

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENG. ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso

Aplicação da Máquina de Indução Trifásica de Rotor Bobinado na
Geração de Energia Elétrica

Nady Rocha

Orientador: Cursino Brandão Jacobina

4/Setembro/2006



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENG. ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso

Aplicação da Máquina de Indução Trifásica de Rotor Bobinado na
Geração de Energia Elétrica

Nady Rocha
(Aluno)

Cursino Brandão Jacobina
(Orientador)

04/Setembro/2006

Conteúdo

1	Introdução Geral	9
2	Sistema de Geração de Energia Elétrica	11
2.1	Introdução	11
2.2	História da Energia Eólica	12
2.3	Disponibilidade de Recursos	12
2.4	Perspectiva do Setor Elétrico Brasileiro	13
2.5	Turbinas Eólicas	14
2.6	Geradores Síncronos e Assíncronos	15
2.6.1	Geradores Síncronos	15
2.6.2	Geradores Assíncronos	17
2.7	Sistema de Geração Proposto	18
3	Máquina de Indução	19
3.1	Introdução	19
3.2	Descrição Geral da Máquina de Indução Trifásica	19
3.2.1	Rotor em Gaiola	20
3.2.2	Rotor Bobinado	20
3.3	Modos de Operação	20
3.4	Modelo Matemático do Motor de Indução	22
3.5	Modelo <i>dqo</i> da Máquina de Indução Trifásica	23
3.6	Modelo Bifásico da Máquina Trifásica de Rotor Bobinado	24

4	Conversor CA/CA	26
4.1	Introdução	26
4.2	Conversores CA/CA	27
4.2.1	Conversor A	27
4.2.2	Conversor B	28
4.3	Controle PWM	29
4.3.1	Conversor A	29
4.3.2	Conversor B	30
4.4	Corrente no Banco de Capacitores	32
5	Estratégia de Controle	35
5.1	Introdução	35
5.2	Controle por Orientação pelo Campo	36
5.3	Controle da Tensão de Barramento CC e do Fator de Potência	38
6	Resultados de Simulação	40
6.1	Introdução	40
6.2	Resultados de Simulação	40
7	CONCLUSÕES	48

Lista de Figuras

2.1	Turbina Horizontal	15
2.2	Turbina Vertical	15
2.3	Conexão Direta	16
2.4	Conexão indireta com circuito de excitação	16
2.5	Conexão indireta com excitação permanente	16
2.6	Máquina de indução em gaiola conexão direta	17
2.7	Máquina de indução em gaiola conexão indireta	17
2.8	Máquina de indução com rotor bobinado conexão indireta	18
2.9	Sistema de geração proposto	18
3.1	Rotor Bobinado	21
3.2	(a) Modelo trifásico, (b) subespaços ou planos dq , (c) bobinas isoladas s_o e r_o	23
5.1	Diagrama vetorial instantâneo da máquina	37
5.2	Diagrama de controle	38
6.1	Sistema de geração proposto	41
6.2	Correntes de Fase 1,2 e 3 do estator.	42
6.3	Correntes de fase 1, 2 e 3 e de referência do rotor.	42
6.4	Correntes dq doestator.	43
6.5	Correntes dq do rotor.	43
6.6	Velocidade w_m	44
6.7	Conjugados eletromagnético c_e e c_e^* e o conjugado mecânico c_m	44

6.8	Fluxos do estator λ_s e λ_s^*	45
6.9	Correntes i_{f123}^* do filtro l_f	45
6.10	Correntes i_{g1} e i_{g1}^* e tensão v_{g1}	46
6.11	Tensões v_c e v_c^* do banco de capacitores.	46
6.12	Potências do Grid, do estator, do rotor e do banco e capacitores.	47
6.13	Potências dos conversores A e B.	47

Agradecimento

Agradeço em primeiro lugar a minha mãe Laudina Jovelina da Rocha ao meu pai Naidson Rocha por estarem sempre me apoiando nesta caminhada, agradeço também ao meu orientador Cursino Bradão Jacobina e a todos os professores do Departamento de Engenharia Elétrica que me ajudaram direta ou indiretamente na minha formação. Agradeço também a todos os que me apoiaram, meus amigos e colegas e principalmente minha namorada, Diana por estar sempre do meu lado. Agradeço ao pessoal do LEIAM, por ter me ajudado nesta conquista.

Dedicatória

Dedico este trabalho às pessoas mais importantes para minha formação: minha mãe Laudina e meu pai Naidson.

Lista de Simbologia

$v_{s123}^s = [v_{s1}^s \ v_{s2}^s \ v_{s3}^s]^T$: Vetor de tensões no estator das fases 1, 2 e 3;

$v_{r123}^s = [v_{r1}^s \ v_{r2}^s \ v_{r3}^s]^T$: Vetor de tensões no rotor das fases 1, 2 e 3;

$i_{s123}^s = [i_{s1}^s \ i_{s2}^s \ i_{s3}^s]^T$: Vetor de correntes no estator das fases 1, 2 e 3;

$i_{r123}^s = [i_{r1}^s \ i_{r2}^s \ i_{r3}^s]^T$: Vetor de correntes no rotor das fases 1, 2 e 3;

$\lambda_{s123}^s = [\lambda_{s1}^s \ \lambda_{s2}^s \ \lambda_{s3}^s]^T$: Vetor de fluxos no estator das fases 1, 2 e 3;

$\lambda_{r123}^s = [\lambda_{r1}^s \ \lambda_{r2}^s \ \lambda_{r3}^s]^T$: Vetor de fluxos no rotor das fases 1, 2 e 3;

R_s : Matriz da resitência da bobina do estator;

R_r : Matriz de resistência da bobina do rotor;

\bar{L}_{ss} : Matriz de indutâncias próprias e mútuas do estator;

\bar{L}_{rr} : Matriz de indutâncias próprias e mútuas do rotor;

\bar{L}_{rs} e \bar{L}_{sr} : Matriz de indutâncias Mútuas entre estator e o rotor;

c_e : Conjugado eletromagnético;

$P = 1$: Número de par de pólos;

\bar{P}_s^g : Matriz de transformação do estator no referencial genérico;

\bar{P}_r^g : Matriz de transformação do rotor no referencial genérico;

r_s : Resistência das bobinas do estator;

r_r : Resistência das bobinas do rotor;

l_s : Indutância das bobinas do estator;

l_r : Indutância das bobinas do rotor;

l_m : Indutância Mútua;

$v_{sdq}^g = v_{sd} + jv_{sq}$: Vetor das tensões dq no estator;

$v_{rdq}^g = v_{rd} + jv_{rq}$: Vetor das tensões dq no rotor;

$i_{sdq}^g = i_{sd} + ji_{sq}$: Vetor das correntes dq no estator;

$i_{rdq}^g = i_{rd} + ji_{rq}$: Vetor das correntes dq no rotor;

$\lambda_{sdq}^g = \lambda_{sd} + j\lambda_{sq}$: Vetor dos fluxos dq no estator;

$\lambda_{rdq}^g = \lambda_{rd} + j\lambda_{rq}$: Vetor dos fluxos dq no rotor;

F : Coeficiente de atrito;

J : Momento de inercia;
 c_m : Conjugado Mecânico;
 w_m : Velocidade de rotação do rotor;
 w_g : Velocidade de rotação do eixo d;
 w_a : Velocidade de rotação do eixo do fluxo do estator;
 $i_r^g = i_{rd}^g + j i_{rq}^g$: Vetor de tensão dq no rotor;
 $i_r^{g*} = i_{rd}^g - j i_{rq}^g$: Conjugado complexo do vetor de tensão dq no rotor;
 v_{a10}^s, v_{a20}^s e v_{a30}^s : Tensões de pólo no conversor A;
 v_{b10}^s, v_{b20}^s e v_{b30}^s : Tensões de pólo no conversor B;
 v_{n20} : Diferença de tensão entre o neutro dos terminais do rotor e o ponto intermediário do banco de capacitores;
 v_{g0} : Diferença de tensão entre o neutro do grid e o ponto intermediário do banco de capacitores;
 v_c : Tensão do banco de capacitores;
 q_{a1}, q_{a2} e q_{a3} : Estados das chaves do conversor A;
 q_{b1}, q_{b2} e q_{b3} : Estados das chaves do conversor B;
 v_{ha} : Tensão homopolar para o conversor A;
 v_{hb} : Tensão homopolar para o conversor B;
 $v_{r\max}$ e $v_{r\min}$: Tensões máxima e mínimas do vetor de tensão V_{r123} ;
 $V_{r123} = \{v_{r1}^{s*}, v_{r2}^{s*}$ e $v_{r3}^{s*}\}$: Vetor das tensões do rotor de referências;
 $V_{b123} = \{v_{f1}^{s*} - v_{g1}, v_{f2}^{s*} - v_{g2}$ e $v_{f3}^{s*} - v_{g3}\}$: Vetor das tensões do rotor de referências;
 μ : Fator de distribuição de roda livre;
 τ_{a1}, τ_{a2} e τ_{a3} : Período de chaveamento das chaves do conversor A;
 τ_{b1}, τ_{b2} e τ_{b3} : Período de chaveamento das chaves do conversor B;
 T : Período de amostragem;
 v_{f1}^s, v_{f2}^s e v_{f3}^s : Tensões das indutâncias do filtro trifásico l_f ;
 v_{g1}, v_{g2} e v_{g3} : Tensões da rede de Alimentação trifásica (grid);
 i_c : Corrente no banco de capacitores;
 i_{ca} : Contribuição do conversor A para a corrente do banco de capacitores;
 i_{cb} : Contribuição do conversor B para a corrente do banco de capacitores;

Capítulo 1

Introdução Geral

A energia eólica foi pioneiramente usada na produção de energia elétrica na Dinamarca, no final do século XIX. No Brasil, só depois de 1990 se iniciaram os primeiros estudos sobre o potencial eólico. Do potencial eólico mundial, estima-se que cerca de 10% seja tecnicamente viável. Hoje, a Alemanha é a líder mundial na produção de energia eólica com 35% da potência gerada.

As turbinas eólicas são acopladas aos eixos dos geradores, para a geração da energia elétrica a partir do vento. Existem dois tipos básicos de turbinas: a de eixo vertical e a de eixo horizontal. Já os geradores aplicados neste tipo de operação podem ser: síncronos, assíncronos e de corrente contínua. Para os motores síncronos e assíncronos, existem dois tipos de acionamentos: o direto e o indireto. No acionamento direto, o gerador é ligado diretamente à rede, no indireto, sua alimentação é feita através de conversores estáticos.

As máquinas de indução podem ser classificadas de acordo com seu rotor em: máquina de indução de rotor em gaiola e máquina de indução de rotor bobinado. O modelo trifásico é um modelo com parâmetros variáveis no tempo, por isso, faz-se necessário um novo modelo dqo , com parâmetros constantes. Como o conjugado depende apenas das componentes dq , a máquina de indução pode ser, então representado por um modelo bifásico.

Neste trabalho, a máquina de indução trifásica tem as bobinas do estator ligadas

diretamente à rede, enquanto os terminais do rotor são conectados a partir de um conversor CA/CA. Há duas topologias de conversores CA/CA: topologias que fazem conversões diretas e topologias que fazem conversões indiretas.

A topologia aplicada para o acionamento do gerador foi um conversor de seis braços com o modo de conversão CA/CA indireto, ou seja, o conversor CA/CC/CA. Esta estrutura é formada por uma estrutura básica de dois conversores: o primeiro, conversor A, realiza a conversão CC/CA, e a segunda estrutura, o Conversor B, que realiza a conversão CA/CC.

Para o controle dos conversores aplica-se as seguintes estratégias: Controle por orientação pelo campo, conversor A, e controle do banco de capacitores e do fator de potência, conversor B. Na estratégia por orientação pelo campo é feito o controle das correntes do rotor a partir do fluxo do estator e do conjugado, otimizando assim a potência gerada do sistema.

Os resultados deste trabalho foram obtidos a partir da simulação digital no ambiente C^{++} , que gera os vetores de pontos das variáveis desejadas, armazenando em um arquivo tipo .mat. Com auxílio do MatLab[®], pode-se visualizar as curvas geradas na simulação. Neste capítulo, serão apresentados os resultados de simulação digital para o sistema de geração de energia a partir de um gerador de indução trifásico com rotor bobinado (GITRB).

Capítulo 2

Sistema de Geração de Energia Elétrica

2.1 Introdução

A energia eólica foi pioneiramente usada na produção de energia elétrica na Dinamarca, no final do século XIX. No Brasil, só depois de 1990 se iniciaram os primeiros estudos sobre seu potencial eólico. Do potencial eólico mundial, estima-se que cerca de 10% seja tecnicamente viável. Hoje, a Alemanha é a líder mundial na produção de energia eólica com 35% da potência gerada.

As turbinas eólicas são acopladas aos eixos dos geradores, para a geração da energia elétrica a partir do vento. Existem dois tipos básicos de turbinas: a de eixo vertical e a de eixo horizontal. Já os geradores aplicados neste tipo de operação podem ser: síncronos, assíncronos e de corrente contínua. Para os motores síncronos e assíncronos, existem dois tipos de acionamentos: o direto e o indireto. No acionamento direto, o gerador é ligado diretamente à rede, no indireto, sua alimentação é feita através de conversores estáticos.

2.2 História da Energia Eólica

Energia eólica é a energia provida do vento, que é constituído por massas de ar em movimento. Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética contida nas massas de ar em energia cinética de rotação, a partir do emprego de turbinas eólicas.

A energia eólica vem sendo utilizada pela sociedade há muitos anos antes de Cristo, para diversas aplicações. Há registro da utilização de moinhos de ventos no Japão e na China no período de 2000 A.C. Na Pérsia, atual Iraque, em 2000 A.C, usava-se a força do vento para o bombeamento de água [2].

Para a geração de eletricidade as primeiras tentativas ocorreram no final do século XIX, mas foi somente na década de 1970, depois da crise mundial do petróleo é que ocorreu um maior investimento na geração de energia elétrica a partir das fontes eólicas o que causou um barateamento do sistema de geração o, viabilizando assim sua aplicação em escala comercial [1].

Contudo, foi somente em 1976 que, na Dinamarca, instalou-se a primeira turbina eólica comercial ligada a uma rede pública. Já, no Brasil, os primeiros estudos que possibilitaram a determinação do potencial eólico só ocorreram no início dos anos 90, no estado do Ceará e em Fernando de Noronha, tendo aí sua primeira turbina eólica instalada.

2.3 Disponibilidade de Recursos

A energia eólica é uma fonte de energia renovável e de grande abundância na natureza, contudo, embora seja inesgotável, a energia eólica não é capitada de forma contínua e uniforme, pois, os ventos variam de acordo com a estação do ano, além disso, é comum ocorrerem dias de calmaria [10]. Mesmo assim, o potencial eólico mundial é apreciável.

A avaliação do potencial eólico de uma região requer um trabalho sistemático de coleta e análise de dados sobre a velocidade e regime do vento [1]. Para a energia

gerada ser tecnicamente viável, o vento tem que ter uma velocidade superior a $7m/s$, no entanto há outras características intrínsecas como relevo e a rugosidade do terreno local.

Não é apropriado fazer instalações de uma grande fazenda eólica situadas muito acima do nível do mar, devido ao ar muito rarefeito, o que causa uma perda na potência gerada, e também regiões que têm muitos obstáculos e árvores não são recomendadas.

Segundo a Organização Mundial de Meteorologia, em apenas 13% da superfície mundial, apresenta velocidade superior a $7m/s$. Na Europa Ocidental essa área chega a ser 32%, enquanto, na América Latina, essa área não passa de 10%. Estima-se que apenas 10% do potencial bruto mundial da energia eólica, ou seja, $53000TWh$, é tecnicamente viável. Contudo, esse valor corresponde a quatro vezes o consumo mundial de eletricidade.

A Alemanha, hoje, é o país que lidera o uso da energia eólica mundialmente, tendo um potencial instalado de $12000MW$, até 2003, o que corresponde a 35% da capacidade instalada mundialmente. Os EUA estão em segundo lugar com uma potência instalada correspondente a 22% da potência mundial, já na Espanha, corresponde a 19% e a Dinamarca, pioneira na utilização da energia eólica, possui uma potência instalada de 10% [1].

No Brasil, o potencial eólico estimado é de $20000MW$. mas, hoje, pesquisas indicam valores maiores que $60000MW$. Em setembro de 2003, havia apenas 6 centrais eólicas em operação no país com um potencial instalado de pouco mais de $22MW$, onde se destaca o estado do Ceará com 68% da produção nacional [1].

2.4 Perspectiva do Setor Elétrico Brasileiro

Em dezembro de 2001, o Governo Federal aprovou a lei 10438/02, modificada pela Lei 10726/03 que criou o PROINFA (Programa de Incentivos às Fontes Alternativas de Energia Elétrica), aumentando as expectativas de investimentos e incentivos na área de produção de energia elétrica a partir de centrais eólicas.

No ano de 2003, vários projetos iniciaram seu andamento, principalmente nos estados do Nordeste, onde os ventos são mais generosos, além disso, no momento em que a produção de energia nas hidrelétricas tem menor rendimento, devido à escassez das chuvas, as condições para geração de energia, em centrais eólicas, são as melhores possíveis. Até o final de 2006, cerca de 20 empresas deverão aplicar R\$4,78 bilhões em novas centrais eólicas selecionadas pelo PROINFA, desta forma, será instalado no país um potencial de 1100MW.

2.5 Turbinas Eólicas

Uma central é composta basicamente por: um gerador elétrico, ligado ao rotor da turbina, um sistema de transmissão, um multiplicador de velocidade em sistemas convencionais, um sistema de controle, um sistema local de compensação de energia reativa e um transformador elevador [7]. Neste trabalho, vamos centralizar nosso estudo no gerador elétrico e seu sistema de controle, pois, os demais componentes da central eólica não fazem parte deste trabalho.

No início, da utilização da energia eólica, surgiram turbinas de diversos tipos: eixo horizontal, Figura 2.1, eixo vertical com uma pá, duas e três pás, Figura 2.2. Com o passar do tempo, consolidou-se o emprego de turbinas eólicas com as seguintes características: eixo horizontal com três pás.

As turbinas eólicas são responsáveis pela transformação da energia cinética do vento em energia mecânica. Elas são acopladas ao eixo das máquinas elétricas (máquinas assíncronas, síncronas e de corrente contínua) convertendo a energia mecânica em elétrica.

Para o sistema de geração de energia existem dois tipos fundamentais de conexão: conexão direta e conexão indireta. Na conexão direta, têm-se velocidade e frequência constantes, no qual são utilizados, geralmente, geradores síncronos, de ímã, permanentes ou geradores assíncronos conectados diretamente à rede elétrica [9], Figura 2.3. A conexão indireta é feita através de conversores estáticos, os quais permitem uma maior flexibilidade, bem como, uma ampla variação da velocidade do rotor e



Figura 2.1: Turbina Horizontal

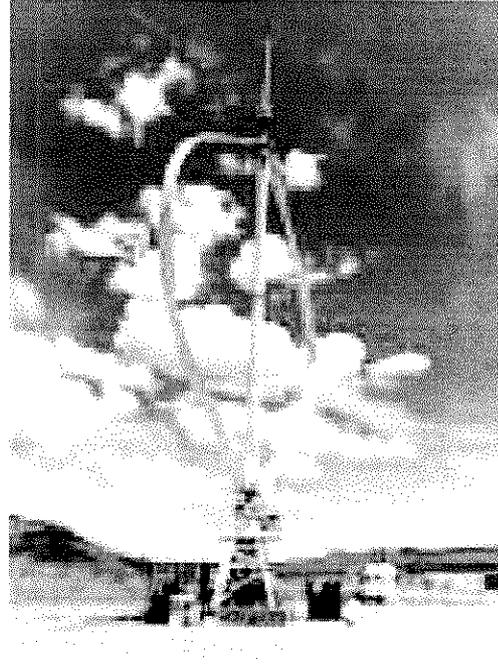


Figura 2.2: Turbina Vertical

uma regulação do fator de potência, podendo-se aplicar tanto um gerador assíncrono como síncrono [7], Figura 2.4.

2.6 Geradores Síncronos e Assíncronos

Na literatura, existem dois tipos de conexão de geradores elétricos à rede de alimentação: ligação direta e indireta. Para cada caso, pode se aplicar tanto geradores síncronos como um geradores assíncronos. Desta forma, esta seção descreve de forma resumida as principais conexões existentes na literatura.

2.6.1 Geradores Síncronos

Conexão Direta

O gerador está diretamente ligado à rede elétrica, o que deixa o sistema rígido, e é normalmente aplicado em sistemas com potências inferiores a 1KW.

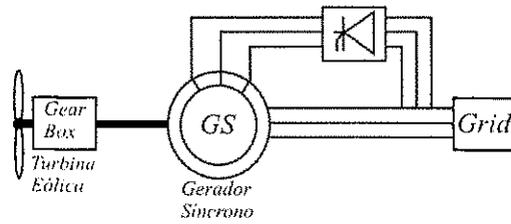


Figura 2.3: Conexão Direta

Conexão Indireta

Neste tipo de ligação, o gerador síncrono é separado da rede elétrica através de um conversor. Para funcionar com velocidade variável, usa-se um sistema multiplicador de velocidade e o conjunto gerador/rotor. No entanto, os conversores podem injetar na rede uma potência reativa variável, sendo este o ponto negativo.

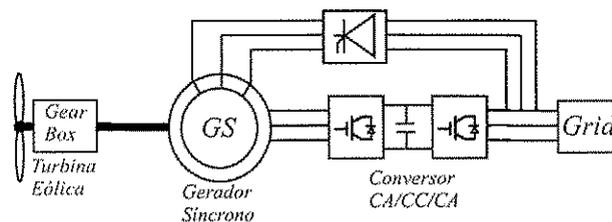


Figura 2.4: Conexão indireta com circuito de excitação

Conexão Indireta

A grande diferença neste tipo de conexão é que os geradores síncronos não usam o multiplicador de velocidade e nem existe um circuito de excitação para a máquina síncrona. Como na conexão anterior, o gerador está separado da rede de alimentação através de conversores estáticos.

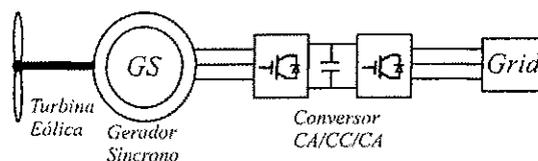


Figura 2.5: Conexão indireta com excitação permanente

2.6.2 Geradores Assíncronos

Conexão Direta

O gerador de indução está diretamente ligado à rede de alimentação, Figura 2.6, o que deixa o sistema rígido. A grande vantagem desta conexão é sua robustez.

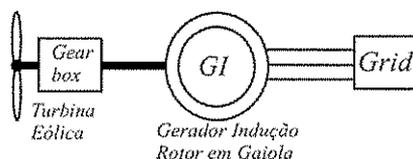


Figura 2.6: Máquina de indução em gaiola conexão direta

Conexão Indireta para Máquina de Rotor em Gaiola

Neste tipo de conexão os geradores de indução são separados da rede de alimentação através de conversores estáticos, Figura 2.7. Os conversores podem ser de dois tipos CA/CC/CA e CA/CA. Neste tipo de conexão todo de tipo potência passa pelo conversor.

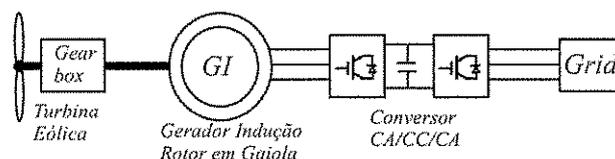


Figura 2.7: Máquina de indução em gaiola conexão indireta

Conexão Indireta com Máquina de Rotor Bobinado

Nesse caso, os enrolamentos do estator são conectados diretamente à rede. As conexões dos terminais do rotor são feitas através dos conversores estáticos, Figura 2.8. Neste tipo de estrutura a potência que passa pelo conversor é reduzida, pois o rotor a parte de baixa frequência da máquina.

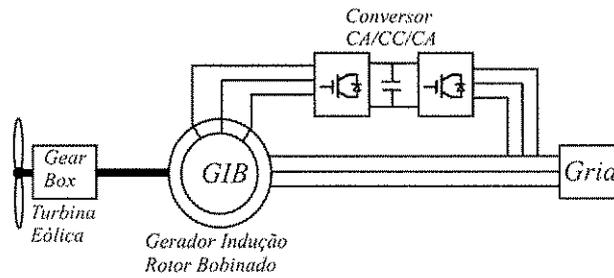


Figura 2.8: Máquina de indução com rotor bobinado conexão indireta

2.7 Sistema de Geração Proposto

O sistema proposto constitui de uma máquina primária (turbina eólica) acoplada ao eixo da máquina de indução trifásica com rotor bobinado (MITRB), uma rede de alimentação trifásica (grid) alimentando os terminais do estator e um conversor CA/CA de seis braços. O conversor é composto por: conversor A conectado aos terminais do rotor, um elo CC e conversor B conectado ao grid através de um filtro l_f . O sistema proposto é representado na Figura 2.9.

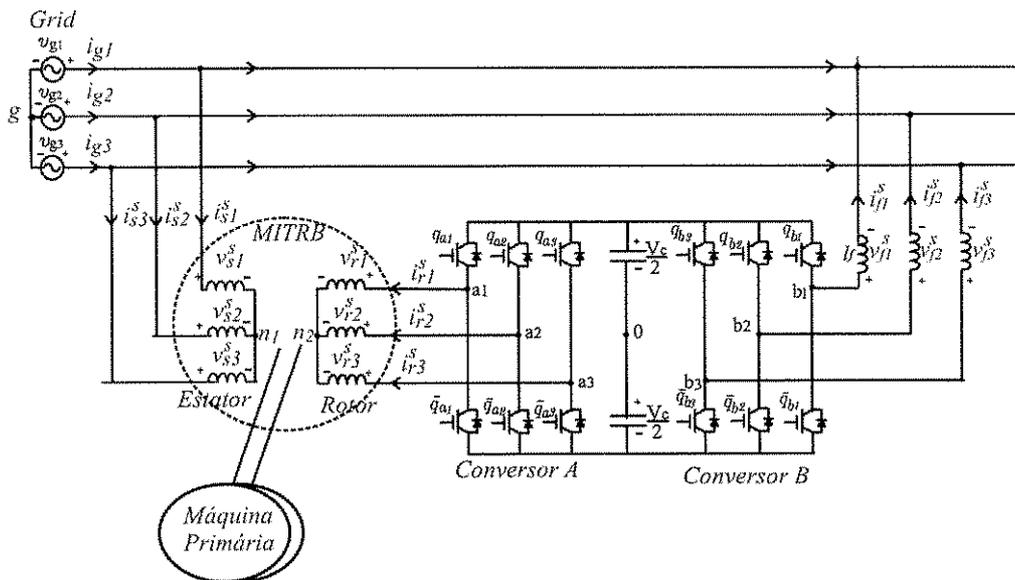


Figura 2.9: Sistema de geração proposto

Capítulo 3

Máquina de Indução

3.1 Introdução

Neste capítulo, faz-se uma abordagem do modelo da máquina de indução trifásica, que é composta por duas partes: estator e rotor. O rotor da máquina de indução pode ser de dois tipos: rotor em gaiola e rotor bobinado. O modelo trifásico é um modelo com parâmetros variáveis no tempo, por isso, faz-se necessário um novo modelo dqo , com parâmetros constantes, formado por um plano ortogonal dq mais uma bobina isolado o . Desta forma a máquina pode ser representada por um modelo bifásico, representada pelo eixo dq .

3.2 Descrição Geral da Máquina de Indução Trifásica

As máquinas de indução são compostas basicamente por duas partes: estator e rotor.

O estator é a parte fixa da máquina, constituída por uma carcaça que suporta um núcleo, em geral, de chapa magnética. O campo magnético é variável no tempo, desta forma, o núcleo é vulnerável a perdas magnéticas (*correntes de Foucault e histerese*).

O rotor é a parte móvel, que fica no interior do estator, ele é constituído por um empilhamento de chapas magnéticas que constitui o núcleo magnético e por enrolamentos em cavas. O rotor pode ser de dois tipos: rotor em gaiola e rotor bobinado.

3.2.1 Rotor em Gaiola

As máquinas com rotores em gaiola são divididas em três tipos: rotor em gaiola simples, de gaiola dupla ou gaiola de barras profundas.

Nos rotores em gaiola simples, os condutores são colocados em cavas paralelas ao veio da máquina, estes condutores se encontram curto-circuitados em cada extremidade por um anel condutor. O conjunto do material condutor tem o aspecto de uma gaiola de esquilo de onde se derivou o nome.

Os rotores em gaiola dupla são constituídos por duas gaiolas concêntricas. A gaiola externa possui uma resistência elevada de modo a permitir um bom torque de partida, enquanto que, a gaiola interna tem uma resistência baixa para garantir um bom rendimento em funcionamento normal.

Já as máquinas com rotores em gaiola de barras profundas têm um aspecto de gaiola simples, com a diferença de as barras que constituem seus enrolamentos serem consideravelmente profundas.

3.2.2 Rotor Bobinado

Os enrolamentos do rotor do tipo bobinado, feitos de material condutor, são colocados em cavas e isolados, são também semelhantes aos enrolamentos do estator. No rotor trifásico seus enrolamentos são ligados ou a um ligador centrífugo ou a três anéis de cobre isolados e solidários com o rotor. A ligação com o exterior é obtida através de três escovas que fazem contato com cada um desses anéis. A Figura 3.1.

Neste trabalho, utiliza-se um máquina de indução trifásica com rotor bobinado, pois, estas máquinas apresentam um maior grau de liberdade em relação às máquinas de rotor em gaiola.

3.3 Modos de Operação

Há três modos de operação para a máquina de indução: como motor, freio eletromagnético e gerador [8]. Aqui serão citados, sucintamente, cada modo de operação,

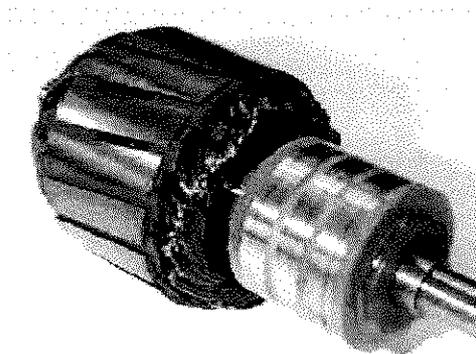


Figura 3.1: Rotor Bobinado

dando mais ênfase ao modo gerador que é tema deste trabalho.

Como motor, os terminais do estator são conectados para alimentar as três fases do estator, produzindo um conjugado eletromecânico positivo, que tem a mesma direção da velocidade do rotor. Neste tipo de operação, a velocidade de rotação do rotor (w_m) é menor que a velocidade síncrona (w_s).

A máquina de indução pode operar como freio eletromagnético. Nessa condição, o eixo gira em sentido contrário ao do regime de motor e gerador, havendo grandes perdas tanto no rotor como no estator. Em geral, o regime como freio se restringe a breves períodos de tempo, a fim de evitar um aquecimento excessivo [6].

Conforme dito, as máquinas assíncronas também podem trabalhar como gerador assíncrono (*gerador de indução*). Para operar nessa condição, devem ser acionadas acima da velocidade síncrona e, além disso, deve-se prover uma forma de magnetizar seu núcleo ferromagnético. Utilizando uma máquina primária (turbina eólica) acoplada ao eixo da máquina de indução, pode-se fornecer uma potência correspondente às perdas mecânicas, nesta situação o fluxo magnético da máquina continuará a manter-se aproximadamente constante.

Continuando-se a aumentar ainda mais a velocidade de rotação da máquina assíncrona, então esta ultrapassa a velocidade de sincronismo e o escorregamento torna-se negativo. O fluxo magnético, permanece constante em amplitude. No entanto, em relação ao rotor, este fluxo roda em sentido contrário ao sentido da sua rotação e por consequência também varia o sentido da f.e.m. induzida no rotor. A

força magnetomotriz gira em sentido contrário no referencial do rotor e, atuando com a f.m.m. do estator, cria um torque eletromagnético de sentido negativo que se opõe ao torque que é fornecido através da máquina exterior.

3.4 Modelo Matemático do Motor de Indução

Para a aplicação da máquina de indução trifásica, é necessário o conhecimento do modelo matemático, aqui será feito o estudo desse modelo obedecendo as seguintes condições:

- Entreferro de tamanho uniforme
- Máquina simétrica trifásica composta por: três fases no estator (s_1 , s_2 e s_3) e três fases no rotor (r_1 , r_2 e r_3).
- Circuito magnético com ausência de efeito de saturação.
- Máquina bipolar.

Segundo [5], o modelo matemático da máquina de indução pode ser resumido por:

$$v_{s123}^s = R_s i_{s123}^s + \frac{d}{dt} \lambda_{s123}^s \quad (3.1)$$

$$v_{r123}^r = R_r i_{r123}^r + \frac{d}{dt} \lambda_{r123}^r \quad (3.2)$$

$$\lambda_{s123}^s = \bar{L}_{ss} i_{s123}^s + \bar{L}_{sr} i_{r123}^r \quad (3.3)$$

$$\lambda_{r123}^r = \bar{L}_{rs} i_{s123}^s + \bar{L}_{rr} i_{r123}^r \quad (3.4)$$

$$c_e = P i_{s123}^{sT} \left[\frac{d}{dt} \bar{L}_{sr} \right] i_{r123}^r = P i_{r123}^{rT} \left[\frac{d}{dt} \bar{L}_{rs} \right] i_{s123}^s \quad (3.5)$$

3.5 Modelo dqo da Máquina de Indução Trifásica

Devido aos parâmetros do modelo trifásico serem variáveis com o tempo, torna-se um modelo complexo e inadequado para simulação e controle. No intuito de resolver tal dificuldade, faz-se uma transformação de base da variável da máquina, de forma a obter um modelo com elementos constantes, dado por [5]:

$$\bar{w}_{s123} = \bar{P}_s^g \bar{w}_{sdqo} \quad (3.6)$$

$$\bar{w}_{r123} = \bar{P}_r^g \bar{w}_{rdqo} \quad (3.7)$$

Os vetores \bar{w}_s e \bar{w}_r podem representar correntes, tensões e fluxos para o estator e o rotor, respectivamente. Desta forma, a partir da transformação de base é representada por um par de bobinas no eixo d (sd e rd) e um par de bobinas no eixo q (sq e rq) e mais duas bobinas isoladas (so e ro), ditas homopolares [5], Figura 3.2.

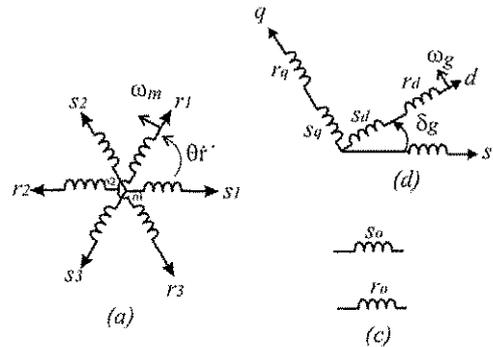


Figura 3.2: (a) Modelo trifásico, (b) subespaços ou planos dq , (c) bobinas isoladas s_o e r_o .

As matrizes \bar{P}_s^g e \bar{P}_r^g são ortogonais, onde o g subscrito representa o referencial genérico do eixo dq , $g = r$ referencial rotórico, $g = s$ referencial estatórico e $g = e$ o campo girante. Neste trabalho o eixo d ligado ao estator segundo a fase s_1 , fazendo-se $w_g = 0$ e $\delta_g = 0$. Desta forma, a matrizes de transformação P_s^s e P_r^s são dadas por:

$$P_s^s = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$P_r^s = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(-\theta_r) & -\sin(-\theta_r) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(-\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(-\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(-\theta_r - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(-\theta_r - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

O termo $\sqrt{\frac{2}{3}}$ é introduzido para que a potência seja constante nas duas bases.

3.6 Modelo Bifásico da Máquina Trifásica de Rotor Bobinado

Na representação dqo , a MITRB, é formada por um par de eixo dq e duas bobinas idôladas s_o e r_o , Figura 3.2. As bobinas s_o e r_o representam as componentes homopolares, que traduzem os desequilíbrios de sequência zero da máquina [5]. As componentes do eixo dq caracterizam a parte ativa da máquina de indução e, portanto, a conversão eletromagnética de energia. Desta forma, pode-se representar a máquina de indução trifásica pelo modelo bifásico dq :

$$v_{sdq}^g = r_s i_{sdq}^g + \frac{d\lambda_{sdq}^g}{dt} + j\omega_g \lambda_{sdq}^g \quad (3.10)$$

$$v_{rdq}^g = r_r i_{rdq}^g + \frac{d\lambda_{rdq}^g}{dt} + j(\omega_g - \omega_r) \lambda_{rdq}^g \quad (3.11)$$

$$\lambda_{sdq}^g = l_s i_{sdq}^g + l_m i_{rdq}^g \quad (3.12)$$

$$\lambda_{rdq}^g = l_m i_{sdq}^g + l_r i_{rdq}^g \quad (3.13)$$

$$c_e = p l_m (i_{sq}^g i_{rd}^g - i_{sd}^g i_{rq}^g) \quad (3.14)$$

$$p(c_e - c_m) = \bar{J} \frac{dw_r}{dt} + \bar{F} w_r \quad (3.15)$$

As variáveis e os parâmetros relacionados a este modelo estão definidos na lista de simbologia.

Capítulo 4

Conversor CA/CA

4.1 Introdução

Neste trabalho, a MITRB tem as bobinas do estator ligadas diretamente à rede, enquanto os terminais do rotor são conectados a partir de um conversor CA/CA. Nas bibliografias, há duas topologias de conversores CA/CA: topologias que fazem conversões diretas e topologias que fazem conversões indiretas [3].

A topologia aplicada para o acionamento do gerador de indução foi um conversor de seis braços com o modo de conversão CA/CA indireto, ou seja, o conversor CA/CC/CA. Esta estrutura é formada por dois conversores, o conversor A, que realiza a conversão CC/CA, e o Conversor B, que realiza a conversão CA/CC, mais um elo CC.

Os conversores podem ser controlados ou não controlados. Nas topologias controladas, suas estruturas são compostas por chaves de potência, SCR's e IGBT's, e as topologias não controladas, a partir de diodos, que são estruturas mais simples, no entanto, a aplicação da ponte de diodo não permite o controle do fator de potência, que pode ser realizado com o uso de topologias controladas [3].

4.2 Conversores CA/CA

O conversor CA/CA aplicado no acionamento da máquina de indução trifásica de rotor bobinado, Figura 2.9, é uma estrutura de conversão indireta formada por conversor trifásico controlado, denominado conversor A, um banco de capacitores no elo CC e um conversor trifásico, denominado conversor B.

O conversor A é composto pelos pares de chaves $q_{a1}\bar{q}_{a1}$, $q_{a2}\bar{q}_{a2}$ e $q_{a3}\bar{q}_{a3}$ o conversor B é composto pelos pares de chave $q_{b1}\bar{q}_{b1}$, $q_{b2}\bar{q}_{b2}$ e $q_{b3}\bar{q}_{b3}$, no qual cada par funciona de maneira complementar, evitando assim, que ambas as chaves do par sejam fechadas, ocorrendo um curto-circuito no banco de capacitores.

As chaves q_{a1} , q_{a2} e q_{a3} são controladas a partir do controle do conjugado (*controle orientado pelo campo*), controlando assim a tensão nos terminais do rotor, para otimizar a potência gerada. As chaves, q_{b1} , q_{b2} e q_{b3} são controladas a partir da tensão v_c^* desejada, no banco de capacitores, e são responsáveis pelo controle do fator de potência da corrente do grid. O conversor B está conectado à rede de alimentação através das indutâncias l_f , que funcionam como um filtro para os harmônicos de corrente de ordem superior.

4.2.1 Conversor A

As tensões no rotor no gerador de indução trifásico, v_{r1}^r , v_{r2}^r e v_{r3}^r são determinadas pelos estados das chaves q_{a1} , q_{a2} e q_{a3} , do conversor A. O conversor trifásico é composto por seis chaves às quais se atribui valores binários, $q_{ak} = 0$ para chave aberta e $q_{ak} = 1$ para chave fechada, com $k = 1, 2$ e 3 . Desta forma as tensões nas fases do rotor são dadas por:

$$v_{r1}^s = v_{a10}^s - v_{n10} \quad (4.1)$$

$$v_{r2}^s = v_{a20}^s - v_{n10} \quad (4.2)$$

$$v_{r3}^s = v_{a30}^s - v_{n10} \quad (4.3)$$

onde v_{n0} é a diferença entre o neutro dos terminais do rotor e o ponto intermediário do banco de capacitores e esta é representada por 4.4:

$$v_{n0} = \frac{1}{3} (v_{a10}^s + v_{a20}^s + v_{a30}^s) \quad (4.4)$$

e v_{a10}^s , v_{a20}^s e v_{a30}^s são as tensões de pólo do conversor A dadas por:

$$v_{a10}^s = (2q_{a1} - 1) \frac{v_c}{2} \quad (4.5)$$

$$v_{a20}^s = (2q_{a2} - 1) \frac{v_c}{2} \quad (4.6)$$

$$v_{a30}^s = (2q_{a3} - 1) \frac{v_c}{2} \quad (4.7)$$

4.2.2 Conversor B

No conversor B, estão ligadas três fases do grid de alimentação através das indutâncias de filtro l_f que têm como função filtrar os harmônicos de corrente de ordem alta. As tensões v_{f1}^s , v_{f2}^s e v_{f3}^s nas indutâncias do filtro trifásico l_f , são determinadas pelos estados das chaves q_{b1} , q_{b2} e q_{b3} do conversor B. De maneira análoga ao conversor A, q_{bk} podem assumir valores binários para representar os estados das chaves, assim, as tensões, no filtro trifásico l_f , são dadas por:

$$v_{f1}^s = -v_{g1} + v_{b10}^s - v_{n20} \quad (4.8)$$

$$v_{f2}^s = -v_{g2} + v_{b20}^s - v_{n20} \quad (4.9)$$

$$v_{f3}^s = -v_{g3} + v_{b30}^s - v_{n20} \quad (4.10)$$

onde v_{n20} é a tensão entre o neutro do grid de alimentação e o ponto central do banco de capacitores, sendo representado pela equação (4.11):

$$v_{n20} = \frac{1}{3} (v_{b10}^s + v_{b20}^s + v_{b30}^s) \quad (4.11)$$

e v_{b10}^s , v_{b20}^s e v_{b30}^s são as tensões de pólo do conversor B dadas por:

$$v_{b10}^s = (2q_{b1} - 1) \frac{v_c}{2} \quad (4.12)$$

$$v_{b20}^s = (2q_{b2} - 1) \frac{v_c}{2} \quad (4.13)$$

$$v_{b30}^s = (2q_{b3} - 1) \frac{v_c}{2} \quad (4.14)$$

4.3 Controle PWM

Estratégias de modulação por largura de pulso (PWM) [5] podem ser empregadas como forma de gerar os sinais de comandos das chaves de potência de acordo com as tensões desejadas. Estas estratégias são baseadas nas tensões de pólo de referência do conversor.

4.3.1 Conversor A

As tensões de pólo de referência utilizadas pela técnica de modulação PWM podem ser obtidas diretamente, a partir das tensões de referência do rotor v_{r1}^{s*} , v_{r2}^{s*} , e v_{r3}^{s*} , desejadas nos terminais do rotor.

$$v_{a10}^{s*} = v_{r1}^{s*} + v_{ha} \quad (4.15)$$

$$v_{a20}^{s*} = v_{r2}^{s*} + v_{ha} \quad (4.16)$$

$$v_{a30}^{s*} = v_{r3}^{s*} + v_{ha} \quad (4.17)$$

As tensões v_{r1}^{s*} , v_{r2}^{s*} , e v_{r3}^{s*} são calculadas, a partir do controle de campo orientado, que será discutido no próximo capítulo deste trabalho. A determinação das tensões de pólo de referência pode ser resolvida como no caso de inversor trifásico convencional [4], tendo os seguintes passos:

Passo 1: definir as tensões máximas e mínimas ($v_{r\max}^*$ e $v_{r\min}^*$), onde $v_{r\max}^* = \max\{V_{r135}\}$ e $v_{r\min}^* = \min\{V_{r135}\}$, com V_{r135} dado por $V_{r135} = \{v_{r1}^{s*}, v_{r2}^{s*}, v_{r3}^{s*}\}$;

Passo 2: testar se $|v_{r\max}^* - v_{r\min}^*| < v_c$;

Passo 3: calcular a tensão v_{ha} , a partir de (3.10) em função do fator de distribuição μ , para $\mu = 0.5$;

$$v_{ha} = v_c (0.5 - \mu) - (1 - \mu) v_{r\max}^* - \mu v_{r\min}^* \quad (4.18)$$

Passo 4: determina-se, então, as tensões v_{a10}^{s*} , v_{a20}^{s*} e v_{a30}^{s*} .

Conhecendo-se as tensões v_{a10}^{s*} , v_{a20}^{s*} e v_{a30}^{s*} , pode-se determinar as larguras de pulso τ_{a1} , τ_{a2} e τ_{a3} , período de tempo nas quais as chaves q_{a1} , q_{a2} e q_{a3} ficam fechadas, durante o período de amostragem T .

$$\tau_{a1} = \left(\frac{v_{a10}^{s*}}{v_c} + \frac{1}{2} \right) T \quad (4.19)$$

$$\tau_{a2} = \left(\frac{v_{a20}^{s*}}{v_c} + \frac{1}{2} \right) T \quad (4.20)$$

$$\tau_{a3} = \left(\frac{v_{a30}^{s*}}{v_c} + \frac{1}{2} \right) T \quad (4.21)$$

4.3.2 Conversor B

As tensões de pólo v_{b10}^{s*} , v_{b20}^{s*} e v_{b30}^{s*} de referências utilizada pela técnica de modulação PWM, no conversor B, são obtidas diretamente a partir da diferença de tensão do grid e a tensão do filtro, definida por: $v_{f1}^{s*} - v_{g1}$, $v_{f2}^{s*} - v_{g2}$, $v_{f3} - v_{g3}$, onde as tensões

v_{f1}^{s*} , v_{f2}^{s*} e v_{f3}^{s*} são as tensões de filtro desejadas na entrada do conversor B. Desta forma, as tensões de pólo de referência são definidas por:

$$v_{b10}^{s*} = v_{f1}^{s*} - v_{g1} + v_{hb}^* \quad (4.22)$$

$$v_{b20}^{s*} = v_{f2}^{s*} - v_{g2} + v_{hb}^* \quad (4.23)$$

$$v_{b30}^{s*} = v_{f3}^{s*} - v_{g3} + v_{hb}^* \quad (4.24)$$

As tensões v_{g1} , v_{g2} e v_{g3} são conhecidas e v_{f1}^{s*} , v_{f2}^{s*} e v_{f3}^{s*} são determinadas a partir do controle da tensão de barramento CC, que será discutido mais adiante, enquanto as tensões de pólo são determinadas, de acordo com o algoritmo anteriormente visto para conversor A com as seguintes modificações:

No passo 1: calcular $v_{b\max}^*$ e $v_{b\min}^*$, onde $v_{b\max}^* = \max \{V_{b123}\}$ e $v_{b\min}^* = \min \{V_{b123}\}$ com V_{b123} definido por $V_{b123} = \{v_{f1}^{s*} - v_{g1}, v_{f2}^{s*} - v_{g2}, v_{f3} - v_{g3}^*\}$;

Passo 3: calcular a tensão v_{hb} , a partir de (4.25) em função do fator de distribuição μ , para $\mu = 0.5$;

$$v_{hb} = v_c (0.5 - \mu) - (1 - \mu) v_{b\max}^* - \mu v_{b\min}^* \quad (4.25)$$

No passo 4: determina as tensões v_{b10}^{s*} , v_{b20}^{s*} e v_{b30}^{s*} ;

Conhecendo-se as tensões v_{b10}^{s*} , v_{b20}^{s*} e v_{b30}^{s*} , pode-se determinar as larguras de pulso τ_{b1} , τ_{b2} e τ_{b3} , nas quais as chaves q_{b1} , q_{b2} e q_{b3} ficam fechadas para a síntese das tensões de referência desejadas durante o período de amostragem T .

$$\tau_{b1} = \left(\frac{v_{b10}^{s*}}{v_c} + \frac{1}{2} \right) T \quad (4.26)$$

$$\tau_{b2} = \left(\frac{v_{b20}^{s*}}{v_c} + \frac{1}{2} \right) T \quad (4.27)$$

$$\tau_{b3} = \left(\frac{v_{b30}^{s*}}{v_c} + \frac{1}{2} \right) T \quad (4.28)$$

4.4 Corrente no Banco de Capacitores

A corrente instantânea i_c , no banco de capacitores, é composta pela corrente i_{ca} , que é contribuição do conversor A, mais a corrente i_{cb} , que é contribuição do conversor B. Logo i_c é dado por:

$$i_c = i_{ca} + i_{cb} \quad (4.29)$$

com:

$$i_{ca} = -(q_{a1}i_{r1}^s + q_{a2}i_{r2}^s + q_{a3}i_{r3}^s) \quad (4.30)$$

$$i_{cb} = (q_{b1}i_{f1}^s + q_{b2}i_{f2}^s + q_{b3}i_{f3}^s) \quad (4.31)$$

onde i_{f1}^s , i_{f2}^s e i_{f3}^s são as correntes nas indutâncias l_f , e i_{r1}^s , i_{r2}^s e i_{r3}^s são as correntes, nas bobinas do rotor da máquina de indução.

As tensões de pólo para o conversor A são definidas por (4.15, 4.16 e 4.17), os períodos de chaveamento por (4.19, 4.20 e 4.21), assim:

$$q_{a1} = \frac{\tau_{a1}}{T} \quad (4.32)$$

$$q_{a2} = \frac{\tau_{a2}}{T} \quad (4.33)$$

$$q_{a3} = \frac{\tau_{a3}}{T} \quad (4.34)$$

Para o conversor B, as tensões de pólos são definidas por (4.22, 4.23 e 4.24), os períodos de chaveamento, por (4.26, 4.27 e 4.28):

$$q_{b1} = \frac{\tau_{b1}}{T} \quad (4.35)$$

$$q_{b2} = \frac{\tau_{b2}}{T} \quad (4.36)$$

$$q_{b3} = \frac{\tau_{b3}}{T} \quad (4.37)$$

Tomando como base a largura de pulso, as correntes médias (\bar{i}_{ca} e \bar{i}_{cb}) podem ser escritas em função do período de amostragem, substituindo (4.32, 4.33 e 4.34) em (4.30) e (4.35, 4.36 e 4.37) em (4.31), encontrando, dessa forma as seguintes correntes:

$$\bar{i}_{ca} = \left(\frac{\tau_{a1}}{T} \bar{i}_{r1} + \frac{\tau_{a2}}{T} \bar{i}_{r2} + \frac{\tau_{a3}}{T} \bar{i}_{r3} \right) + \tilde{i}_{ca} \quad (4.38)$$

$$\bar{i}_{cb} = - \left(\frac{\tau_{b1}}{T} \bar{i}_{f1} + \frac{\tau_{b2}}{T} \bar{i}_{f2} + \frac{\tau_{b3}}{T} \bar{i}_{f3} \right) + \tilde{i}_{cb} \quad (4.39)$$

onde \tilde{i}_{ca} e \tilde{i}_{cb} são os termos CA devido principalmente à frequência de chaveamento das correntes [3].

Fazendo a substituição dos valores de τ_{a1} , τ_{a2} , τ_{a3} , τ_{b1} , τ_{b2} e τ_{b3} em (4.38) e (4.39), resulta em:

$$\bar{i}_{ca} = \left(\frac{v_{a10}^{s*}}{v_c^*} \bar{i}_{r1} + \frac{v_{a20}^{s*}}{v_c^*} \bar{i}_{r2} + \frac{v_{a30}^{s*}}{v_c^*} \bar{i}_{r3} + \bar{i}_{r1} + \bar{i}_{r2} + \bar{i}_{r3} \right) + \tilde{i}_{ca} \quad (4.40)$$

$$\bar{i}_{cb} = - \left(\frac{v_{b10}^{s*}}{v_c^*} \bar{i}_{f1} + \frac{v_{b20}^{s*}}{v_c^*} \bar{i}_{f2} + \frac{v_{b30}^{s*}}{v_c^*} \bar{i}_{f3} + \bar{i}_{f1} + \bar{i}_{f2} + \bar{i}_{f3} \right) + \tilde{i}_{cb} \quad (4.41)$$

onde $\bar{i}_{r1} + \bar{i}_{r2} + \bar{i}_{r3} = 0$ e $\bar{i}_{f1} + \bar{i}_{f2} + \bar{i}_{f3} = 0$, pois são correntes equilibradas, desta forma, (4.40) e (4.41) podem ser escritas da seguinte maneira:

$$\bar{i}_{ca} = p_{ca}^* \frac{1}{v_c^*} + \tilde{i}_{ca} \quad (4.42)$$

$$\bar{i}_{cb} = -p_{cb}^* \frac{1}{v_c^*} + \tilde{i}_{cb} \quad (4.43)$$

De (4.42) e (4.43), os termos p_{ca}^* e p_{cb}^* correspondem, respectivamente à potência fornecida pelo rotor do gerador de indução ao banco de capacitores e à potência fornecida pelo banco de capacitores a rede de alimentação e/ou a carga.

Substituindo (4.42) e (4.43) em (4.29) tem-se:

$$i_c = (p_{ca}^* - p_{cb}^*) \frac{1}{v_c^*} + \tilde{i}_{cab} \quad (4.44)$$

Como a potência média p_{ca} é igual a potência média p_{cb} , a componente CA da corrente do banco de capacitores tem somente as componentes de frequência de chaveamento.

Capítulo 5

Estratégia de Controle

5.1 Introdução

As estratégias de controle, por orientação pelo campo, podem ser classificadas como estratégias vetorial ou escalar. Na estratégia vetorial, o controle é feito principalmente a partir das componentes dq . Na estratégia escalar, controla-se a amplitude e a frequência da grandeza. Neste tipo de estratégia, faz-se o controle do fluxo e do conjugado da máquina, otimizando, assim, a potência gerada pelo sistema.

Há dois tipos de controles do conjugado: *i*) controle em quadratura, onde a variável aplicada para o controle do conjugado está em quadratura com o fluxo, *ii*) e controle por escorregamento, onde o controle do conjugado é feito a partir da frequência de escorregamento da máquina.

O fluxo empregado para o controle da máquina de indução pode ser o fluxo do estator, ou do rotor ou do entreferro.

Neste trabalho, o conversor A é controlado utilizando a estratégia de orientação pelo campo, com a qual se controlam as correntes do rotor a partir do fluxo do estator e do conjugado de referência, e através do conversor B, faz-se o controle da tensão v_e , no banco de capacitores, e do fator de potência da corrente do grid.

5.2 Controle por Orientação pelo Campo

O conversor A é controlado aplicando a estratégia de controle por orientação pelo campo. As correntes i_{rdq}^g do rotor são controladas a partir do fluxo do estator e do conjugado eletromagnético, otimizando a potência gerada pelo sistema. Desta forma, de (3.12), pode-se escrever as componentes das correntes do estator i_{sdq}^g em função do fluxo do estator λ_{sdq}^g e das correntes do rotor i_{rdq}^g , isto é

$$i_{sdq}^g = \frac{1}{l_s} \lambda_{sdq}^g - \frac{l_m}{l_s} i_{rdq}^g \quad (5.1)$$

De (3.10), a tensão do estator é definida em função do fluxo e da corrente do estator. Assim, substituindo (5.1) em (3.10), encontra-se:

$$\frac{l_m}{\tau_s} i_{rdq}^g = \frac{1}{\tau_s} \lambda_{sdq}^g + j\omega_g \lambda_{sdq}^g + \frac{d}{dt} \lambda_{sdq}^g - v_{sdq}^g \quad (5.2)$$

de (5.2) tem-se a relação entre a corrente do rotor i_{rdq}^g e do fluxo do estator λ_{sdq}^g , onde a tensão do estator v_{sdq}^g , é uma perturbação e τ_s é a constante de tempo do estator definida por $\tau_s = \frac{l_s}{r_s}$.

Segundo [5], o conjugado é definido por:

$$c_e = pl_m \text{Im} (i_s^g i_r^{g*}) \quad (5.3)$$

onde Im é a parte imaginária das correntes e i_r^{g*} é o complexo conjugado das correntes do rotor. Substituindo (5.1), tem-se:

$$\begin{aligned} c_e &= pl_m \text{Im} \left(\left(\frac{1}{l_s} \lambda_{sdq}^g - \frac{l_m}{l_s} i_r^g \right) i_r^{g*} \right) \\ c_e &= p \frac{l_m}{l_s} \text{Im} (\lambda_{sdq}^g i_r^{g*} - l_m i_r^g i_r^{g*}) \\ c_e &= p \frac{l_m}{l_s} (\lambda_{sq}^g i_{rd}^g - \lambda_{sd}^g i_{rq}^g) \end{aligned} \quad (5.4)$$

Na Figura 5.1, apresenta-se o diagrama vetorial dos vetores do fluxo estatórico (λ_s), visto no referencial estatórico (fase s_1), também são indicados neste diagrama o eixo magnético do rotor (r_1) e o eixo d .

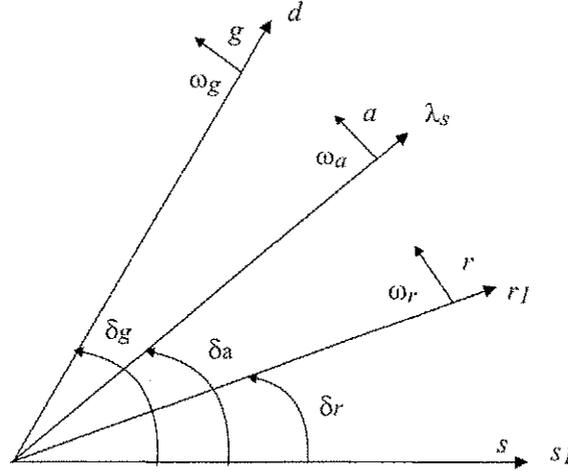


Figura 5.1: Diagrama vetorial instantâneo da máquina

Desta forma, o modelo dinâmico, que relaciona as correntes do rotor e o fluxo do estator no referencial do fluxo estatórico, é obtido a partir de (5.3) e (5.4), fazendo $\lambda_{sd}^a = \lambda_s$, $\lambda_{sq}^a = 0$ e $w_g = w_a$.

$$\frac{l_m}{\tau_s} i_{rd}^a = \frac{1}{\tau_s} \lambda_s + \frac{d}{dt} \lambda_s - v_{sd}^a \quad (5.5)$$

$$\frac{l_m}{\tau_s} i_{rq}^a = w_a \lambda_s - v_{sq}^a \quad (5.6)$$

$$c_e = -p \frac{l_m}{l_s} \lambda_s i_{rq}^a \quad (5.7)$$

Baseado nas equações (5.5), (5.6) e (5.7), obtém-se o diagrama de blocos da Figura 5.2, para o esquema de controle de malha fechada. De (5.6), pode-se escrever i_{rq}^a em função do conjugado de referência e de (5.5), observa-se que o fluxo λ_s^a é controlado através de i_{sd}^a , independente de i_{sq}^a .

Do diagrama de controle, o controle do fluxo λ_s é feito a partir de um controlador PI, representado pelo bloco G_{piid} , determinando a corrente do rotor de referência i_{rd}^a .

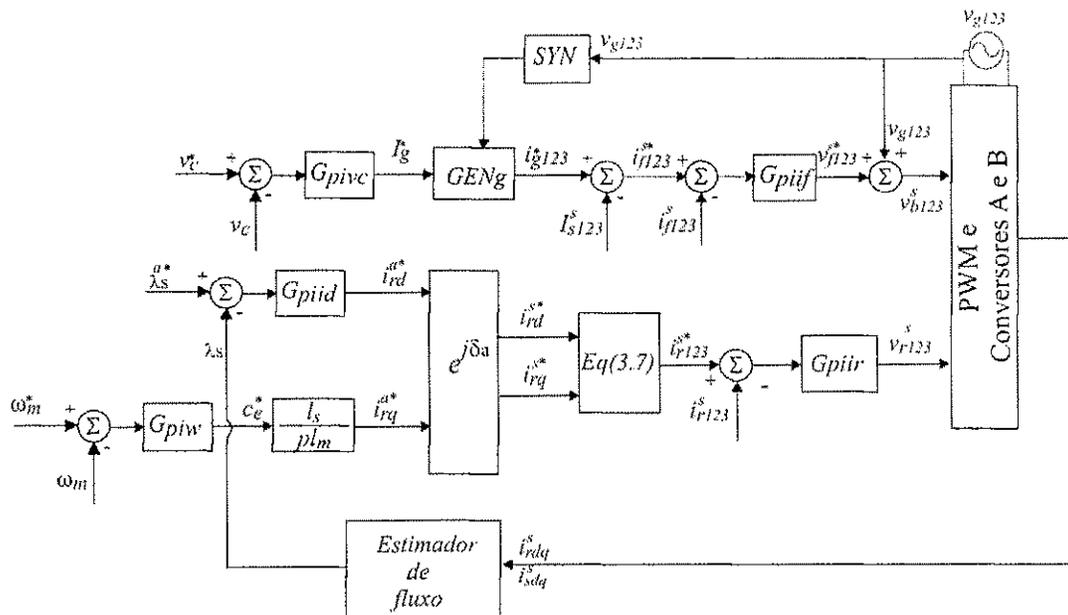


Figura 5.2: Diagrama de controle .

A componente da corrente i_{rq}^a de referência é determinada diretamente do conjugado de referência (5.7), e este é determinado pelo controlador de velocidade G_{piw} .

Definidas as correntes dq do rotor no referencial do fluxo estático, determina-se as correntes dq do rotor no referencial do estator, a partir do bloco $e^{j\delta a}$ na Figura 5.2.

Definidas as correntes dq de referência no rotor, determinam-se as componentes das correntes i_{r1}^{s*} , i_{r2}^{s*} e i_{r3}^{s*} do rotor de referência no referencial estático, que são controladas pelos controladores PI modificados, representado pelo bloco G_{piir} . A saída deste controlador gera as tensões de referência v_{r1}^{s*} , v_{r2}^{s*} e v_{r3}^{s*} do rotor.

5.3 Controle da Tensão de Barramento CC e do Fator de Potência

O diagrama de blocos da Figura (5.2), representa também o esquema de controle para o conversor B. A tensão de barramento v_c , no banco de capacitores, é feita a partir de um controlador PI, representado pelo bloco G_{pivc} . Este controlador define

a amplitude da corrente I_g^* nas três fases do grid. É desejável que se tenha um fator de potência unitário. Desta forma, as correntes de referência i_{g1}^* , i_{g2}^* e i_{g3}^* devem ser sincronizadas com as tensões do grid v_{g1} , v_{g2} e v_{g3} , respectivamente. Isto é obtido via bloco SYNg (que determina a fase das tensões da fonte) e pelo bloco GENg. A partir das correntes de referência para da rede trifásica i_{g123}^* , geram-se as correntes de referência no filtro i_f , i_{f1}^{s*} , i_{f2}^{s*} e i_{f3}^{s*} , que são obtidas de (5.7-5.8).

$$i_{f1}^{s*} = i_{g1}^* - i_{s1} \quad (5.8)$$

$$i_{f2}^{s*} = i_{g2}^* - i_{s2} \quad (5.9)$$

$$i_{f3}^{s*} = i_{g3}^* - i_{s3} \quad (5.10)$$

Com as correntes no filtro, aplica-se o controle de corrente, utilizando um controlador PI modificado, também conhecido como controlador de sequência positiva e negativa, [3], representado pelo diagrama de bloco G_{piif} , gerando as tensões v_{f1}^{s*} , v_{f2}^{s*} e v_{f3}^{s*} de referência.

Capítulo 6

Resultados de Simulação

6.1 Introdução

Os resultados deste trabalho foram obtidos a partir da simulação digital no ambiente $C++$, que gera os vetores de pontos das variáveis desejadas, armazenando em um arquivo .mat. Com auxílio do MatLab[®], pode-se visualizar as curvas geradas na simulação. Neste capítulo, serão apresentados os resultados de simulação digital para o sistema de geração de energia a partir de um gerador de indução trifásico com rotor bobinado.

6.2 Resultados de Simulação

A seguir serão apresentados os resultados de simulação para o sistema de geração proposto, representado pela Figura 6.1. A estratégia de controle utilizada é representada pelo diagrama de blocos da Figura 5.2. O conversor A é controlado a partir do fluxo e do conjugado de referência, determinando as correntes de referência do rotor. O conversor B é controlado pela tensão v_c , desejada no banco de capacitores, e do fator de potência da corrente do grid (i_{g123}).

Na simulação, a frequência de chaveamento aplicada foi de $10kHz$, e a capacitância do barramento CC , de $3500\mu F$. O filtro l_f é um filtro de primeira ordem com resistência $r_f = 1.0\Omega$ e sua indutância, $l_f = 20mH$. Na simulação, faz-se o

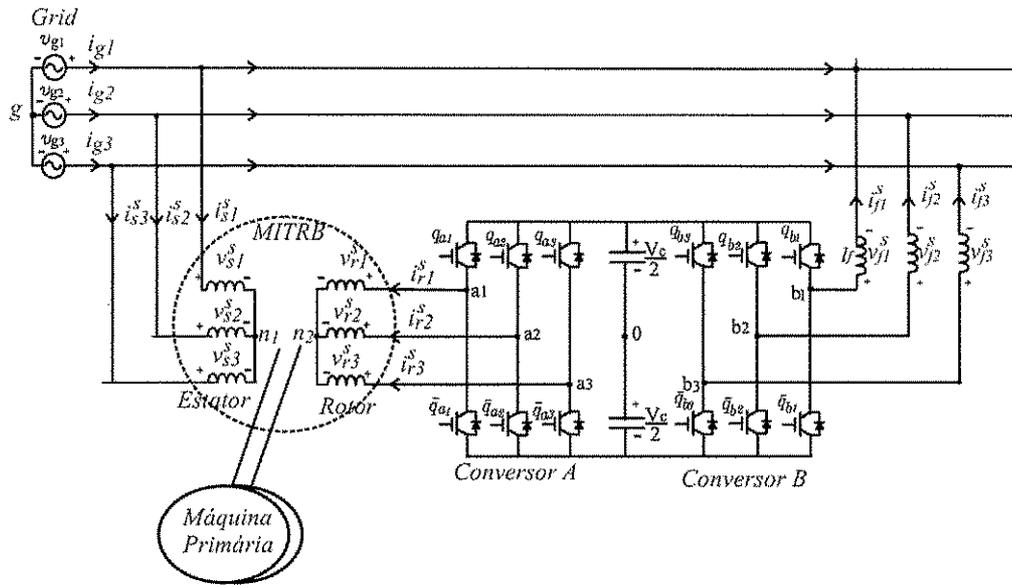


Figura 6.1: Sistema de geração proposto

controle da tensão de barramento CC, para $v_c^* = 1550V$, o conjugado de referência é determinado a partir do controle de velocidade, para velocidade de referência $w_m^* = 440rad/s$, e o fluxo e referência, aplicado é $\lambda_s^* = 1.062Wb$.

Da Figura 6.2 a Figura 6.11, estão apresentados os resultados de simulação do sistema proposto: Correntes de fase i_{s123}^s do estator, Figura 6.2, correntes de fase i_{r123}^s do rotor, Figura 6.3, correntes dq do estator, Figura 6.4, correntes dq do rotor, Figura 6.5, velocidade w_m , Figura 6.6, conjugado, Figura 6.7, fluxo do estator, Figura 6.8, correntes i_{f123}^s e i_{f123}^{s*} no filtro l_f , Figura 6.9, as correntes i_{g1} e i_{g2} e tensão do v_{g1} do grid, Figura 6.10, a tensão v_c , no banco de capacitores, Figura 6.11, potência do grid, a potência do estator, a potência do rotor e dos capacitores, Figura 6.12 e a potência nos conversores, Figura 6.13.

Analisando-se os resultados obtidos, as correntes da máquina estão todas equilibradas, tanto a do estator como a do rotor. O fluxo ficou controlado, com uma pequena faixa de atuação. O controle de conjugado, foi eficaz, assim como o controle da tensão de barramento. Na Figura 6.10, observa-se que o fator de potência é unitário. Contudo, o sentido da corrente é invertido em relação à tensão do grid, isto porque toda a potência gerada é mandada para o grid.

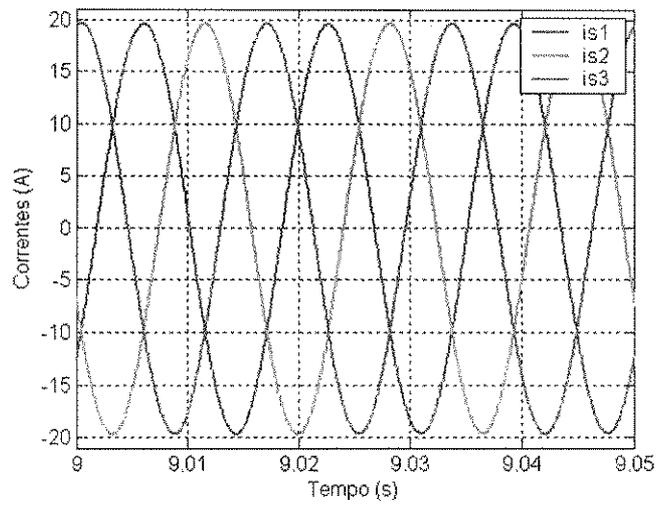


Figura 6.2: Correntes de Fase 1,2 e 3 do estator.

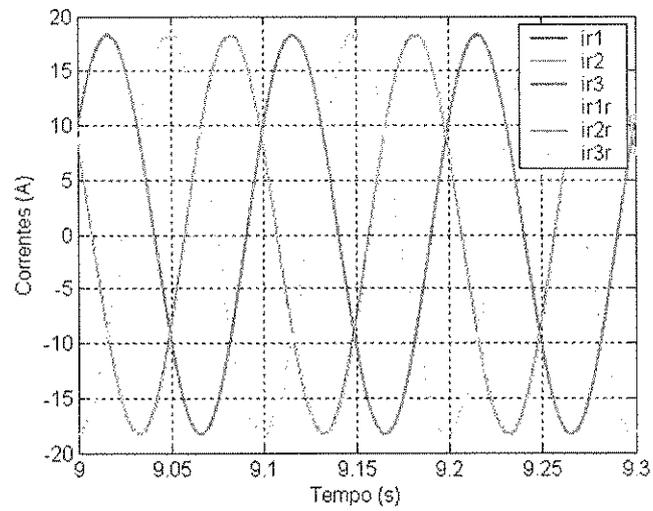


Figura 6.3: Correntes de fase 1, 2 e 3 e de referência do rotor.

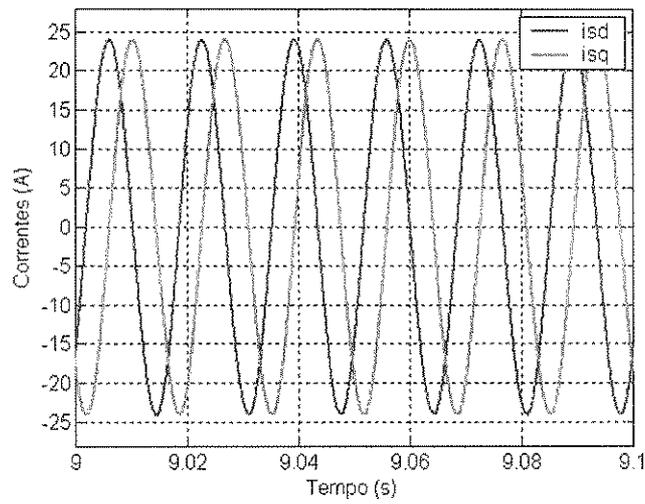


Figura 6.4: Correntes dq do estator.

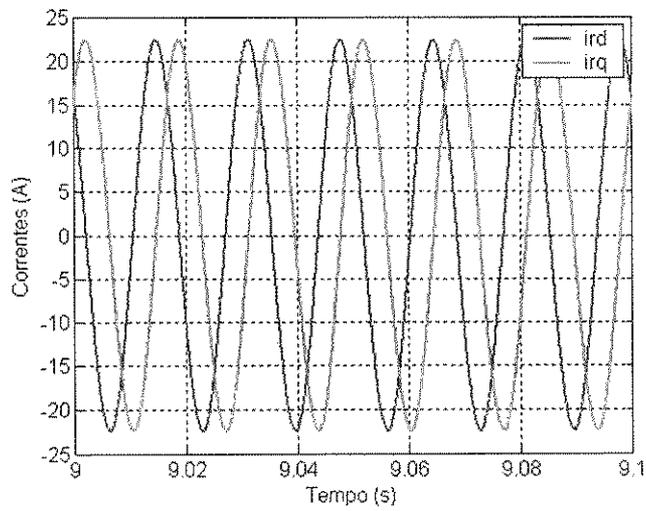


Figura 6.5: Correntes dq do rotor.

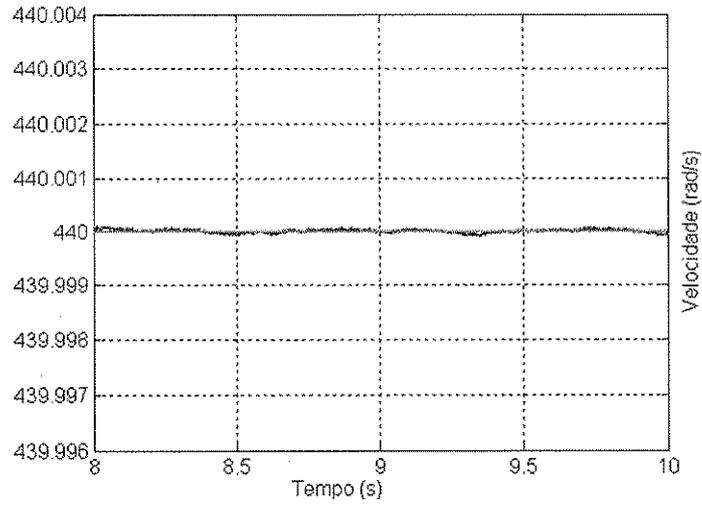


Figura 6.6: Velocidade w_m .

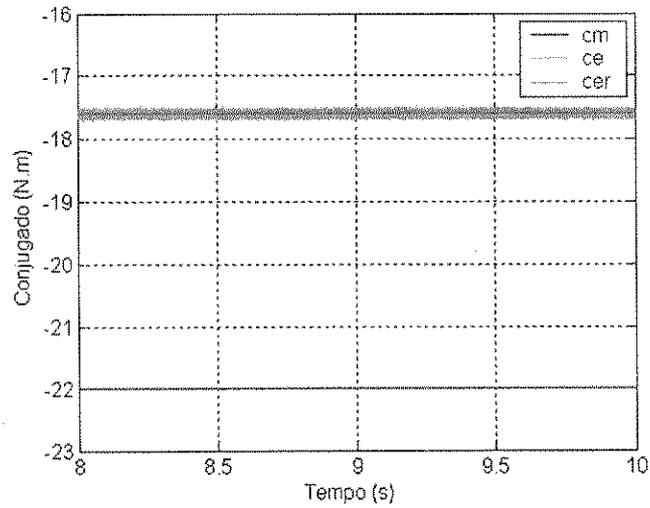


Figura 6.7: Conjugados eletromagnético c_e e c_e^* e o conjugado mecânico c_m .

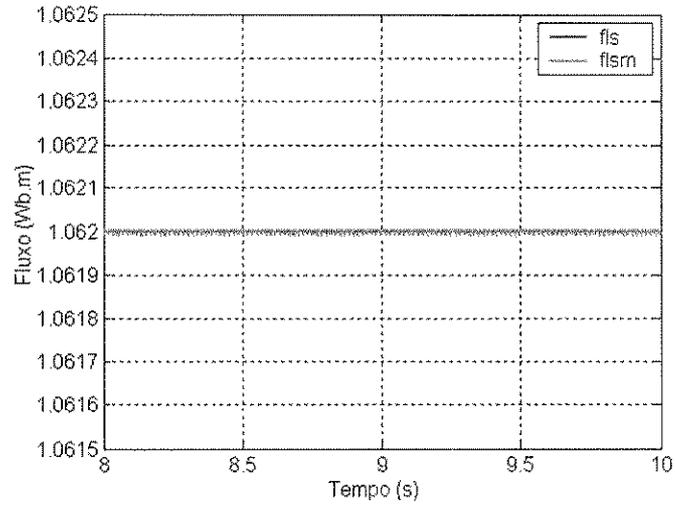


Figura 6.8: Fluxos do estator λ_s e λ_s^* .

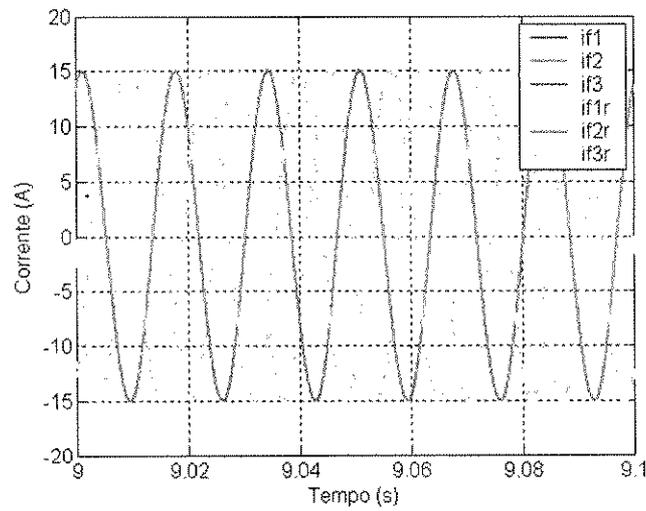


Figura 6.9: Correntes i_{f123}^s do filtro l_f .

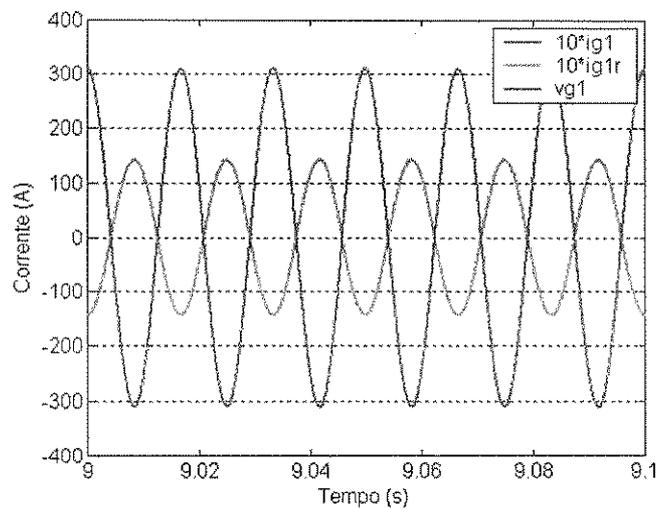


Figura 6.10: Correntes i_{g1} e i_{g1}^* e tensão v_{g1} .

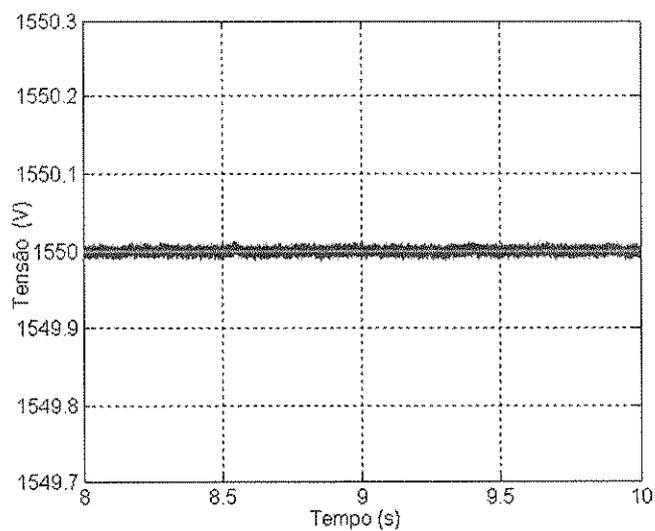


Figura 6.11: Tensões v_c e v_c^* do banco de capacitores.

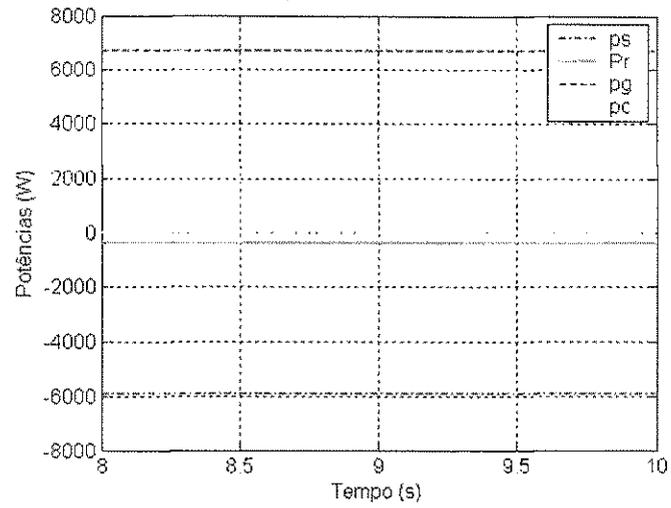


Figura 6.12: Potências do Grid, do estator, do rotor e do banco e capacitores.

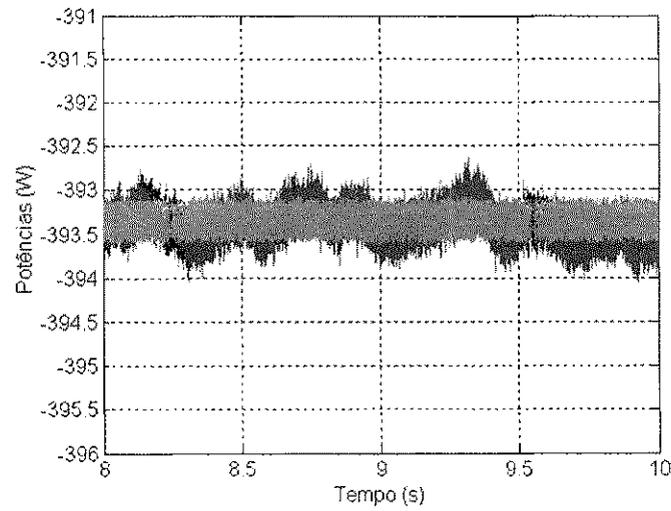


Figura 6.13: Potências dos conversores A e B.

Capítulo 7

CONCLUSÕES

No Brasil as pesquisas na geração de energia eólica, estão apenas se iniciando, contudo, com apoio do PROINFA ocorrerá um grande avanço, com a potência gerada passando de 22MW para 1100MW. Dos sistemas de geração proposto na literatura destaca-se a aplicação do motor de indução com rotor bobinado, pois, há uma redução na potência do conversor.

Do sistema proposto, é possível fazer seu controle, utilizando a estratégia de orientação pelo campo, controlando as correntes do rotor a partir do fluxo e do conjugado, otimizando, dessa forma, a potência gerada. No entanto, a faixa do fluxo em que o sistema pode atuar é muito pequena, e sua variação ocasiona perdas para o sistema de geração proposto, porque, as correntes do rotor e estator tornam-se bastante elevadas, sendo, portanto, inadequadas para seu funcionamento.

Dos resultados apresentados, para MITRB operando em regime permanente, obteve-se um bom desempenho, porque, as perdas do sistema foram pequenas em relação à potência gerada. Desta forma, por não possuir carga, toda potência gerada pelo gerador é transferida para o grid. A potência do conversor é pequena, cerca de 7% em relação da potência gerada pelo sistema, pois o rotor é a parte de baixa potência da MITRB.

Bibliografia

- [1] Aneel. Atlas de energia eólica do Brasil. Atlas, Aneel, 2005.
- [2] Fabio Galizia Ribeiro de Campos. *Geração de Energia a Partir de uma Fonte Eólica com Gerador Assíncrono Conectado a Conversor Estático Duplo*. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, SP, 2004.
- [3] Talvanes Menezes de Oliveira. *Conversores Estático com Controle Digital para Aplicação em Sistemas Monofásico*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Paraíba, Campina Grande, PB, 2001.
- [4] Cursino Brandão Jacobina e Antonio Marcus N. de Lima. Acionamento de máquina de alto desempenho. Apostila, UFPB, Campina Grande-PB, 2002.
- [5] Cursino Brandão Jacobina. Máquina de corrente alternada. Apostila, UFPB, Campina Grande-PB, 1990.
- [6] L. A Pereira. Introdução à máquina de indução. Apostila, PUCRS-DEEE, Rio Grande do Sul, 1999.
- [7] Pedro André Carvalho Rosas and Ana Isabel Estanqueiro. Guia de projeto elétrico de centrais eólicas. Projeto elétrico e impacto de centrais eólicas na rede elétrica, CBEE, Recife, 2003.
- [8] Paresh C. Sen. *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. IEEE, 2ª edição edition, 1997.

- [9] S. R. Silva. Energia eólica. Relatório, Universidade Federal de Minas Gerais, 2000.
- [10] A. Vianna, L. S. R. Vieira, and M. V. G Nascimento. Manual de aplicação de sistemas descentralizado de geração de energia elé Relatório técnico, CEPTEL, 2000.