_{\beta s} = R_s \cdot i_{\beta s} + \frac{\Psi_{\beta s}}{dt} \quad (6.33)$$

$$v_r^s = R_r \cdot I_r^s + \frac{d\Psi_r^s}{dt} - j\omega_m \Psi_r^s \Rightarrow v_{\alpha r} = R_r \cdot i_{\alpha r} + \frac{d\Psi_{\alpha r}}{dt} + \omega_m \cdot \Psi_{\beta r} \quad (6.34)$$

Figura 6.5 – Diferentes quadros de referência para representar vetores espaciais do GIDA



Fonte: (ABU-RUB; MALINOWSKI; AL-HADDAD, 2014).

$$v_r^s = R_r \cdot I_r^s + \frac{d\Psi_r^s}{dt} - j\omega_m \Psi_r^s \Rightarrow v_{\beta r} = R_r \cdot i_{\beta r} + \frac{d\Psi_{\beta r}}{dt} + \omega_m \cdot \Psi_{\alpha r} \quad (6.35)$$

De forma semelhante, é possível derivar as expressões de fluxo do estator e do rotor na forma de vetor espacial em um referencial estacionário:

$$\Psi_s^s = L_s \cdot I_s^s + L_m \cdot I_r^s \Rightarrow \Psi_{\alpha s} = L_s \cdot i_{\alpha s} + L_m \cdot i_{\alpha s} \quad (6.36)$$

$$\Psi_s^s = L_s \cdot I_s^s + L_m \cdot I_r^s \Rightarrow \Psi_{\beta s} = L_s \cdot i_{\beta s} + L_m \cdot i_{\beta s} \quad (6.37)$$

$$\Psi_r^s = L_m \cdot I_s^s + L_r \cdot I_r^s \Rightarrow \Psi_{\alpha r} = L_m \cdot i_{\alpha r} + L_r \cdot i_{\alpha r} \quad (6.38)$$

$$\Psi_r^s = L_m \cdot I_s^s + L_r \cdot I_r^s \Rightarrow \Psi_{\beta r} = L_m \cdot i_{\beta r} + L_r \cdot i_{\beta r} \quad (6.39)$$

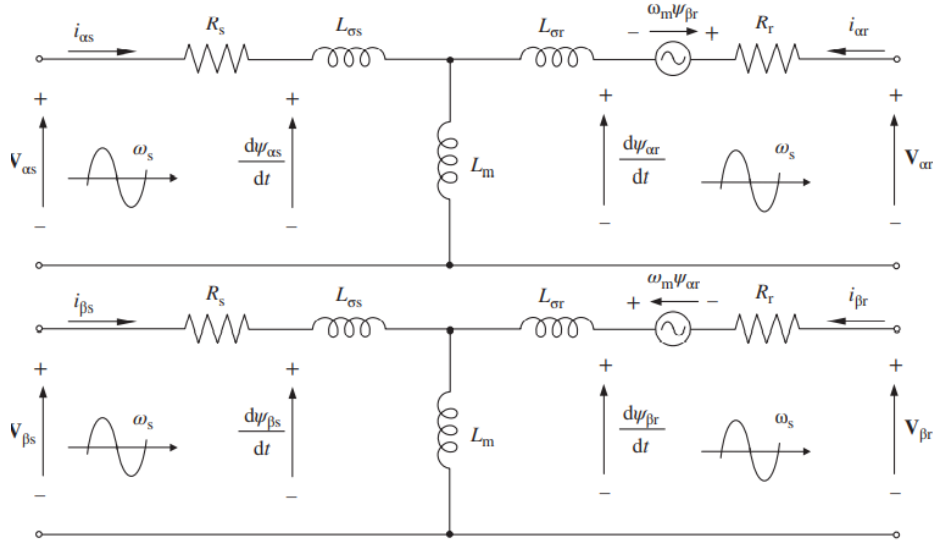
Portanto, a partir do conjunto de equações derivadas, o circuito equivalente $\alpha\beta$ desenvolvido conforme representado na Figura 6.6. Há um circuito equivalente para cada coordenada $\alpha\beta$, em que toda a tensão, corrente e as magnitudes de fluxo são senoidais com uma frequência de ωs . Por outro lado, as potências ativas e reativa dos lados do estator e do rotor podem ser calculadas de acordo com as seguintes equações:

$$P_s = \frac{3}{2} \cdot (v_{\alpha s} i_{\alpha s} + v_{\beta s} i_{\beta s}) \quad P_r = \frac{3}{2} \cdot (v_{\alpha r} \cdot i_{\alpha r} + v_{\beta r} i_{\beta r}) \quad (6.40)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} \cdot (v_{\beta s} i_{\alpha s} - v_{\alpha s} i_{\beta s}) \quad Q_r = \frac{3}{2} \cdot (v_{\beta r} \cdot i_{\alpha r} - v_{\alpha r} i_{\beta r}) \quad (6.41)$$

Já o torque eletromagnético, criado pelo GIDA, pode ser calculado pelas seguintes expressões equivalentes:

$$T_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot I_m (\Psi_r \cdot I_r^*) = \frac{3}{2} p \cdot (\Psi_{\beta r} i_{\alpha r} - \Psi_{\alpha r} i_{\beta r}) \quad (6.42)$$

Figura 6.6 – Modelo do GIDA no modelo $\alpha\beta$ 

Fonte: (ABU-RUB; MALINOWSKI; AL-HADDAD, 2014).

$$T_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \frac{L_m}{L_s} I_m(\Psi_r \cdot I_r^*) = \frac{3}{2} p \cdot I_m(\Psi_s^* \cdot I_s) \quad (6.43)$$

$$= \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_r} p \cdot I_m(\Psi_r^* \cdot I_s) = \frac{3}{2} \frac{L_m}{\sigma L_r L_s} p \cdot I_m(\Psi_s^* \cdot \Psi_s) = \frac{3}{2} L_m p I_m(I_s I_r^*) \quad (6.44)$$

Onde novamente $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$.

Assim, reorganizando as expressões (6.33) - (6.39), podemos desenvolver várias representações em espaço de estados do GIDA, que são úteis, por exemplo, para fins de simulação ou análise. A seguinte expressão mostra um deles em que o vetor de espaço de estado é composto pelos fluxos do estator e do rotor:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_s^s \\ \Psi_r^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{\sigma L_s} & \frac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r} \\ \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} & \frac{-R_r}{\sigma L_r} + j\omega_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_s^s \\ \Psi_r^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_s^s \\ v_r^s \end{bmatrix}$$

Portanto, ao adicionar a equação do movimento mecânico que descreve o comportamento da velocidade do rotor:

$$T_{em} - T_{load} = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (6.45)$$

Com J , a inércia do rotor e T_{load} , o torque de carga aplicado ao eixo, constituímos um modelo.

6.3.2 Modelo DQ

O modelo de vetor espacial do GIDA também pode ser representado em um quadro de rotação síncrona. Para tal, multiplicando as expressões de tensão (5.24) por e^{-js} e e^{-jr} , respectivamente, obtemos as equações de tensão dq:

$$v_s^a = R_s i_s^a + \frac{d(\Psi_s^a)}{dt} + j\omega_s \Psi_s^a \Rightarrow v_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt} - \omega_s \Psi_{qs} \quad (6.46)$$

$$\Rightarrow v_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt} - \omega_s \Psi_{ds} \quad (6.47)$$

$$v_r^a = R_r i_r^a + \frac{d(\Psi_r^a)}{dt} + j\omega_r \Psi_r^a \Rightarrow v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\Psi_{dr}}{dt} - \omega_r \Psi_{qr} \quad (6.48)$$

$$\Rightarrow v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\Psi_{qr}}{dt} - \omega_r \Psi_{dr} \quad (6.49)$$

Da mesma forma, os fluxos produzem:

$$\Psi_s^a = L_s i_s^a + L_m i_r^a \Rightarrow \Psi_d^s = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (6.50)$$

$$\Psi_d^s = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (6.51)$$

$$\Psi_r^a = L_m i_s^a + L_r i_r^a \Rightarrow \Psi_q^s = L_m i_{ds} + L_r i_{dr} \quad (6.52)$$

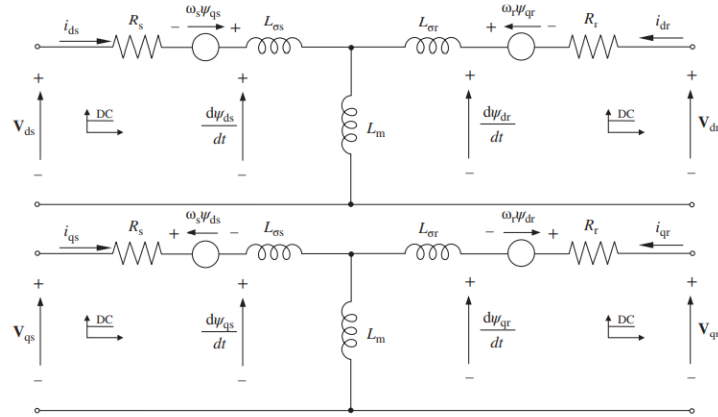
$$\Psi_q^s = L_m i_{ds} + L_r i_{dr} \quad (6.53)$$

Portanto, a partir das equações acima, o circuito elétrico equivalente em dq é obtido, conforme ilustrado na Figura 6.7. No entanto, esta representação do modelo $\alpha\beta$ com expressões equivalentes de potência e torque como no modelo $\alpha\beta$, bem como o modelo de simulação baseado em computador, pode ser desenvolvida mais adiante.

A seguir será descrito o controle do GIDA. É necessário distinguir dois cenários diferentes: a operação de conexão à rede e a operação autônoma. Dentre os diferentes métodos alternativos de controle que foram desenvolvidos para o GIDA, a técnica de controle vetorial é a principal nesta seção, ela é a mais estudada e estabelecida.

Para uma compreensão mais fácil, o controle é descrito em diferentes etapas: primeiro, estudando os loops de controle atuais. Depois disso, algumas análises de estado estacionário interessantes são desenvolvidas antes de finalmente descrever o controle em uma tensão de rede desequilibrada.

Figura 6.7 – Modelo GIDA no modelo DQ



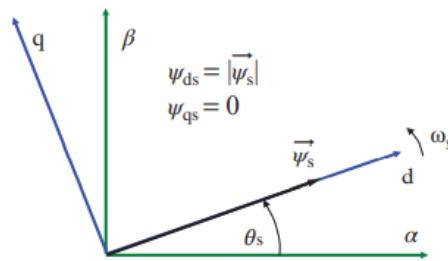
Fonte: (ABU-RUB; MALINOWSKI; AL-HADDAD, 2014).

De forma equivalente às técnicas clássicas de controle vetorial de outras máquinas diferentes, o controle vetorial do GIDA é realizado em um quadro dq rotativo síncrono, no qual o eixo d está alinhado, neste caso, com o vetor de espaço de fluxo do estator, conforme ilustrado na Figura 6.8. Devido a esta escolha de alinhamento, será mostrado posteriormente que a corrente direta do rotor é proporcional à potência reativa do estator, e que a corrente do rotor em quadratura é proporcional ao torque ou potência ativa do estator. Portanto, a partir do modelo do GIDA em um referencial síncrono, substituindo as Equações 6.51 e 6.53 na equação da tensão do rotor (6.49), obtemos a tensão do rotor em função das correntes do rotor e do fluxo do estator (nota que $\Psi_{qs} = 0$):

$$v_{dr} = R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{di_{dr}}{dt} - \omega_r \sigma L_r i_{qr} + \frac{L_m}{L_s} \frac{d|\Psi_s|}{dt} \quad (6.54)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{di_{qr}}{dt} - \omega_r \sigma L_r i_{dr} + \frac{L_m}{L_s} \frac{d|\Psi_s|}{dt} \quad (6.55)$$

Figura 6.8 – Quadro de Referência DQ Rotativo Síncrono Alinhado com o Vetor de Espaço de Fluxo de Estator



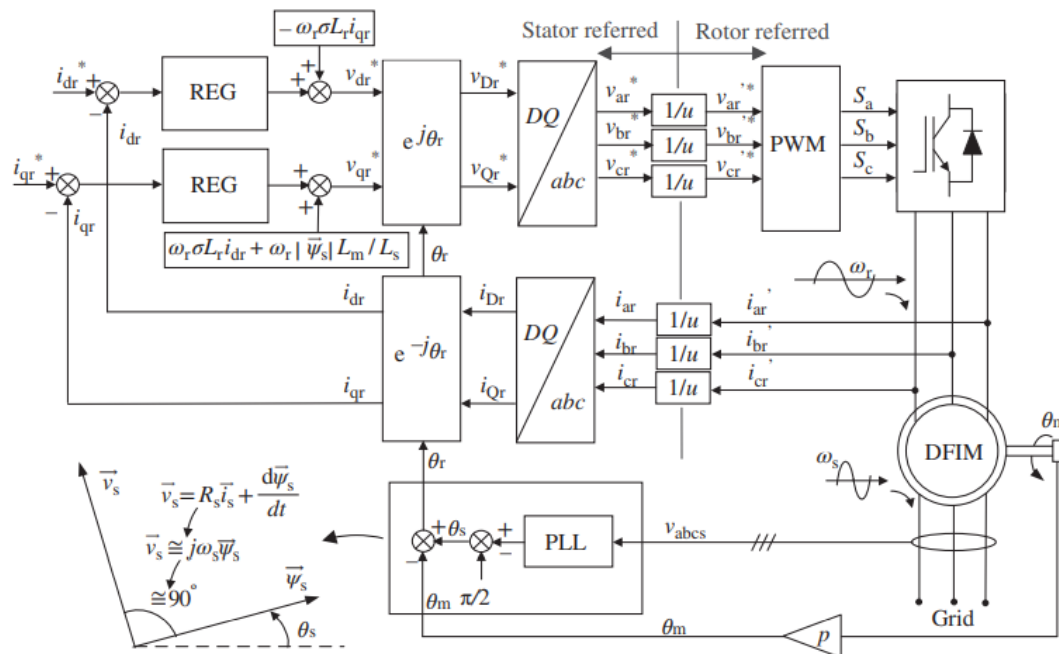
Fonte: (ABU-RUB; MALINOWSKI; AL-HADDAD, 2014).

Da Equação (6.29), por exemplo, supondo que a queda de tensão na resistência do estator é pequena, o fluxo do estator é constante porque o estator está conectado

diretamente à rede em tensão CA constante; consequentemente, o termo $\frac{d|\Psi_s|}{dt}$ é zero. Essas duas últimas equações revelam que é possível realizar o controle das correntes dq do rotor, simplesmente utilizando um regulador para cada componente da corrente, conforme mostrado na Figura 6.9 .

Os termos cruzados da Equação (6.55) podem ser incluídos na saída de cada regulador para auxiliar o regulador. Observe que o fluxo do estator e ωr devem ser estimados para esse propósito; no entanto, isso é simples e não adiciona dificuldades extras. Para a transformação do referencial, o ângulo θ_r deve ser estimado. O controle deve ser realizado em coordenadas dq, mas então a tensão e as correntes do rotor devem ser transformadas em coordenadas DQ.

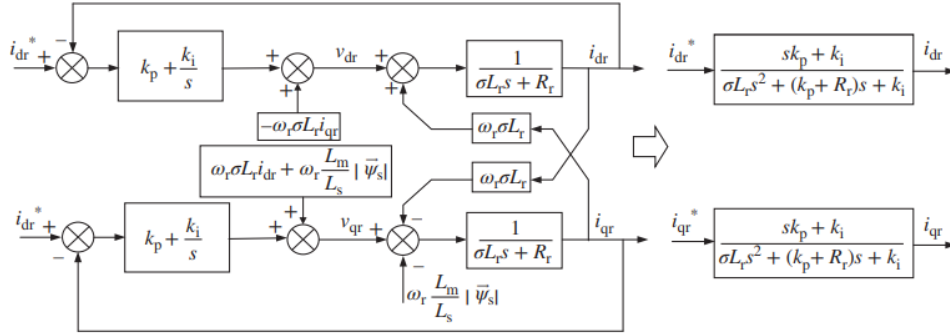
Figura 6.9 – Malhas de controle de corrente do DFIG



Fonte: (ABU-RUB; MALINOWSKI; AL-HADDAD, 2014).

Primeiramente, é possível obter o ângulo do vetor espacial da tensão do estator, depois subtrair 90° desse ângulo estimado e, assim, obter θ_s . Um simples loop de fase bloqueada (PLL) pode ser usado para realizar a sincronização da rede de tensão do estator, proporcionando robustez para a estimativa e rejeição de pequenos distúrbios ou harmônicos. Nas seções subsequentes, detalhes adicionais são fornecidos sobre como as referências atuais são geradas. Observe que se o GIDA empregado apresentar uma relação de espiras diferente no estator e no rotor, deve ser considerado no estágio de controle. No diagrama de blocos de controle apresentado na Figura 6.9, os loops de corrente trabalham com as correntes do rotor referidas ao lado do estator, enquanto a conversão para as grandezas referidas ao rotor é realizada no estágio de medição para as correntes e antes da criação dos pulsos

Figura 6.10 – Sistema Equivalente de Segunda Ordem de Controle de Corrente em Malha Fechada com Reguladores PI



Fonte: (ABU-RUB; MALINOWSKI; AL-HADDAD, 2014).

para o conversor para as tensões.

No entanto, a Figura 6.10 mostra que ao escolher reguladores integrais proporcionais iguais (PI) para ambos os loops, empregando compensação dos termos cruzados e negligenciando o efeito do conversor da fonte de tensão e os possíveis atrasos no cálculo ou medições, o equivalente fechado os sistemas de loop de ambos os loops de corrente são iguais a um sistema de segunda ordem com dois polos e um zero que pode ser colocado pela teoria de controle clássica escolhendo os ganhos apropriados dos reguladores PI.

6.3.3 Loops de Controle de Potência e Velocidade

Uma vez que os loops de controle de corrente e o cálculo do ângulo de fluxo tenham sido estudados, o sistema de controle completo pode ser introduzido. Como o eixo d do quadro de referência está alinhado com o vetor de espaço de fluxo do estator, a expressão de torque no quadro dq pode ser simplificada da seguinte forma:

$$T_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \frac{L_m}{L_s} (\Psi_{qs} i_{dr} - \Psi_{ds} i_{qr}) \Rightarrow T_{em} = -\frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} |\Psi_s| i_{qr} \Rightarrow T_{em} = K_t i_{qr} \quad (6.56)$$

Isso significa que o componente q da corrente do rotor é proporcional ao torque, ou seja, com i_{qr} é possível controlar o torque e, conseqüentemente, a velocidade da máquina se a aplicação assim exigir. De forma semelhante, desenvolvendo a expressão da potência reativa do estator no quadro dq, obtemos uma expressão compacta, que revela que i_{dr} é controla Q_s .

$$Q_s = \frac{3}{2} (v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs}) \Rightarrow Q_s = -\frac{3}{2} \omega_s \frac{L_m}{L_s} |\Psi_s| (i_{dr} - \frac{|\Psi_s|}{L_m}) \Rightarrow Q_s = K_q (i_{dr} - \frac{|\Psi_s|}{L_m}) \quad (6.57)$$

Portanto, devido à orientação escolhida, pode-se observar que ambos os componentes da corrente do rotor, de forma independente, nos permitem controlar o torque e a potência reativa do estator. Mantendo as malhas de corrente estudadas nas seções anteriores (Figura 6.9), uma malha de velocidade e uma malha de potência reativa do estator foram adicionadas. A necessidade da regulação de velocidade depende da aplicação em que esta máquina está sendo utilizada, podendo acontecer que o GIDA simplesmente imponha um torque eletromagnético, enquanto a velocidade do eixo é controlada por outros elementos.

Porém, com o loop Q_s , é possível controlar a magnetização da máquina. Conforme discutido anteriormente, como o estator da máquina está conectado diretamente à rede, a amplitude do fluxo do estator é constante e fornecida pela tensão da rede: $|\Psi_s| = \frac{|v_s|}{\omega_s}$, portanto, as equações de fluxo do estator revelam que:

$$|\Psi_s| = \Psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad \Psi_{qs} = 0 = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (6.58)$$

O nível de fluxo do estator $|\Psi_s|$ deve ser criado escolhendo i_{ds} e i_{dr} , distribuindo assim a quantidade necessária de corrente entre o rotor e o estator. Observe que i_{qs} e i_{qr} são definidos pelo torque e, portanto, não há possibilidade de escolha; entretanto, dependendo do conjunto de Q_s , é possível trocar correntes maiores ou menores do estator e do rotor. Como exemplo, em aplicações de geração de energia eólica, diferentes valores de Q_s podem ser exigidos dependendo dos requisitos dos códigos de rede e, portanto, em tal caso, a referência de Q_s seria definida diretamente pelo operador do sistema de rede.

Por outro lado, como feito com os loops de corrente, a Figura 6.11 mostra os sistemas de loop fechado equivalentes dos loops Q_s e ω_m , assumindo que os loops de corrente foram ajustados muito mais rápido do que os loops externos e negligenciando a dinâmica do conversor ou medição e computação atrasados.

Pode-se ver que os sistemas simplificados de malha fechada geram um sistema de primeira e segunda ordem que pode ser ajustado escolhendo os ganhos apropriados dos reguladores PI. Alternativamente, se a aplicação permitir, é normal definir a corrente i_{dr} do rotor para zero (eliminando a malha Q_s), minimizando a corrente necessária do rotor e salvando o dimensionamento do projeto dos enrolamentos do rotor e do conversor do lado do rotor. Obviamente, isso é obtido por meio do aumento do dimensionamento do enrolamento do estator.

Finalmente, a Figura 6.12 mostra as magnitudes mais representativas de um GIDA controlado por vetor, operando em torque constante em modo motor em velocidade variável. A tensão do estator é mantida constante devido à conexão direta à rede, enquanto as correntes do estator também são constantes porque T_{em} e Q_s são mantidos constantes. A rampa de velocidade realizada no meio do experimento provoca a variação da tensão e das correntes do rotor, o que resulta em uma variação das potências ativa e reativa do rotor.

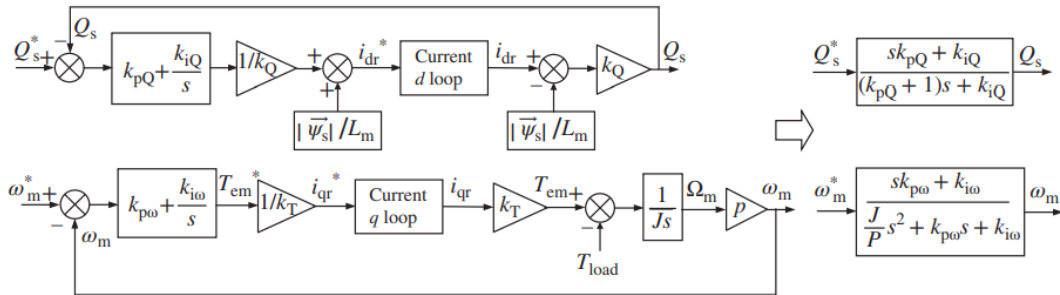
6.3.4 Análise de Estado Estacionário

Nas seções anteriores, vimos que o modelo do GIDA expresso no quadro dq é útil para o desenvolvimento da estratégia de controle vetorial orientada para o fluxo do estator. Nesta seção, o modelo dq do GIDA é explorado posteriormente para calcular as magnitudes mais interessantes da máquina em um estado estacionário.

Assim, supondo que por meio do controle o GIDA será obrigado a operar nas demandas, a saber, w_m e Q_s , a tarefa consiste em deduzir as magnitudes elétricas restantes da máquina em operação em regime permanente, como correntes de estator e rotor, potências e escorregamento. Esta análise pode ser útil, por exemplo, para deduzir a melhor estratégia de magnetização em termos de eficiência e calcular a corrente do rotor necessária em um dado ponto de operação para dimensionar o conversor eletrônico de potência.

Portanto, em primeiro lugar, é necessário calcular a amplitude do fluxo do estator da máquina. Ao assumir um estado estacionário e um alinhamento do fluxo do estator com o eixo d, é possível obter o seguinte conjunto de cinco equações. A partir dessas cinco equações exatas, é fácil calcular o fluxo do estator:

Figura 6.11 – Sistema de Malha Fechada Q_s e W_m (T_{load} considerado a zero)



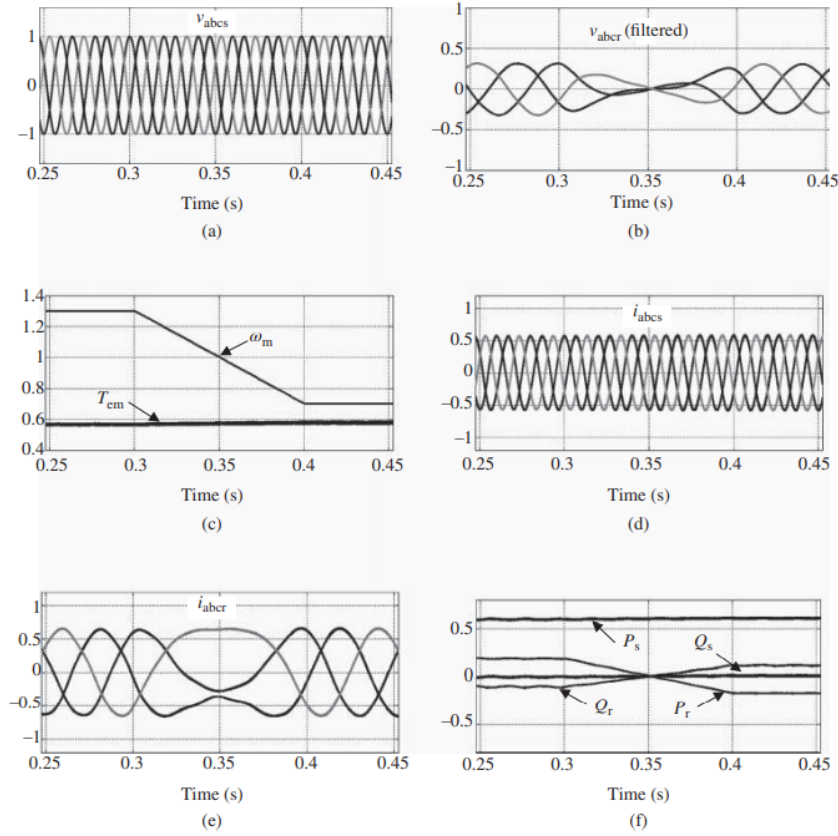
Fonte: (ABU-RUB; MALINOWSKI; AL-HADDAD, 2014).

Observe que apenas os parâmetros da máquina, juntamente com a tensão do estator, o torque e a potência reativa do estator, são necessários. Assim, uma vez obtido o fluxo, as magnitudes restantes podem ser calculadas a partir das equações apresentadas nas seções anteriores.

De forma alternativa, se em vez da referência $Q_s i_{dr} = 0$ for imposta, minimizando a corrente do rotor, o procedimento de cálculo de estado estacionário é ligeiramente modificado:

$$\begin{aligned}
 v_{ds} &= R_s \cdot i_{ds} & |\Psi_s| &= \sqrt{\frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}} \\
 v_{qs} &= R_s \cdot i_{qs} + \omega |\Psi_s| & A &= \omega_s^2 \\
 Q_s &= \frac{3}{2} \omega_s |\Psi_s| i_{ds} & B &= \frac{4}{3} R_s T_{em} \omega_s - |V_s|^2 \\
 T_{em} &= \frac{3}{2} p |\Psi_s| i_{qs} & C &= \left[\frac{2}{3} \frac{R_s}{L_m} \right]^2 \left[\left(\frac{Q_s}{\omega_s} \right)^2 + \left(\frac{T_{em}}{p} \right)^2 \right]
 \end{aligned}$$

Figura 6.12 – Magnitudes mais representativas do GIDA multi-megawatt em torque constante na operação do motor com velocidade variável



Fonte: (ABU-RUB; MALINOWSKI; AL-HADDAD, 2014).

$$|v_s|^2 = v_{ds}^2 + v_{qs}^2$$

6.3.5 Restrições de Corrente e Tensão

Esta seção calcula as curvas de capacidade máxima da máquina considerando os limites físicos de tensão e corrente que não podem ser aumentados. Portanto, para o GIDA, a tensão e as correntes do estator e do rotor devem estar em todos os pontos de operação, ser menores ou iguais aos limites estabelecidos, ou seja,

$$V_{smax}^2 > v_{ds}^2 + v_{qs}^2 \quad V_{rmax}^2 > v_{dr}^2 + v_{qr}^2 \quad I_{smax}^2 > i_{ds}^2 + i_{qs}^2 \quad I_{rmax}^2 > i_{dr}^2 + i_{qr}^2$$

Observe que esses limites podem ser estabelecidos pela própria máquina, pelo conversor ou pelas condições de conexão à rede. Como o estator da máquina está conectado diretamente à rede, não podemos modificar a tensão do estator e, portanto, esta variável é excluída da análise. Para a tensão do rotor, se avaliarmos a expressão (6.55) em um estado estacionário, desprezando a queda de tensão da resistência do rotor:

$$v_{dr} = -\omega_r \sigma L_r i_{qr}$$

$$\begin{aligned}
v_{qr} &= \omega_r (\sigma L_r i_{dr} + \frac{L_m}{L_s} |\Psi_s|) \\
\Rightarrow V_{rmax}^2 &> (\omega_r \sigma L_r i_{qr})^2 + \omega_r^2 (\sigma L_r i_{qr})^2 + \omega_r^2 (\sigma L_r i_{dr} + \frac{L_m |\Psi_s|}{L_s}) \\
\Rightarrow V_{rmax}^2 &> (\omega_r \sigma L_r i_{qr})^2 + \omega_r^2 (\sigma L_r i_{qr})^2 + \omega_r^2 (\sigma L_r i_{dr} + \frac{L_m |\Psi_s|}{L_s}) \quad (6.59)
\end{aligned}$$

Vê-se que a restrição de tensão do rotor é determinada por círculos no plano i_{dr} , i_{qr} , com raio $\frac{V_{rmax}}{(\omega_r \sigma L_r)}$ e centrado no ponto $\frac{-(L_m |\Psi_s|)}{\sigma L_r \cdot L_s}$. Observe que dependendo do ponto de operação da máquina, mais especificamente dependendo de ω_r , o raio da restrição de tensão mudará. De forma mais simples, considerando a restrição da corrente do rotor, é simples que ele determine círculos centrados na origem do plano e com raio I_{rmax} . Finalmente, para as restrições de corrente do estator, é necessário considerar a expressão (6.51), que produz

$$\begin{aligned}
i_{ds} &= \frac{|\omega_s|}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} \cdot i_{dr} \quad i_{qs} = -\frac{L_m}{L_s} \cdot i_{qr} \\
\Rightarrow I_{smax}^2 &= \left(\frac{|\Psi_s|}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} \cdot I_{dr} \right)^2 + \left(\frac{L_m}{L_s} i_{qr} \right)^2 \Rightarrow \left(I_{smax} \frac{L_s}{L_m} \right)^2 = \left(\frac{\Psi_s}{L_m} - i_{dr} \right)^2 + (i_{qr})^2 \quad (6.60)
\end{aligned}$$

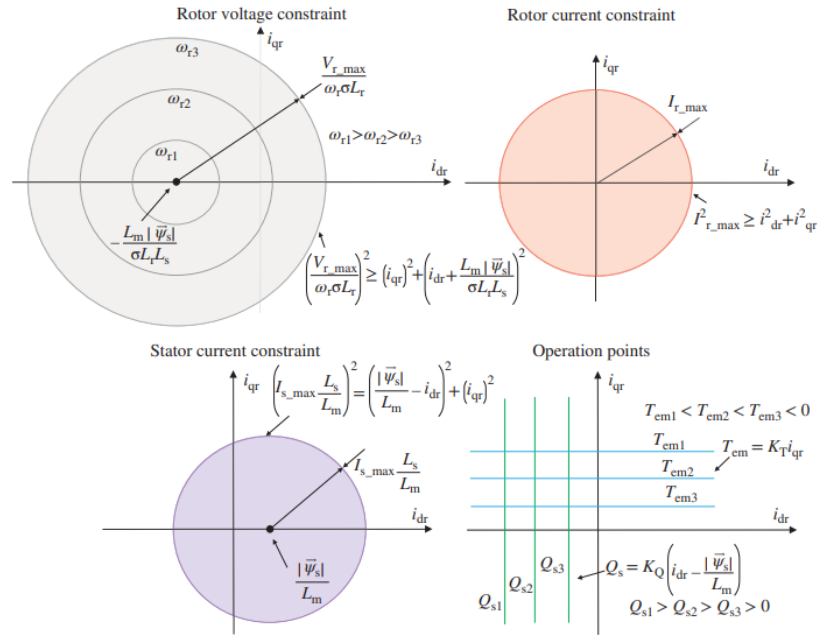
Isso também determina os círculos com raio $I_{smax} \cdot \frac{L_s}{L_m}$ e centralizado no ponto $\frac{\Psi_s}{L_m}$. Por outro lado, por meio das expressões (6.56) e (6.57), o torque é proporcional a i_{qr} , enquanto a potência reativa do estator é proporcional a i_{dr} ; isso significa que no plano, ambas as variáveis são determinadas por linhas retas.

Esse fato é mostrado graficamente, juntamente com as curvas do círculo limite na Figura 6.13. Ao estudar essas curvas, é possível determinar se o ponto operacional desejado da máquina é alcançável.

Assim, a figura 6.14 mostra dois exemplos operacionais de um GIDA multi megawatt nos quais os limites das correntes do estator e do rotor (referidos ao estator) são iguais. Em relação à situação 1, podemos dizer que como o ponto de operação necessário estabelece um pequeno ω_r , a restrição de tensão do rotor não está limitando o ponto de operação. Nessa velocidade, os torques alcançáveis e as potências reativas estão dentro da área sombreada. Pode-se observar que o torque máximo em modo gerador é alcançado no ponto A1. O ponto B1 mostra um ponto operacional específico possível. Se quisermos modificar Q_s para valores mais positivos ou mais negativos, precisamos nos mover pelas curvas A1C1 e A1D1, respectivamente, diminuindo a capacidade de torque no modo gerador. Porém, os pontos C1 e D1 são os limites nos quais toda a corrente é dedicada para potência reativa e, portanto, nenhum torque pode ser criado.

Na situação 2, notamos que com o maior ω_r necessário, a restrição de tensão do rotor agora tem efeito. Nessa velocidade, os torques alcançáveis e as potências reativas estão dentro da área sombreada (menor do que no caso anterior). O torque máximo no

Figura 6.13 – Círculos de Limite de Tensão e Corrente Juntamente com Linhas Constantes Q_s e T_{em} Constantes (somente $Q_s > 0$ e $T_{em} < 0$ mostrado)



Fonte: (ABU-RUB; MALINOWSKI; AL-HADDAD, 2014).

Figura 6.14 – Dois exemplos de pontos de operação baixo (1) e alto (2)

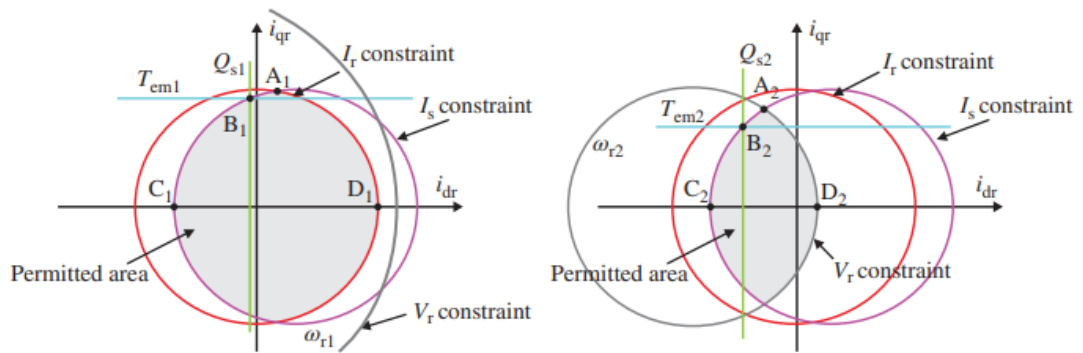


Figure 10.19 Two examples of operating points at low (1) and high (2) ω_r

Fonte: (ABU-RUB; MALINOWSKI; AL-HADDAD, 2014).

modo gerador é alcançado no ponto A2, que é menor que A1. O ponto B2 mostra um possível ponto operacional específico. Como antes, movendo-se pelas curvas A2C2 e A2D2, respectivamente, podemos alcançar diferentes valores de Q_s com os limites C2, que é igual a C1, e D2, que é menor que D1.

6.4 Sistemas de Conversão de Energia Eólica Baseados em GIDA

6.4.1 Aerodinâmica da Turbina Eólica

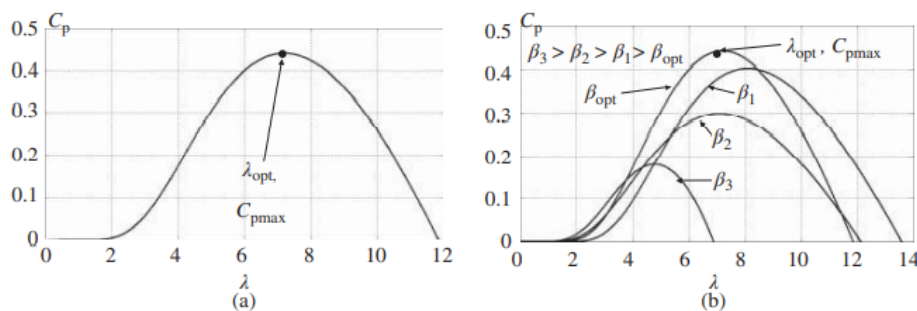
Esta seção analisa as questões mais importantes das turbinas eólicas de velocidade variável com regulagem de pitch baseadas em GIDA. Nesse tipo de aerogerador moderno, a energia do vento é captada mecanicamente pelas pás, depois é convertida em energia elétrica pelo GIDA e, por fim, essa energia é enviada para a rede elétrica. A teoria do momento é usada para estudar o comportamento da turbina eólica. Sob certas suposições ideais, a turbina eólica pode recuperar a energia do vento dada pela expressão:

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot \sigma \pi R^2 V_w^3 C_p \quad (6.61)$$

Onde σ é a densidade do ar, R é o raio das pás da turbina eólica, V_w é a velocidade do vento e C_p é o coeficiente de potência; um parâmetro adimensional que expressa a eficácia da turbina eólica na transformação da energia cinética do vento em energia mecânica. Para uma dada turbina eólica, este coeficiente é uma função da velocidade do vento, da velocidade de rotação da turbina eólica Ω_t e do ângulo de inclinação β . C_p é muitas vezes dado como uma função da taxa de velocidade da ponta λ , que é definida por:

$$C_p = f(\lambda, \beta) \quad \text{com} \quad \lambda = \left[\frac{R\Omega_t}{V_w} \right] \quad (6.62)$$

Figura 6.15 – Coeficiente C_p de uma Turbina Eólica de Três Pás



Fonte: (ABU-RUB; MALINOWSKI; AL-HADDAD, 2014).

O valor máximo teórico de C_p é dado pelo limite de Betz: $C_{p-theo-max} = 0,593$. A Figura 6.15 mostra graficamente um exemplo de curvas C_p .

6.4.2 Zonas de Controle da Turbina

Partindo do pressuposto de um acoplamento mecânico ideal e desprezando as possíveis perdas do redutor, localizado entre o rotor da turbina e os GIDAs, a energia gerada pelo aerogerador P_t é transmitida totalmente para o eixo do GIDA; assim, $P_m = P_t$. Portanto, avaliando as expressões (6.61) e (6.62) para diferentes velocidades do vento e diferentes velocidades de rotação da turbina eólica (a inclinação é mantida constante em sua posição ideal β_{opt}), a potência captada do vento pode ser representada em três espaços dimensionais, conforme ilustrado na Figura 6.16. Este é um exemplo representativo de uma turbina eólica de vários megawatts para a qual um raio R específico foi selecionado.

Pode-se observar que a cada velocidade constante do vento, a curva apresenta um ponto máximo de potência gerada em uma determinada velocidade de rotação. Esta propriedade das turbinas eólicas é explorada por meio do controle de velocidade variável, que sempre tenta escolher a velocidade de rotação adequada em uma dada velocidade do vento, a fim de capturar a potência máxima disponível do vento. Porém, na Figura 6.16, os pontos em que a turbina eólica opera também são mostrados.

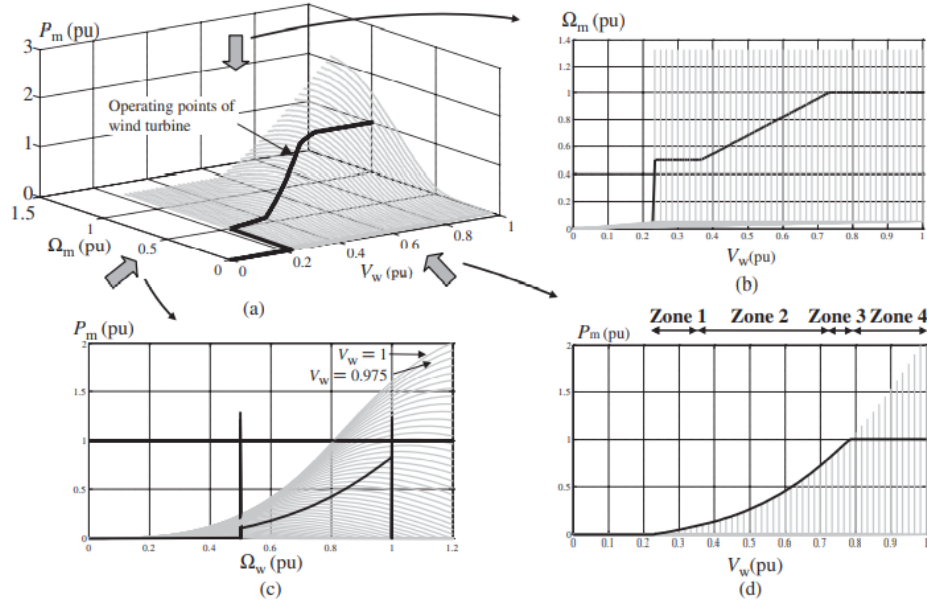
Percebe-se que nem sempre é possível operar nos pontos de potência máxima das curvas. Isso ocorre por causa da restrição das velocidades de rotação máxima ωt_{nom} e mínima ωt_{min} da turbina eólica. Dependendo do projeto da turbina, a velocidade é limitada por questões de eficiência e segurança. Para a maioria dos projetos de turbinas, essas limitações de velocidade geram quatro zonas de operação relacionadas à velocidade de rotação. As projeções da Figura 6.16a nos três planos ilustrados na Figura 6.16 b – d ajudam a delinear essas quatro zonas de operação (observe que a relação da caixa de engrenagens se mantém: $N\omega_t = \omega_m$).

ZONA 1: Nesta zona, a velocidade de rotação é limitada e mantida constante em seu valor mínimo; portanto, não é possível extrair a potência máxima do vento. Neste exemplo de uma turbina eólica, entre as velocidades do vento de 0,235 e 0,36 pu, a potência capturada não é máxima.

ZONA 2: Nesta zona, a velocidade de rotação pode ser variada atingindo o ponto máximo das curvas de potência. Dentro desta zona, geralmente, uma estratégia de rastreamento de ponto de potência máxima (MPPT) é executada. Portanto, entre as velocidades do vento de 0,36 e 0,73 pu, a velocidade de rotação é modificada, sempre buscando o máximo das curvas de potência.

ZONA 3: Esta zona aparece em alguns projetos de turbina quando a velocidade

Figura 6.16 – Curvas de potência de uma turbina eólica de velocidade variável com regulação de passo de vários megawatts. a) $P_m = f(V_w, \omega_m)$, b) Projeção no plano (V_w, ω_m) , c) Projeção no plano (P_m, ω_m) , d) Projeção no plano (P_m, V_w) .



Fonte: (ABU-RUB; MALINOWSKI; AL-HADDAD, 2014).

rotacional máxima é atingida, mas não a da potência máxima gerada. Para este projeto de turbina, entre as velocidades do vento de 0,73 e 0,78 pu, a velocidade de rotação deve ser mantida no valor máximo, embora não seja possível capturar a potência máxima do vento e, portanto, não esteja operando no máximo das curvas de potência.

ZONA 4: Esta zona começa quando a potência capturada é igual à potência nominal, que para este exemplo de turbina está na velocidade do vento de 0,78 pu. Nesta zona, a potência e a velocidade geradas são mantidas constantes em seus valores máximos, modificando o ângulo de inclinação. Assim, as pás são gradativamente inclinadas para fora do vento, pois é possível manter a potência capturada constante, mesmo que a velocidade do vento aumente. Deve-se destacar que é possível encontrar na literatura representações ligeiramente alternativas das zonas de controle da turbina apresentadas nesta seção.

6.4.3 Controle de Turbina

Visto que o aerogerador pode operar em quatro zonas diferentes de acordo com a velocidade de rotação, esta seção apresenta a estratégia geral de controle do aerogerador (Figura 6.17a). O GIDA é controlado por vetor pelo conversor do lado do rotor.

Assim, este novo bloco de controle de turbina eólica gera as referências de torque e passo para determinar as quatro zonas de operação. O conversor do lado da rede também é controlado por vetor e é responsável por evacuar a energia gerada para a rede através do

rotor da máquina e por controlar a tensão do barramento CC do conversor back-to-back. As referências Q_s e Q_g são geradas pela estratégia de geração de energia reativa, atendendo à rede com a energia reativa necessária, conforme demandado pelo operador da rede.

A Figura 6.17b mostra algumas filosofias de bloco de controle de turbina eólica possíveis para cada zona de operação. Como pode ser observado, as zonas 1 e 3 apresentam a mesma estrutura de controle. A velocidade é regulada como constante em relação ao valor máximo ou mínimo por meio do torque eletromagnético gerado pelo GIDA. Geralmente, nesta situação, o ângulo de inclinação é mantido constante.

Por outro lado, na zona 4, a velocidade também é regulada como constante em relação ao valor máximo, mas neste caso, atuando o ângulo de passo e mantendo o torque eletromagnético constante. Finalmente, o MPPT da zona 2 pode ser executado de acordo com diferentes filosofias de controle. Por exemplo, é possível usar um controle indireto de velocidade (CIV), explorando o fato de que quando o MPPT é alcançado (operação em C_{pmax}), a potência gerada segue uma relação cúbica com a velocidade da seguinte forma:

$$V_w = \frac{R\Omega_t}{\lambda_{opt}} \Rightarrow P_t = \frac{1}{2}\sigma\pi R^2 \frac{R\Omega_t}{\lambda_{opt}^3} \quad C_{pmax} \Rightarrow P_t = K_{opt}(\Omega_t)^3 \quad (6.63)$$

$$C_{pmax} \Rightarrow k_{opt} = \frac{1}{2}\rho\pi R^5 \quad (6.64)$$

Os mais novos códigos de rede para turbinas eólicas de velocidade variável também impõem alguns requisitos adicionais relacionados ao suporte da rede.

Por um lado, o operador pode exigir um determinado valor de troca de potência reativa total com a rede, dentro de alguns limites pré-determinados. Em geral, isso obriga a um sobredimensionamento do projeto do conversor e/ou máquina da turbina eólica, a fim de distribuir a demanda de energia reativa total entre Q_s e Q_g e implementar uma estratégia especial de geração de energia reativa, conforme ilustrado na Figura 6.17.

Por outro lado, o código de rede também pode impor o suporte de controle de frequência primária da rede, mantendo uma certa reserva de energia na turbina eólica. Isso pode ser conseguido evitando a extração da potência máxima do vento, trabalhando em velocidades diferentes da ideal ou afastando-se do ângulo de inclinação ideal. Dessa forma, o aerogerador contribuirá para o equilíbrio da geração de energia na rede, que atualmente é realizada por usinas convencionais. Finalmente, as turbinas eólicas também podem ser necessárias para fornecer uma resposta inercial às mudanças de frequência, como feito naturalmente pelos geradores síncronos das usinas convencionais.

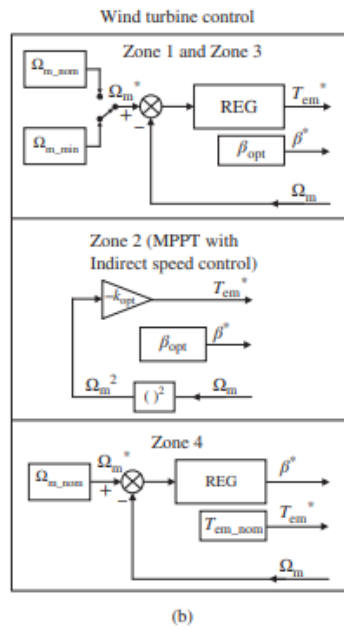
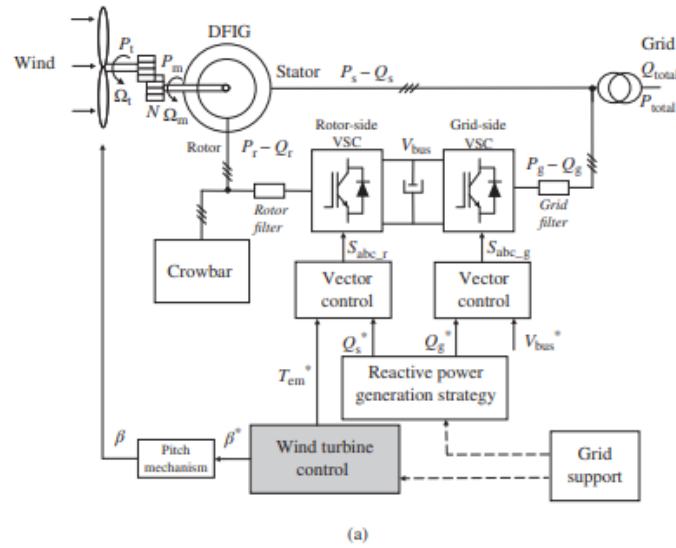
Assim, como ocorre com os geradores convencionais, as turbinas eólicas em operação normal armazenam energia cinética nas pás rotativas. Se nada de especial for feito, esta

energia não contribui para a inércia da rede, pois a velocidade de rotação é controlada pelo controle do conversor.

Assim, também é possível emular uma resposta inercial nas turbinas eólicas adicionando o bloco de emulação à referência de torque da turbina eólica, conforme mostrado na Figura 6.17. Quando uma variação na frequência acima de certos limites é detectada, a lei de controle derivado proporcional impõe uma variação rápida de torque, que também varia a potência entregue à rede pela turbina eólica. Isso é conseguido alterando a velocidade de rotação das pás e, portanto, alterando a energia cinética armazenada da turbina eólica. Esta reação rápida, que é mais rápida do que a regulação primária das usinas convencionais, contribui para evitar mudanças rápidas de frequência devido a mudanças repentinas no consumo de energia, que podem desligar as usinas devido ao overshoot do desvio de frequência.

Note que quando a velocidade de rotação atinge um limite máximo ou mínimo pré-estabelecido, o aerogerador não é capaz de contribuir mais para a resposta inercial e irá operar a uma velocidade diferente da ótima, não extraindo a potência máxima do vento. No entanto, contribuiu com energia adicional durante os primeiros segundos críticos da variação de frequência. Então, para atingir a velocidade ótima novamente, a turbina eólica operará de forma oposta à regulação primária de frequência. Observe que um método de sincronização rápida, por exemplo, um PLL, é crucial para garantir informações rápidas e precisas sobre a variação da frequência.

Figura 6.17 – (a) Controle Geral de uma Turbina Eólica Baseada em DFIG e (b) Malhas de Controle em Diferentes Zonas de Operação



Fonte: (ABU-RUB; MALINOWSKI; AL-HADDAD, 2014).

CAPÍTULO 7

Resultados e Discussão

7.1 Considerações Iniciais

Este capítulo ocupa-se em apresentar os dados relativos aos parâmetros da máquina simulada, os diagramas de blocos da simulação computacional realizada no ambiente simulink no software Matlab. Também será avaliado o desempenho do GIDA, considerando a operação do sistema na velocidade subsíncrona e supersíncrona e análise simétrica e assimétrica de afundamento de tensão.

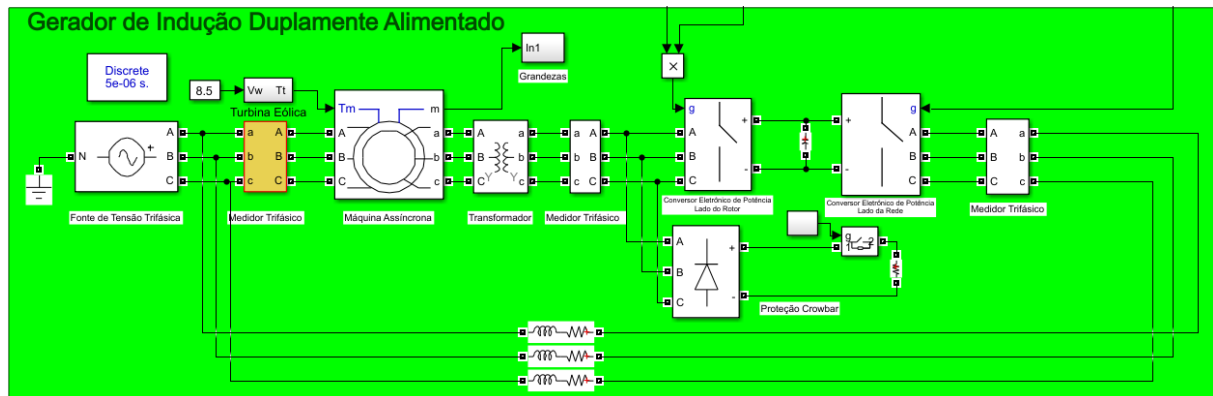
Gerador de Indução Duplamente Alimentado	Parâmetros	Dados
Frequência do Estator (H_z)	f	60
Valor Estimado Potência Estator (MW)	P_s	2.000
Velocidade Rotação Estimada (rev/min)	n	1.500
Tensão Estimada no Estator (V)	V_s	690
Corrente Estimada no Estator (A)	I_s	1.760
Torque Estimado ($N \cdot m$)	T_{em}	12.732
Pares de Polos	p	2
Taxa de rotação do estator/rotor	u	$\frac{1}{3}$
Tensão Estimada no rotor (V)	V_r	2070
Escorregamento Máximo	$smáx$	$\frac{1}{3}$
Tensão Estimada no Rotor Referida no Estator	$V_{r-estator}$	230
Resistência do Estator (Ω)	R_s	0.02
Indutância de Dispersão (H)	L_{si}	0.000087
Indutância de Magnetização (H)	L_m	0.0025
Indutância do Estator (H)	L_s	0.002587
Indutância do Rotor (H)	L_r	0.002587
Resistência do Rotor Referida no Estator (Ω)	R_r	0.0029
Tensão DC do Barramento Referido no Estator (V)	V_{bus}	1.150
Inércia	J	127
Amortecimento	D	0.001

Tabela 7.1 – Parâmetros da Máquina Simulada

7.2 Diagrama de Blocos

As equações matemáticas que descrevem o funcionamento do GIDA e da turbina eólica foram representadas por um diagrama de blocos no software SIMULINK do MATLAB, como pode ser visto na figura 7.1.

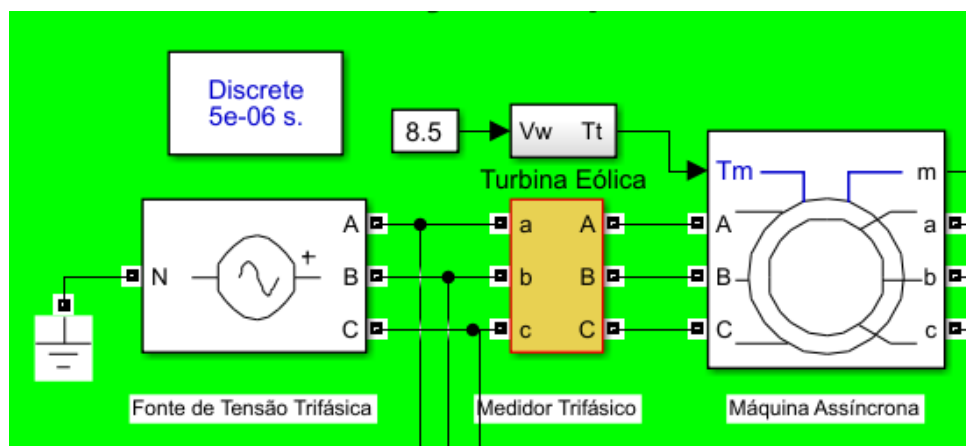
Figura 7.1 – Visão Geral dos Blocos da Simulação Computacional



Fonte: Próprio Autor.

Na figura 7.2, nós podemos observar o estator da máquina assíncrona sendo alimentado por uma fonte de tensão trifásica com amplitude e frequência constante, o que vai ser responsável pelo aparecimento de um campo magnético.

Figura 7.2 – Visão Parcial da Fonte de Tensão Trifásica, Turbina Eólica e Máquina Assíncrona

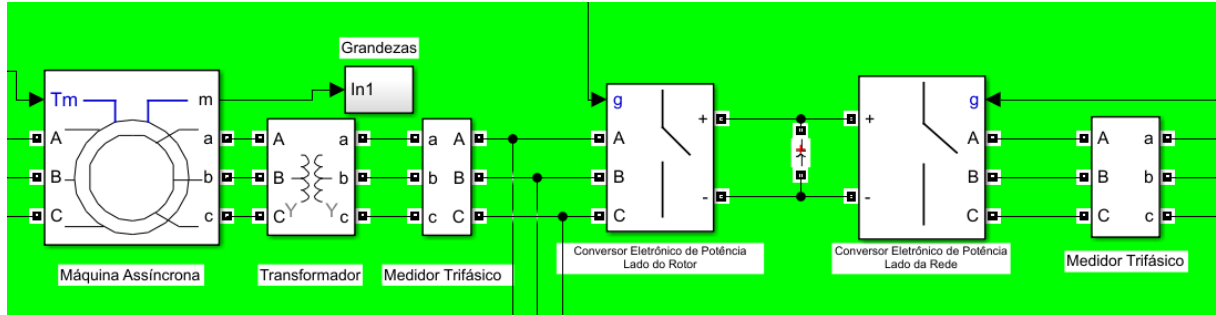


Fonte: Próprio Autor.

Como apresentado na figura 7.3, o rotor também é alimentado por tensões trifásicas que assumem diferentes amplitudes e frequências em regime permanente para atingir diferentes condições de operação da máquina (velocidade, torque, etc.). Isto é conseguido usando um conversor trifásico back-to-back. Este conversor, juntamente com a estratégia de controle apropriada, é responsável por impor as tensões CA do rotor necessárias para

controlar o ponto de operação geral do GIDA e realizar a troca de potência através do rotor para a rede.

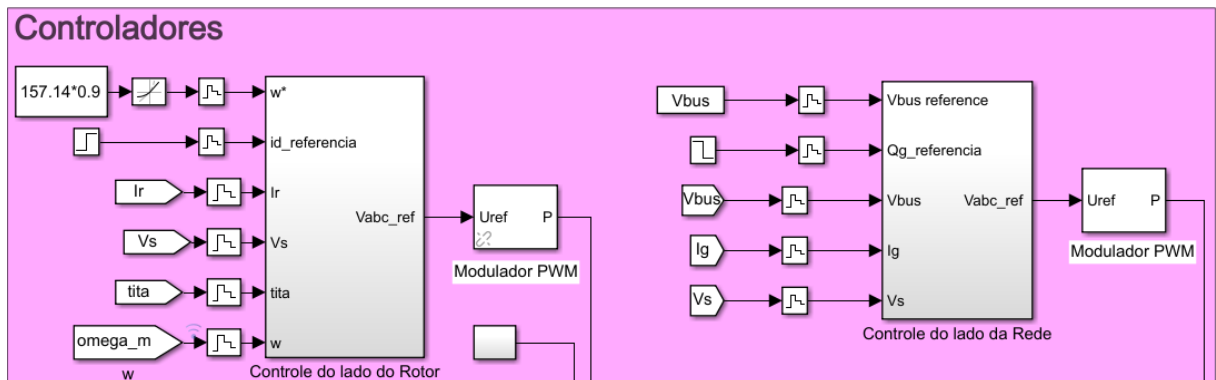
Figura 7.3 – Visão Parcial da Máquina Assíncrona, Transformador e Conversores



Fonte: Próprio Autor.

Na figura 7.4 observa-se os diagramas de blocos dos controladores responsáveis por realizar o controle do lado do rotor e do lado da rede.

Figura 7.4 – Controladores



Fonte: Próprio Autor.

7.2.1 Modelo de Turbina Eólica

Na figura 7.5, é apresentado o bloco representativo da turbina eólica, nós teremos uma entrada externa com a velocidade média do vento e uma saída com o torque. Na figura 7.6 observamos o diagrama de blocos do equacionamento das grandezas da turbina eólica.

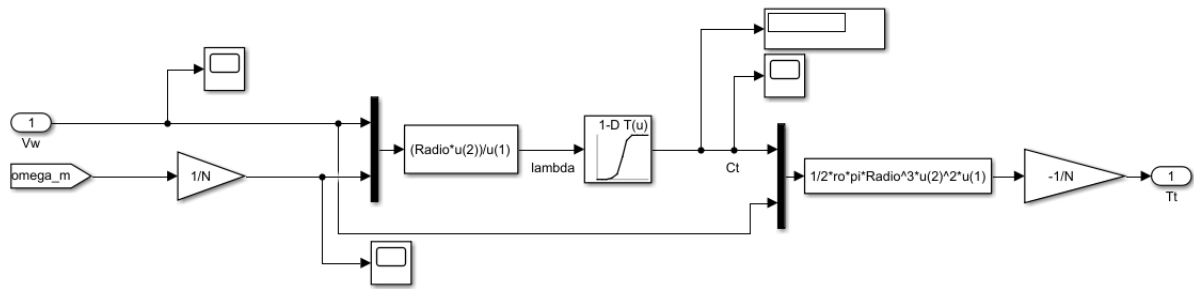
Internamente, a primeira coisa que precisamos fazer é calcular o λ , $\lambda = R \frac{\Omega_t}{V_w}$ ele é calculado a partir de R (raio da pás da turbina), Ω_t (velocidade rotacional rotor), V_w (Velocidade do vento), é necessário se atentar que este modelo é referido ao lado de baixa velocidade, então precisamos levar em consideração a relação da caixa de velocidades através de $\frac{1}{n}$. E uma vez que se tenha calculado o λ pode-se calcular o coeficiente de

Figura 7.5 – Turbina Eólica



Fonte: Próprio Autor.

Figura 7.6 – Diagrama de Blocos da Turbina Eólica



Fonte: Próprio Autor.

torque C_t . E assim que se tenha essas duas variáveis calculadas, C_t e V_w , podemos calcular o torque gerado pelo rotor $T_t = \frac{1}{2}\rho\pi R^3 V_w^2 C_t$.

7.2.2 Controle do Rotor

7.2.2.1 MPPT (Ponto de Máxima Potência)

Conhecida como uma técnica de controle indireta. Ela possui como entrada a velocidade media do rotor, que logo é levada ao quadrado e multiplicada por uma constante o que resulta no torque de referência, assim como mostra as equações e o diagrama de blocos da figura 7.7.

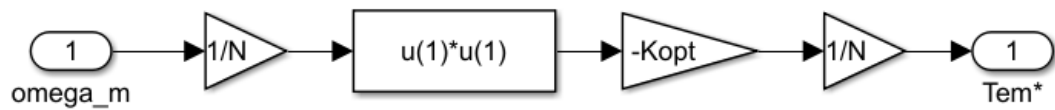
$$T_{em} = -k_{opt}\Omega_m^2 \quad (7.1)$$

$$K_{opt} = \frac{1}{2}\rho\pi \frac{R^5}{\lambda_{opt}^3 N^3} C_{pmax} \quad (7.2)$$

7.2.3 Controlador Proporcional Integral

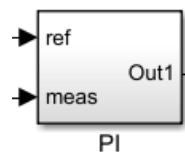
São utilizados controladores proporcional integral para controlar a corrente de eixo direto e de eixo em quadratura, tanto de sequência positiva quanto negativa.

Figura 7.7 – Diagrama de Blocos do MPPT



Fonte: Próprio Autor.

Figura 7.8 – Controlador Proporcional Integral

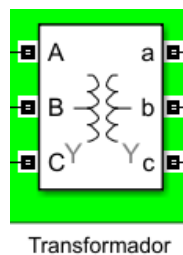


Fonte: Próprio Autor.

7.2.3.1 Transformador

O transformador é colocado para que o conversor do lado da rede e do lado do rotor trabalhe com tensão reais. Para tanto é preciso colocar um transformador no lado do rotor.

Figura 7.9 – Transformador



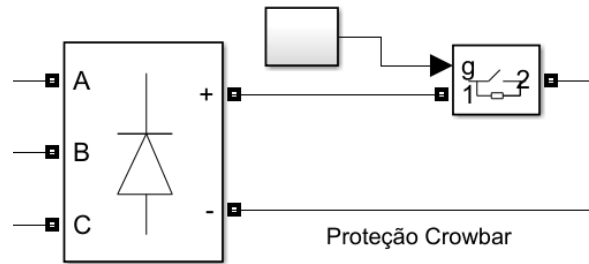
Fonte: Próprio Autor.

7.2.3.2 Proteção Crowbar

Para a construção da proteção crowbar utilizando diagrama de blocos é necessário um diodo, uma resistência e uma chave. Ela é acionada no instante em que ocorre o afundamento de tensão.

A proteção crowbar é configurada para atuar automaticamente quando a corrente do rotor for maior que o limite estabelecido, ou quando tensão no barramento for maior que a tensão no barramento pré-estabelecida.

Figura 7.10 – Diagrama de Blocos



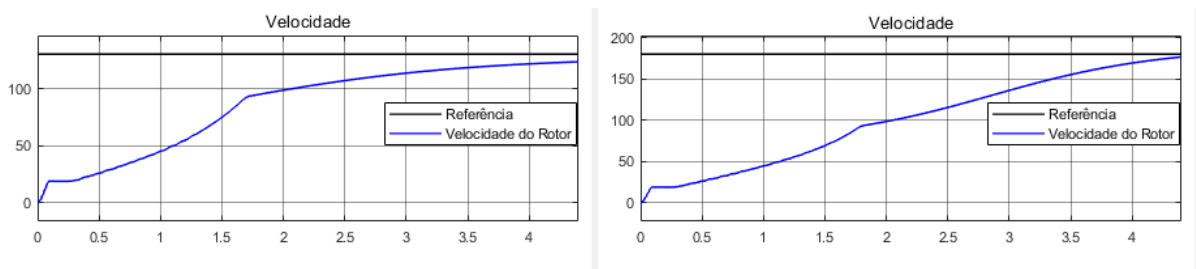
Fonte: Próprio Autor.

7.3 Resultados das Simulações

7.3.1 GIDA em Operação Subsíncrona e Síncrona

A figura 7.11 e figura 7.12 apresenta o comportamento da velocidade e do torque do GIDA com a turbina trabalhando com uma velocidade de 7.5m/s e 11m/s. Na figura 7.11 temos o comportamento da turbina atuando na velocidade de 7.5m/s e podemos ver o seu comportamento até chegar à uma velocidade de $123.6 \left(\frac{rad}{s}\right)$, e para a velocidade da turbina atuando na velocidade de 11m/s observamos o seu comportamento até ela chegar à uma velocidade de $184.5 \left(\frac{rad}{s}\right)$.

Figura 7.11 – Resultado da Simulação Computacional. Em [a] Velocidade Subsíncrona; [b] Velocidade Supersíncrona;

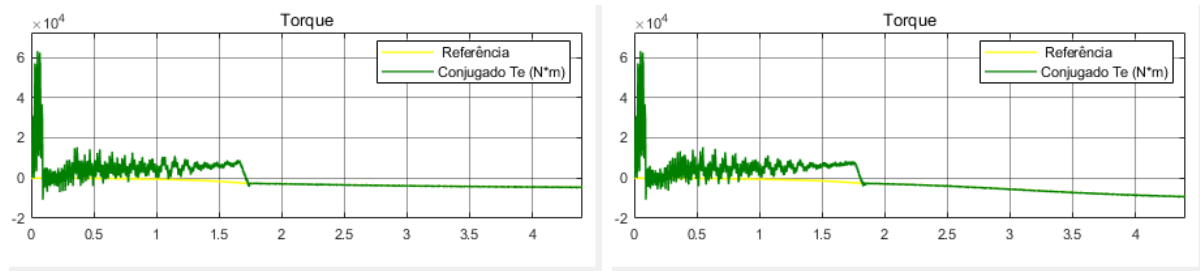


Fonte: Próprio Autor.

Na figura 7.12 temos o comportamento da turbina atuando na velocidade de 7.5m/s e seu torque tende à 5000 ($N \cdot m$) negativos, já quando a turbina está com velocidade supersíncrona ela seu valor fica próximo à 10500 ($N \cdot m$) negativos.

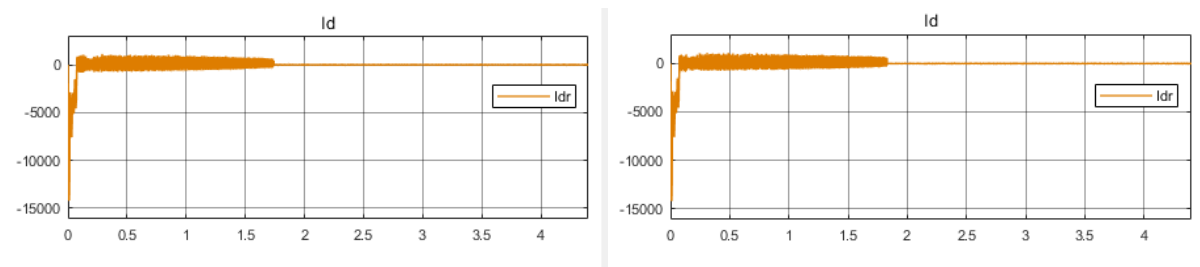
As figuras 7.13 e 7.14 apresenta o comportamento das correntes do rotor de eixo direto e em quadratura. A velocidade obtida alcança estabilidade após 4,5s, assim como a resposta do conjugado e das correntes na figura 7.14.

Figura 7.12 – [a] Conjugado para Velocidade Subsíncrona; [b] Conjugado para Velocidade Supersíncrona.



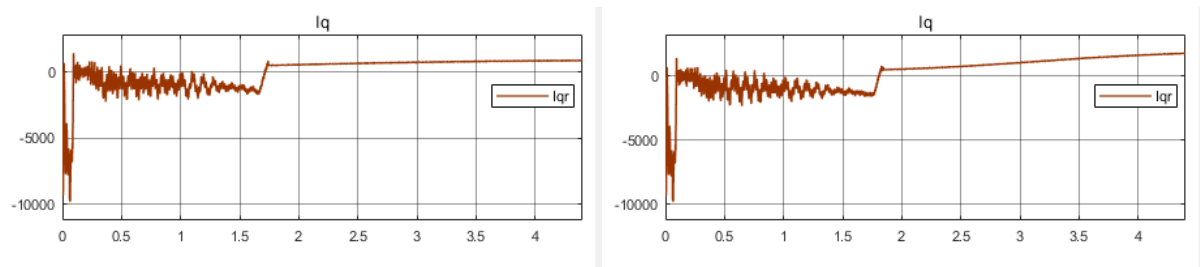
Fonte: Próprio Autor.

Figura 7.13 – Resultado da simulação computacional. Em [a] Id - Velocidade Subsíncrona; [b] Id - Velocidade Supersíncrona.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 7.14 – Resultado da simulação computacional. [a] Iq - Velocidade Subsíncrona; [b] Iq - Velocidade Supersíncrona.



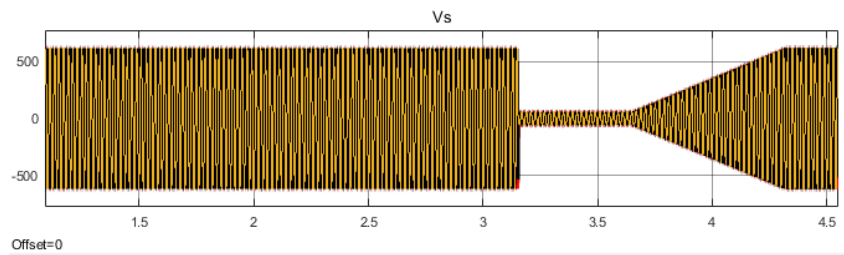
Fonte: Próprio Autor.

7.3.2 Análise Simétrica de Quedas de Tensão em Turbinas Eólicas

Foi realizado uma análise simétrica para observar o comportamento das grandezas do sistema frente a um afundamento de tensão assimétrica. A figura 7.15 apresenta o comportamento do sistema quando acontece um afundamento de tensão onde a tensão passa a ser 10% da tensão original no instante de 3,15s.

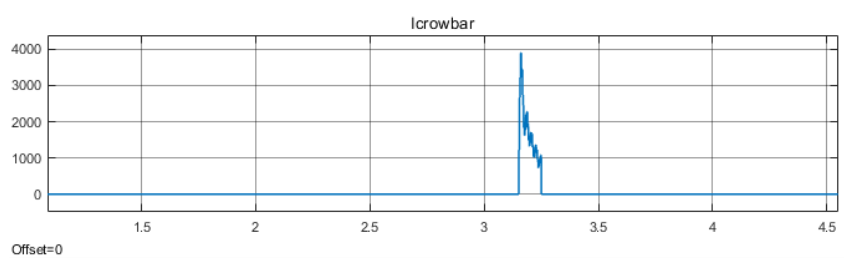
Após a identificação da falha, a proteção crowbar é acionada e então toda a corrente é redirecionada para ela. Através da figura 7.16 podemos identificar a atuação da proteção, e é preciso mencionar que o pico da corrente e seu transiente pode ser maior ou menor a depender da resistência do crowbar escolhida.

Figura 7.15 – Comportamento da tensão do estator quando acontece um afundamento de tensão



Fonte: Próprio Autor.

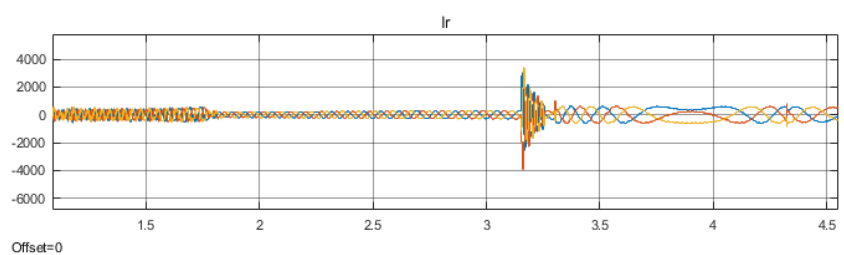
Figura 7.16 – Comportamento da corrente com a ativação da proteção



Fonte: Próprio Autor.

Na figura 7.17, observamos o comportamento da corrente do rotor. Durante a ativação da proteção nós conseguimos perceber que a proteção evita que altos níveis de corrente do rotor permaneça com o passar do tempo, protegendo a parte do rotor do sistema.

Figura 7.17 – Comportamento da Corrente do Rotor



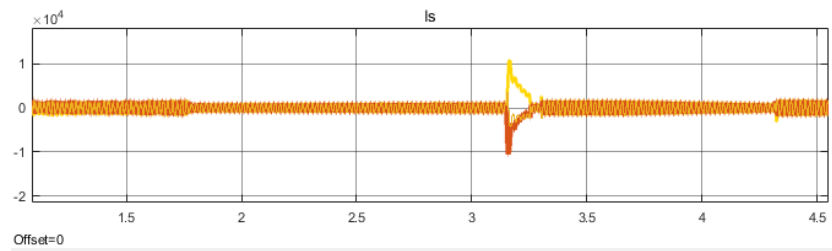
Fonte: Próprio Autor.

Na figura 7.18, é apresentado o comportamento da corrente do rotor. Durante a ativação da proteção e do afundamento de tensão, na corrente de estator seus valores são muito altos o que provoca um maior esforço para controlá-lo.

Quando observamos o torque na figura 7.19, no instante do afundamento de tensão é possível notar um grande vale na onda de torque que está diretamente relacionado com a corrente que passa pela proteção.

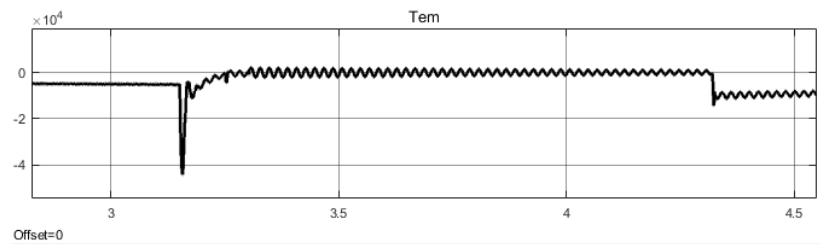
Analisando as grandezas do lado do rotor, quando a tensão é totalmente recuperada como no instante 4,17s da figura 7.20 [a], nós ganhamos controle da componente reativa da corrente no mesmo instante [b] e o torque demandado pelo algoritmo MPPT para manter

Figura 7.18 – Comportamento da Corrente do Estator com Afundamento de Tensão



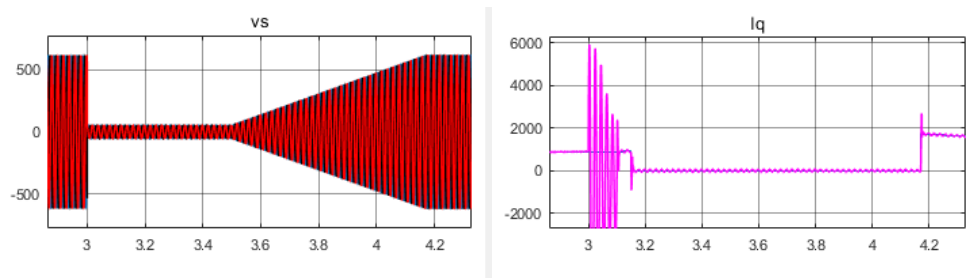
Fonte: Próprio Autor.

Figura 7.19 – Comportamento do Torque com afundamento de tensão



Fonte: Próprio Autor.

o controle é fornecido. Quando acontece o afundamento de tensão a velocidade dispara e a retomada do controle do torque possibilita o controle novamente da velocidade como mostrado na figura 7.21 [a] e [b].

Figura 7.20 – Resultado da Simulação Computacional. Em [a] tensão estator; [b] I_q 

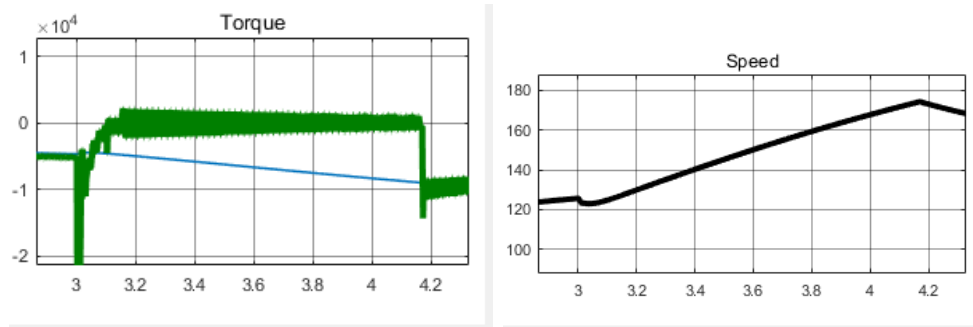
Fonte: Próprio Autor.

7.3.3 Análise Assimétrica de Quedas de Tensão em Turbinas Eólicas

Foi realizado uma análise para observar o comportamento das grandezas do sistema frente a um afundamento de tensão assimétrica. A figura 7.22 apresenta o comportamento do sistema quando acontece um afundamento de tensão em 3,0s.

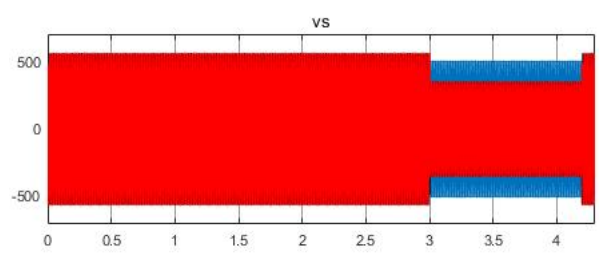
É possível observar na figura 7.23 que quando acontece um afundamento de tensão ocorre uma variação do fluxo e perdemos o controle do torque assim como pode ser observado na figura 7.21 [a].

Figura 7.21 – Resultado da Simulação Computacional.[a] Torque; [b] Velocidade.



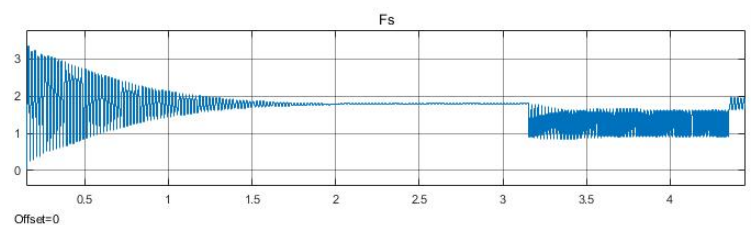
Fonte: Próprio Autor.

Figura 7.22 – Comportamento do sistema tensão do estator quando acontece um afundamento de tensão



Fonte: Próprio Autor.

Figura 7.23 – Comportamento do sistema tensão do estator quando acontece um afundamento de tensão

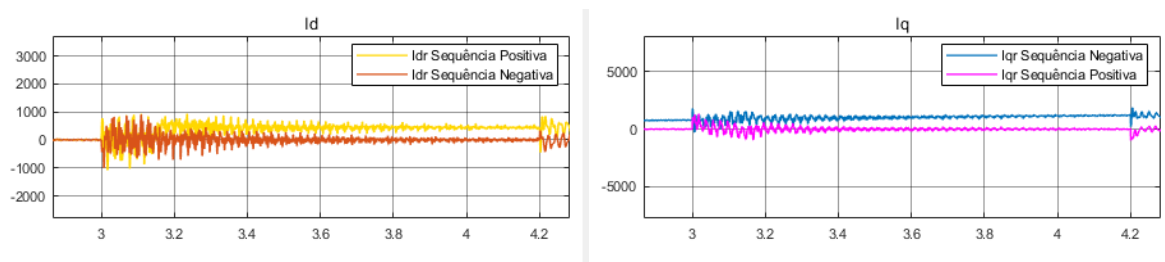


Fonte: Próprio Autor.

Essas oscilações de torque são causadas também porque estamos em uma situação de afundamento de tensão em uma rede desequilibrada e o fato de a sequência negativa estar zerada nas correntes do rotor.

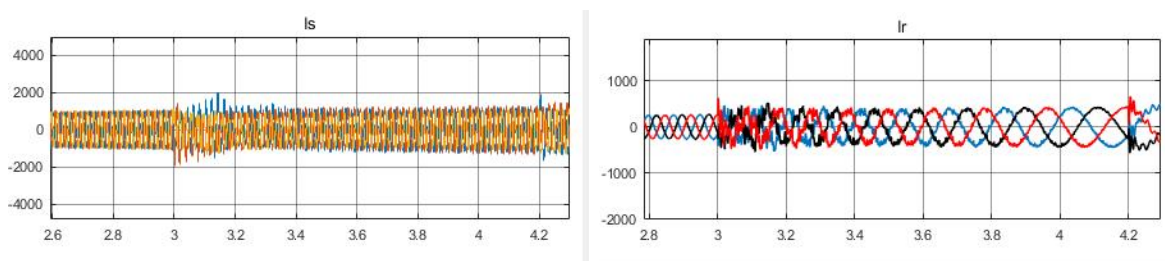
Como pode ser visto nas figuras 7.25, com o afundamento de tensão há uma alteração no comportamento da corrente mas ele continua atuando apesar de ter alguns ruídos.

Figura 7.24 – Comportamento da Corrente de Eixo Direto e de Eixo em Quadratura



Fonte: Próprio Autor.

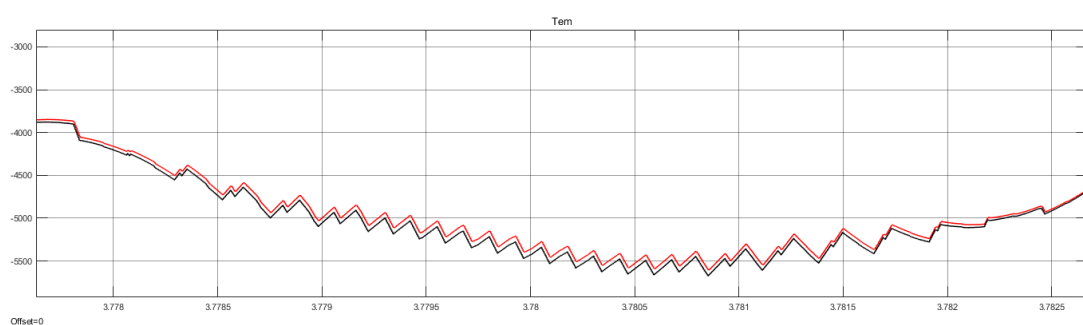
Figura 7.25 – Comportamento da Corrente do Estator e da corrente do Rotor



Fonte: Próprio Autor.

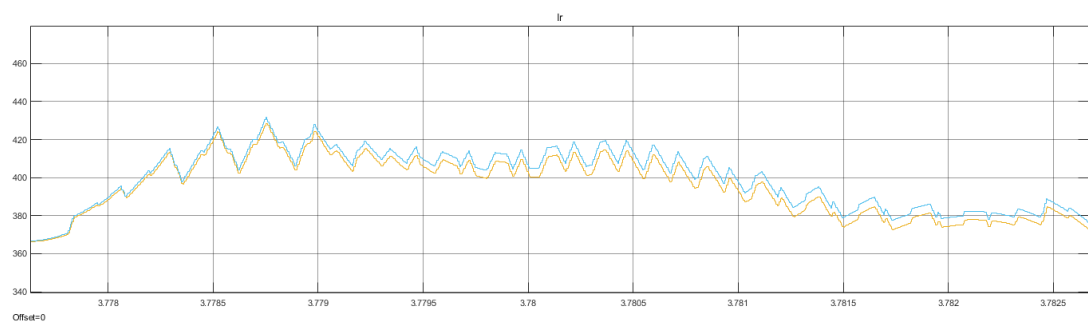
Também foi realizada uma análise comparando o comportamento do modelo padrão do GIDA oferecido pelo Simulink com o modelo criado a partir de diagrama de blocos. Pode-se observar na figuras 7.26 e 7.27 que ambos os modelos apresentaram resultados bem próximos.

Figura 7.26 – Torque



Fonte: Próprio Autor.

Figura 7.27 – Corrente do Rotor



Fonte: Próprio Autor.

CAPÍTULO 8

Conclusão

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou uma análise sobre o comportamento do gerador de indução duplamente alimentado em turbinas eólicas, foi analisado o seu desenvolvimento de velocidade até a velocidade estipulada e o seu comportamento frente aos afundamentos de tensão. Além disso, também permitiu uma pesquisa bibliográfica para obter dados mais consistentes sobre o funcionamento da GIDA e da turbina eólica.

Essa máquina de indução nessa configuração vem sendo muito utilizado para a geração de energia eólica, em virtude, primordialmente, do baixo custo dos conversores, da baixa necessidade de manutenção e também por oferecer um controle apropriado que atenda aos requisitos dos procedimentos da rede.

Ao dimensionar o GIDA em um ambiente de simulação, verificou-se que as partes mais complexas envolviam o controle tanto da parte do rotor quanto da parte da rede, devido a complexidade das variáveis e da quantidade de parâmetros. As simulações assim demonstraram o comportamento de acordo com a teoria.

Foi possível observar o comportamento do gerador frente ao afundamento de tensão, foi instalada uma proteção para reagir no momento da ocorrência do afundamento de tensão, então dessa forma no instante em que acontecia o afundamento de tensão a alta corrente que iria para o rotor era desviada para a proteção.

A simulação desenvolvida atendeu as expectativas gerando resultados satisfatórios e permitindo a produção de análises sobre o comportamento do gerador frente a afundamentos de tensões. O modelo GIDA simulado demonstrou resposta rápida e confiabilidade frente ao afundamento de tensão e caso seja necessário a proteção crowbar pode ser ajustada para atuar mais rápido ou com um menor valor de corrente a partir da variação da resistência da proteção.

Referências

- ABAD, G.; IWANSKI, G. Properties and control of a doubly fed induction machine. *Power electronics for renewable energy systems, transportation and industrial applications*, John Wiley & Sons, Ltd Chichester, UK, v. 18, p. 270–318, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 24.
- ABU-RUB, H.; MALINOWSKI, M.; AL-HADDAD, K. *Power electronics for renewable energy systems, transportation and industrial applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2014. Citado 15 vezes nas páginas 40, 41, 42, 44, 46, 47, 49, 50, 51, 53, 54, 56, 57, 59 e 62.
- ARAÚJO, A. G. d. et al. Controle vetorial de um motor de indução trifásico aplicado em sistemas de posicionamento. Universidade Federal da Paraíba, 2011. Citado na página 28.
- BULHÕES, R. L.; SANTANA, E. S. d. Controle de potência reativa em um gerador de indução duplamente alimentado utilizando a técnica de controle vetorial por orientação do fluxo de estator. SENAI/CIMATEC, 2014. Citado na página 37.
- CANEDO, L. dos S. *Ajuste do desempenho dinâmico de um Sistema de Geração Eólica com Gerador de Indução Duplamente Alimentado*. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2007. Citado na página 16.
- CHAPMAN, S. J. *Fundamentos de máquinas elétricas*. [S.l.]: AMGH editora, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- FRANCHI, C. M. *Inversores de frequência: teoria e aplicações*. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2009. Citado na página 24.
- GOKHALE, K. P.; KARRAKER, D. W.; HEIKKILÄ, S. J. *Controller for a wound rotor slip ring induction machine*. [S.l.]: Google Patents, 2002. US Patent 6,448,735. Citado na página 28.
- JÚNIOR, J. V. K. Análises teórica e experimental do gerador assíncrono de dupla alimentação-o geada, e contribuição à sua operação. 2006. Citado na página 31.
- LIPO, T.; PANDA, D.; ZARKO, D. *Design and Test of DC Voltage Link Conversion System and Brushless Doubly-Fed Induction Generator for Variable-Speed Wind Energy Applications: August 1999–May 2003*. [S.l.], 2005. Citado na página 34.
- MARQUES, J. et al. Turbinas eólicas: Modelo, análise, e controle do gerador de indução com dupla alimentação. Universidade Federal de Santa Maria, 2004. Citado 4 vezes nas páginas 31, 32, 33 e 36.

- NAVAS, M. A. H.; PUMA, J. L. A.; FILHO, A. J. S. Direct torque control for squirrel cage induction generator based on wind energy conversion system with battery energy storage system. In: IEEE. *2015 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)*. [S.l.], 2015. p. 1–6. Citado na página 29.
- OLIVEIRA, F. D. C. *Suportabilidade a afundamentos de tensão em geradores dfig empregando limitador supercondutor*. Tese (Doutorado) — Tese de Doutorado, Centro Tecnológico, UFES, Vitória, BR, 2016. Citado na página 34.
- OLIVEIRA, R. G. de. Contribuição ao controle de um sistema de geração a velocidade variável utilizando gerador de indução duplamente excitado. Universidade Federal de Minas Gerais, 2009. Citado na página 16.
- PAREKH, R. Ac induction motor fundamentals. *Microchip Technology Inc*, n. DS00887A, p. 1–24, 2003. Citado na página 27.
- SALAMEH, Z. M.; KAZDA, L. Analysis of the steady state performance of the double output induction generator. *IEEE transactions on Energy Conversion*, IEEE, n. 1, p. 26–32, 1986. Citado na página 30.
- SANTOS, R. V. dos. *MONITORAMENTO DE PARÂMETROS DE MOTORES DE INDUÇÃO*. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, 2013. Citado na página 23.
- SOBRINHO, A. P. et al. Critérios de projeto e construção de motores de indução trifásicos de alta rotação. Florianópolis, SC, 2008. Citado na página 24.
- SUETAKE, M.; SILVA, I. N. D.; GOEDTEL, A. Controlador escalar fuzzy v/f de velocidade de motores de indução trifásicos. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE-SBAI*. [S.l.: s.n.], 2007. v. 8. Citado na página 27.
- TAVARES, M. M. *Uso do gerador de indução duplamente alimentado como gerador eólico*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2017. Citado na página 39.
- TEIXEIRA, F. H. P. *Metodologia para projeto, construção e ensaios em máquina síncrona de imã permanente-MSIP*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2006. Citado na página 24.
- TOLMASQUIM, M. T. Perspectivas e planejamento do setor energético no brasil. *Estudos avançados*, SciELO Brasil, v. 26, p. 247–260, 2012. Citado na página 18.
- UMANS, S. D. *Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley-7*. [S.l.]: AMGH Editora, 2014. Citado na página 38.

Apêndices

APÊNDICE A

Linhas de códigos Arquivo.M

Figura A.1 – Parâmetros do GIDA

```
%%Parâmetros DFIG --> Parametros do rotor referidos no lado do estator

f=50;           %Frequência stator (Hz)
Ps=2e6;         %Valor estimado Potência Estator (W)
n=1500;         %Velocidade rotação estimada (rev/min)
Vs=690;         %Tensão estimada no estator (V)
Is=1760;        %Corrente estimada no estator (A)
Tem=12732;      %Torque estimado (N.m)

p=2             %Pares de polos
u=1/3           %Taza de rotação do estator/rotor
Vr=2070;        %Tensão estimada no rotor (não alcançado) (V)
smax=1/3        %Escorregamento máximo
Vr_stator=(Vr*smax)*u; %Tensão estimada no rotor referida no estator
Rs=2.6e-3;       %Resistência do estator
Lsi=0.087e-3;    %Indutância de dispersão
Lm= 2.5e-3;      %Indutância de magnetização (H)
Ls=Lm+Lsi;       %Indutância do estator (H)
Lr=Lm+Lsi;       %Indutância do rotor (H)
Rr=2.9e-3        %Resistência do rotor referida no estator (ohm)
Vbus=1150; %Tensão DC do barramento referido no estator
sigma=1-Lm^2/(Ls*Lr);
Fs=Vs*sqrt(2/3)/(2*pi*f); %Fluxo no estator (aprox.)

J=127;          %Inércia
D=1e-3*0;       %Amortecimento

fsw=4e3;        %frequencia de comutação (Hz)
Ts=1/fsw/f;     %tempo de amostra(s)

%Reguladores PI

tau_i = (sigma*Lr)/Rr;
tau_n = 0.05;
wni=100*(1/tau_i)/5;
wnn = 1/tau_n;

kp_id = (2*wni*sigma*Lr)-Rr;
kp_iq = kp_id;
ki_id = (wni^2)*Lr*sigma;
ki_iq = ki_id;
kp_n = (2*wnn*J)/p;
ki_n = ((wnn^2)*J)/p;

%Modelo trifásico das pás da turbina
N = 100;
Radio = 42;
ro = 1.225;

%Cp and Ct curves

beta=0;
ind2=1;
```

Fonte: Próprio Autor.

Figura A.2 – Parametros do GIDA

```

for lambda=0.1:0.01:11.8

    lambdai(ind2)=(1./((1./(lambda-0.02.*beta)+(0.003./(beta^3+1)))));
    Cp(ind2)=0.73.*(151./lambdai(ind2)-0.58.*beta-0.002.*beta^2.14-13.2).*(exp(
(-18.4./lambdai(ind2)));
    Ct(ind2)=Cp(ind2)/lambda;
    ind2=ind2+1;
end
tab_lambda=[0.1:0.01:11.8];

%Kopt for MPPT

Cp_max = 0.44;
lambda_opt = 7.2;
Kopt = ((0.5*ro*pi*(Radio^5)*Cp_max)/(lambda_opt^3));

%Curva de potência em função da velocidade do vento
P = 1.0e+06 * [0,0,0,0,0,0,0,0.0472,0.1097,0.1815,0.2568,0.3418, ...
0.4437,0.5642,0.7046,0.8667,1.0518,1.2616,1.4976,1.7613,2.0534, ...
2.3513,2.4024,2.4024,2.4024,2.4024,2.4024,2.4024];
V = [0.0000,0.5556,1.1111,1.6667,2.2222,2.7778,3.3333,3.8889,4.4444, ...
5.0000,5.5556,6.1111,6.6667,7.2222,7.7778,8.3333,8.8889,9.4444, ...
10.0000,10.5556,11.1111,11.6667,12.2222,12.7778,13.3333,13.8889, ...
14.4444,15.0000];

figure
subplot(1,2,1)
plot(tab_lambda,Ct,'linewidth',1.5)
xlabel('lambda','fontsize',14)
ylabel('Ct','fontsize',14)
subplot(1,2,2)
plot(V,P,'linewidth',1.5)
grid
xlabel('Wind speed (m/s)','fontsize',14)
ylabel('Power (W)','fontsize',14)

% Grid side converter

Cbus = 80e-3; %DC bus capacitance
Rg = 20e-6; %Grid side filter's resistance
Lg = 400e-6; %Grid side filter's inductance

Kpg = 1/(1.5*Vs*sqrt(2/3));
Kqg = -Kpg;

%PI regulators

tau_ig = Lg/Rg;
wnig = 60*2*pi;

kp_idg = (2*wnig*Lg)-Rg;
kp_iqg = kp_idg;
ki_idg = (wnig^2)*Lg;
ki_iqg = ki_idg;

```

Fonte: Próprio Autor.