

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**MÉTODO ANALÍTICO PARA ANÁLISE DA
ESTABILIDADE DO GERADOR ASSÍNCRONO
ATRAVÉS DO MONITORAMENTO DA TENSÃO**

João Luiz Bergamo Zamperin

Laurence Duarte Colvara

Orientador

Ilha Solteira – SP, Fevereiro de 2011

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**“Método Analítico para análise da Estabilidade do Gerador
Assíncrono Através do Monitoramento da Tensão”**

JOÃO LUIZ BERGAMO ZAMPERIN

Orientador: Prof. Dr. Laurence Duarte Colvara

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia - UNESP – Campus de Ilha
Solteira, para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Conhecimento: Automação.

Ilha Solteira – SP
Fevereiro/2011

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

Z26m

Zamperin, João Luiz Bergamo.

Método analítico para análise da estabilidade do gerador assíncrono através do monitoramento da tensão / João Luiz Bergamo Zamperin. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2011
92 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2011

Orientador: Laurence Duarte Colvara

Inclui bibliografia

1. Compensação dinâmica de reativo. 2. Estabilidade transitória.
3. Geração eólica. 4. Gerador de indução. 5. Método analítico.

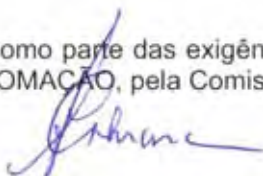
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Método analítico para análise da estabilidade do gerador assíncrono através do monitoramento da tensão

AUTOR: JOÃO LUIZ BERGAMO ZAMPERIN

ORIENTADOR: Prof. Dr. LAURENCE DUARTE COLVARA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica ,
Área: AUTOMACÃO, pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. LAURENCE DUARTE COLVARA
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. DIONIZIO PASCHOARELI JUNIOR
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. WALMIR DE FREITAS FILHO
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica / Universidade Estadual de Campinas

Data da realização: 25 de fevereiro de 2011.

*Dedico este trabalho aos meus pais,
por serem uma fonte inesgotável
de incentivo a minha vida.*

Agradecimentos

Acima de tudo agradeço a Deus, por estar sempre ao meu lado, permitindo compreender a razão de se viver.

Ao meu pai João e a minha mãe Maria, que se tornaram uma referência na minha vida, aos quais me repassaram ensinamentos o suficiente para ultrapassar obstáculos e conquistar os meus próprios objetivos, com a simples convicção de ter vontade de agir, obrigado pai e mãe vocês sempre foram a base em minha vida.

Ao Professor Laurence Duarte Colvara, por sua valiosa orientação e por todo ensinamento repassado ao longo deste trabalho.

Aos professores Dionízio Paschoareli Júnior e Percival Bueno de Araujo, pelas informações que contribuíram significativamente para o enriquecimento deste trabalho.

À Rose, pelo companheirismo, incentivo, paciência e ao amor incondicional.

As inúmeras orações da nona Thereza da Marlene, tio Zé, tia Edna e tia Marli. E ao grande carinho e incentivo da minha adorada irmã Ana Carolina.

Aos meus grandes amigos, Eduardo Forte e Ivan Brandt, pelo companheirismo, nossa amizade sempre superou momentos difíceis. Ao Erick e Marlon com que tive o privilégio de vivenciar grandes momentos nestes anos de convivência.

Aos meus amigos de departamento e de laboratório com quem convivi a todo o momento na conhecida sala externa do antigo departamento de engenharia elétrica, que atualmente se tornou o GAESSE, obrigado a eles: Ápio, Adriano Cardoso, André Luiz, João Deroco, Marcos Furini, Marcão, Maxwell, Ricardo Moura, muito obrigado pela troca constante de conhecimentos.

Ao Mauricio B. C. Salles, João P. V. Viera e ao Vandilberto P. Pinto que contribuíram no desenvolvimento do trabalho, com informações importantíssimas.

Ao apoio financeiro da CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

Obrigado aos críticos, para evolução desta escrita.

“Dêem-me um ponto de apoio e levantarei o mundo.”

Galileu Galilei

Resumo

Propõe-se neste trabalho o desenvolvimento de uma metodologia analítica para análise do desempenho dinâmico/transitório dos geradores de indução conectados ao sistema de energia elétrica. O método proposto para o estudo da estabilidade das máquinas de indução baseia-se no monitoramento da tensão interna E' durante o período transitório do sistema, a qual pode comprometer a capacidade de transmissão de potência na linha, com consequente colapso da estabilidade da máquina. Deste modo, faz-se a análise do desempenho transitório da máquina pela observação da grandeza em que efetivamente reside a causa da instabilidade. O método desenvolvido foi validado por meio de simulações digitais, em duas configurações do sistema: o primeiro caso, desprezando o suporte de potência reativa, para efeito de análise nos estudos de estabilidade transitória. No segundo, é realizada a compensação dinâmica de potência reativa via SVC (Static Var Compensator). Neste caso, mesmo na presença do compensador variável de reativo, o método da tensão interna revelou-se capaz de avaliar novos limites de estabilidade para o sistema. Considerados os resultados obtidos, observa-se que o método proposto apresenta resultados suficientemente precisos para avaliar o comportamento dos geradores de indução conectados à rede elétrica.

Palavras chave: Compensação dinâmica de reativo. Estabilidade transitória. Geração eólica. Gerador de indução. Método analítico.

Abstract

This dissertation proposes the development of an analytical methodology for analysis of dynamic/transient performance of an induction generator connected to a bulk power system. The proposed method for studying the stability of induction machines is based on monitoring the internal voltage named E' since during the transient system, its magnitude may decrease and so causing degeneration of the transmission system capability, with consequent collapse of machine stability. Thus it is the analysis of transient performance of the machine by observing the variable that is actually the cause of instability. The analytical method was validated by means of digital simulations, in two system configurations: in the first case, no reactive support is considered, and the purpose is to analyse the machine transient stability itself. In the second, a reactive support is provided by means of the dynamic reactive compensation via SVC (Static Var Compensator). In this case, even in the presence of variable reactive compensator, the method of internal voltage proved to be able to properly assess new stability limits. The results so obtained lead to the indication that the proposed method results are accurate enough in order to evaluate the behavior of induction generators, connected to the power grid.

Keywords: Dynamic reactive compensation. Transient stability. Wind generation. Induction generator. Analytical method.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Capacidade global instalada de energia eólica de 1996 – 2010, (GWEC, 2011)	22
Figura 2.1 – Esquema de uma turbina eólica com gerador do tipo de indução (Reproduzida com permissão de Pinto (2007))	26
Figura 2.2 – Curvas dos $C_p \times \lambda$ para diferentes tipos de rotores eólicos	28
Figura 2.3 – Curvas $C_p(\lambda, \beta)$ em diversos valores de β .	29
Figura 2.4 – Representação das grandezas aerodinâmicas da pá da turbina eólica	31
Figura 2.5 – Sistema eólico de velocidade fixa com gerador SCIG	32
Figura 2.6 – Gerador eólico de velocidade variável equipado com gerador de indução Duplamente Alimentado (DFIG)	33
Figura 2.7 – Sistema eólico de velocidade variável com gerador síncrono de ímã permanente	34
Figura 3.1 – Enrolamentos do rotor e do estator da máquina de indução.	35
Figura 3.2 – Ilustrações da representação do SCIG	36
Figura 3.3 – Diagrama unifilar do gerador SCIG $\times$ BI (barra infinita).	38
Figura 3.4 – Diagrama fasorial do SCIG $\times$ BI em regime permanente	39
Figura 3.5 – Diagrama fasorial do SCIG $\times$ BI durante um transitório	41
Figura 3.6 – Ilustrações de representação do DFIG	42
Figura 3.7 – Estratégia de controle vetorial	44
Figura 3.8 – Malha do controle da tensão terminal, potência reativa	46
Figura 3.9 – Malha do controle da potência ativa/velocidade angular	46
Figura 3.10 – Princípio de funcionamento do DFIG	47
Figura 4.1 – Esquema elétrico do Static Var Compensator (SVC)	49
Figura 4.2 – Modelo dinâmico do SVC	50
Figura 4.3 – Curva característica $V_s \times I_{SVC}$ do SVC	50
Figura 4.4 – SCIG $\times$ BI com compensador shunt SVC	51
Figura 4.5 – Sistema equivalente da Figura 4.1	53
Figura 5.1 – Modelo equivalente da máquina de indução conectada a uma barra infinita	54

Figura 5.2 – Diagrama fasorial da SCIG × barra infinita.	55
Figura 5.3 – Os parâmetros (Tensão interna E' , ângulo θ , Máxima potência elétrica) que definem E'_{crit} que está no vértice da parábola.	56
Figura 5.4 – Curvas de potência transmitida com diferentes valores da tensão interna do gerador de indução em função do ângulo teta (θ)	57
Figura 5.5 – SMBI com medidores	59
Figura 5.6 – Sistema equivalente MBI com SVC	60
Figura 5.7 – Tensão interna crítica em função da susceptância do SVC, com uma e duas linhas de transmissão.	61
Figura 6.1 – Diagrama unifilar do SCIG × BI (barra infinita)	63
Figura 6.2 – Tensão terminal × tempo (pré-falta, falta, pós-falta)	64
Figura 6.3 – Potências × tempo	65
Figura 6.4 – Tensão interna E' do gerador: antes, durante e após o curto-circuito, identificando o limite da tensão E'_{crit}	66
Figura 6.5 – Velocidade do rotor (rad/s) em 3 estágios (pré-falta, falta, pós-falta)	67
Figura 6.6 – Vértice da parábola definido como E'_{crit}	68
Figura 6.7 – Conceito do critério da mínima tensão interna	69
Figura 6.8 – Determinação dos pontos de estabilidade, através do método da velocidade crítica	70
Figura 6.9 – SCIG × BI com SVC.....	71
Figura 6.10 – Tensão interna E' × tempo com t_{ch} -580ms	71
Figura 6.11 – Tensão terminal × tempo com t_{ch} -580ms	72
Figura 6.12 – ω_r (rad/s) × tempo	72
Figura 6.13 – Escorregamento × tempo	72
Figura 6.14 – Tensão interna E' × tempo com t_{ch} -590ms	73
Figura 6.15 – Tensão terminal × tempo com t_{ch} -590ms	74
Figura 6.16 – ω_r (rad/s) × tempo	75
Figura 6.17 – Escorregamento × tempo	75
Figura 6.18 – Corrente do SVC × tempo.....	76
Figura 6.19 – Variação da susceptância do SVC × tempo	76
Figura 6.20 – Tensão interna crítica em função da susceptância do SVC.....	77
Figura 6.21 – Tensão interna crítica × B_{SVC}	79
Figura 6.22 – Superfície evidenciando ao aumento do carregamento do sistema.....	80

Figura 6.23 – Superfície evidencia o movimento da tensão interna crítica com aumento do carregamento do sistema.....	81
Figura 6.24 – Avaliação da tensão interna determinando o tempo crítico com aumento do carregamento do sistema em 50%.....	82
Figura A.I.1 – Sistema gerador eólico ligado a uma barra infinita através de uma rede de transmissão (MOTA, 2006)	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Capacidade acumulativa de geração de energia eólica no Brasil (ANEEL, 2011; GWEC, 2011)	22
Tabela 6.1 – Análise do sistema com aumento do carregamento do sistema com e sem SVC	78
Tabela 6.2 – Valores da tensão interna crítica em diversas configurações do sistema	79
Tabela 6.3 – Valores do tempo crítico e do E'_{crit} para diversos carregamentos do sistema	81
Tabela A.I.1 – Dados das linhas de transmissão em p.u. de 100MVA e tensões do sistema...	91
Tabela A.I.2 – Dados do gerador assíncrono.....	91
Tabela A.I.3 – Dados do sistema de excitação para controle de tensão da máquina tipo DFIG	91
Tabela A.I.4 – Dados do sistema de excitação para controle de velocidade da máquina tipo DFIG.....	91

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BI	Barra Infinita
CA	Corrente Alternada
DFIG	Doubly Fed Induction Generator
FACTS	Flexible AC Transmission System
GWEC	Global Wind Energy Council
MBI	Máquina versus Barra Infinita
PACMTI	Partida da Aplicação do Critério da Mínima Tensão Interna
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generators
SCIG	Squirrel Cage Induction Machine
SMBI	Sistema Máquina Barra infinita
STATCOM	Static Synchronous Compensator
SVC	Static Var Compensator
TC	Transformador de corrente
TCR	Thyristor-Controlled Reactor
TP	Transformador de potencial
TSC	Thyristor-Switched Capacitor

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de varredura das pás da turbina (m^2)
$\arcsen$	Arcseno
$\arctan$	Arctangente
B_{max}, B_{min}	Limites capacitivo e indutivo do SVC
B_{SVC}	Susceptância do SVC
C_p	Coefficiente de potência de uma turbina eólica
C_1	Conversor interligado aos enrolamentos do rotor do DFIG
C_2	Conversor do DFIG conectado à rede
$\cos$	Cosseno
D	Força de arrasto (drag)
d_s, d_r	Transformação $d-q$, eixo direto do estator e do rotor
E'	Tensão interna da máquina
$\tilde{E}'$	Fasor da tensão interna do gerador
E'_{crit}	Tensão interna crítica do gerador
E'_{crit}^0	Tensão interna crítica inicial do gerador
E'_{crit_svc}	Tensão interna crítica considerando o dispositivo SVC
E_{fd}, E_{fq}	Tensão de excitação no eixo direto e quadratura aplicada no rotor da máquina de indução DFIG
e'_d, e'_q	Componente de eixo direto e quadratura da tensão interna da máquina
$\dot{e}'_d, \dot{e}'_q$	Derivada de eixo direto e quadratura da tensão interna do gerador
$e'_{crit_svc}^0$	Tensão interna crítica inicial com a inclusão do SVC
e'_{crit_ksvc}	Tensão interna crítica para diferentes valores de ganho do SVC
F	Força resultante
f	Velocidade angular síncrona no estator da máquina
H	Constante de inércia
i_{dr}, i_{qr}	Componente de eixo direto e quadratura da corrente do rotor
i_{ds}, i_{qs}	Corrente de eixo direto e quadratura do estator da máquina
i_{ds_svc}, i_{qs_svc}	Corrente do eixo direto e quadratura com a inclusão do SVC
I_{drREF}, I_{qrREF}	Componente de eixo direto e quadratura da corrente do rotor de referência

I_a	Corrente injetada pelo conversor C2
I_{grid}	Corrente total fornecida a rede
I_m	Eixo imaginário do plano cartesiano
I_t	Corrente terminal do gerador de indução
$\tilde{I}_t$	Fasor da corrente de armadura
I_r	Corrente do rotor
I_s	Corrente do estator
I_{SVC}	Corrente do SVC
i_a, i_b, i_c	Corrente do estator das fases a, b, c
i_A, i_B, i_C	Corrente do rotor das fases a, b, c
K_A	Ganho do amplificador
K_E	Ganho do sistema de excitação
K_{q2}	Ganho de entrada do sinal do estabilizador
K_{SVC}	Ganho do SVC
L	Forças de sustentação (lift)
L_m	Indutância mútua entre estator e rotor
L_{rr}	Indutância de dispersão do rotor
L_{ss}	Indutância de dispersão do estator
ms	Milisengundo
M	Constante de inércia
PA_{es}, PA_{ins}	Potência ativa estável e instável
P_{C2}	Potência ativa o conversor C ₂ troca com a rede
P_e	Potência elétrica do gerador
$P_{e\max}$	Potência elétrica máxima sendo transferida pelo gerador
P_{eREF}	Potência elétrica de referência do gerador
P_{grid}	Potência total do DFIG entregue a rede
P_m	Potência mecânica da Turbina
PQ_{es}, PQ_{ins}	Potência reativa estável e instável
P_r, P_{rotor}	Potência ativa do rotor do gerador
P_s	Potência ativa do estator do gerador
p.u.	Por unidade
q_s, q_r	Transformação dq, eixo quadratura do estator e do rotor

Q_{C2}	Potência reativa que o conversor C_2 troca com a rede
Q_{grid}	Potência reativa do DFIG entre a rede
Q_r	Potência reativa do rotor do gerador
Q_s	Potência reativa do estator do gerador
Q_{SVC}	Potência reativa a qual o SVC troca com o sistema
rad/s	Radianos por segundos, medida da velocidade do rotor
R	Comprimento das pás, Eixo real do plano cartesiano
R_r	Resistência do rotor
R_s	Resistência do estator
R_v	Relação da velocidade (caixa de engrenagem)
sen	Seno
s	Escorregamento da máquina de indução, segundos, laplace
s_0	Escorregamento inicial ou nominal de operação
s_{cr}	Escorregamento critico
s_α	Eixo do estator
s_β	Eixo do rotor
t	Tempo
t_{ch}	Tempo de chaveamento
t_{cr}	Tempo crítico
$t_{e'crit}$	Instante de tempo da instalação do critério da tensão interna
$t_{e'inst}$	Tempo de detecção da instabilidade pelo critério da tensão interna
t_f	Tempo de aplicação da falta
T'_0	Constante de tempo transitória de circuito aberto
T_A	Constante de tempo do amplificador
T_e	Torque elétrico
T_E	Constante de tempo da excitação
T_m	Torque mecânico
T_{se}	Constante de tempo de realimentação transitória
T_q	Constante de tempo do circuito washout
T_{SVC}	Constante de tempo do SVC
V_B	Velocidade da pá
V_R	Velocidade relativa
v_a, v_b, v_c	Tensão do estator das fases a, b, c

v_A, v_B, v_C	Tensão do rotor das fases a, b, c
v_{ds}, v_{qs}	Tensão de eixo direto e quadratura do estator da máquina
v_{dr}, v_{qr}	Tensão de eixo direto e quadratura do rotor da máquina
V_{ds}, V_{qs}	Tensão terminal o eixo direto e quadratura do gerador com atuação do SVC
V_s, v_s	Tensão terminal do gerador de indução
V_{sREF}	Tensão terminal de referência do gerador
V_w	Velocidade do vento (m/s)
$\tilde{V}_s$	Fasor da tensão terminal do gerador
V_∞, V'_∞	Barra infinita, barra infinita do circuito equivalente com SVC
V_{MAX}, V_{MIN}	Limite máximo e mínimo do regulador de tensão
X_m	Reatância mútua entre estator e rotor de um gerador de indução
X_{ss}	Reatância de dispersão do estator de um gerador de indução
X'_s	Reatância transitória de um gerador de indução
X_s	Reatância do estator
X_{total}	Reatância total do sistema considerando, linha, transformador e transitória
X_e	Reatância da linha de transmissão, Reatância equivalente considerando linha e transformador
X_{epos}	Reatância da linha de transmissão pós-falta
X_E	Reatância equivalente da linha de transmissão com SVC
X_r	Reatância do rotor
X_t	Reatância do transformador
X_{lt}	Reatância da linha de transmissão
XV_{MAX}	Limite máximo de saída de blocos do regulador de tensão
XV_{MIN}	Limite mínimo de saída de blocos do regulador de tensão
α	Ângulo de ataque
β	Ângulo de passo das pás da hélice “pitch”, ângulo do transitório da defasagem angular entre a tensão interna e a barra infinita
θ	Ângulo de defasagem entre barra infinita e a tensão interna
θ_r	Posição do rotor do DFIG
θ_s	Posição do fluxo do estator do DFIG

δ	Ângulo de defasagem angular entre a barra infinita e o eixo quadratura da máquina
γ	Ângulo da fase A do rotor ao da fase a do estator
λ	Razão entre a velocidade linear das pontas das pás e a velocidade do vento
$\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$	Fluxo do enrolamento do estator das fases a, b, c
$\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$	Fluxo do enrolamento do rotor das fases a, b, c
φ_s	Fluxo do estator
φ_{ds}	Fluxo do estator de eixo direto
φ_{qs}	Fluxo do estator de eixo quadratura
μ_s	Ganho de realimentação transitória
ξ	Ângulo de defasagem entre a tensão terminal e a tensão interna
ρ	Densidade do ar (kg/m^3)
ω_0	Velocidade inicial, velocidade angular síncrona no estator da máquina
ω_{cr}	Velocidade crítica
ω_r	Velocidade angular do eixo rotor do gerador, Frequência angular do eixo de alta rotação do gerador eólico
$\dot{\omega}_r$	Derivada temporal da velocidade angular do eixo do gerador do rotor
ω_s	Velocidade angular do estator
ω_{sREF}	Velocidade angular de referência do estator

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	21
INTRODUÇÃO	21
1.1 Organização da dissertação	24
CAPÍTULO 2.....	25
AEROGERADORES: CONCEITOS E COMPONENTES	25
2.1 Introdução.....	25
2.2 Principais componentes do Sistema Eólico (Aspecto Construtivo)	25
2.3 Potência da Turbina Eólica.....	27
2.3.1 Coeficiente de potência	28
2.3.2 Controles aerodinâmicos	29
2.4 Tipos de geradores.....	31
2.4.1 Gerador de Indução em Gaiola de Esquilo (SCIG)	31
2.4.2 Gerador de Indução Duplamente Alimentado (DFIG).....	32
2.4.3 Gerador Síncrono (PMSG)	33
CAPÍTULO 3.....	35
MODELO MATEMÁTICO DO GERADOR DE INDUÇÃO	35
3.1 Máquina de indução em gaiola de esquilo (SCIG).....	36
3.1.1 Modelo dinâmico de um gerador de indução (SCIG) conectado à uma barra infinita através de um sistema de transmissão.....	37
3.1.2 Determinação do ponto de operação para SMBI em regime permanente	38
3.1.3 Gerador de indução (SCIG) conectado à uma barra infinita durante um regime transitório.....	40
3.2 Máquina de indução duplamente alimentado (DFIG)	41
3.2.1 Modelo dinâmico de um gerador de indução duplamente alimentado (DFIG)..	42
3.2.2 Estratégia de controle	44
3.2.2.1 Modelagem e controle do conversor ligado ao rotor	44
CAPÍTULO 4.....	49
SCIG COM SVC CONECTADO A UM SMBI.....	49
4.1 Modelo dinâmico da conexão do dispositivo SVC a um sistema barra infinita com gerador SCIG	49
4.2 Modelo matemático da conexão do SVC na barra terminal do sistema com gerador de indução SCIG	51
4.2.1 Equações do SMBI com o SVC	51
CAPÍTULO 5	54
DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO PARA O ESTUDO DA ESTABILIDADE DOS GERADORES DE INDUÇÃO POR MONITORAMENTO DA TENSÃO E'.....	54
5.1 Estudo da estabilidade dos geradores de indução através da tensão interna E'	54
5.2 Análise da estabilidade por meio da tensão E'	55
5.3 Estudo da estabilidade do gerador de indução através da tensão interna E' com um compensador de reativo SVC	60
5.4 A origem da instabilidade do gerador de indução SCIG	62

CAPÍTULO 6.....	63
SIMULAÇÕES E RESULTADOS	63
6.1 Considerando o método analítico da tensão E'	63
6.2 Análise do comportamento do SCIG durante o transitório	63
6.3 Análise da estabilidade do SCIG através do método da tensão interna E'	65
6.4 Método da tensão E' comparado com método da velocidade.....	67
6.5 Estudo da estabilidade dos geradores de indução através da tensão interna E' com a instalação do compensador estático de reativo (SVC).....	70
6.5.1 Tempo de falta t_{ch} -580ms (estável sem o SVC)	71
6.5.2 Tempo de falta t_{ch} -590ms (instável sem o SVC)	73
6.6 Comportamento do SCIG com SVC	75
6.7 Análise da influência do critério da mínima tensão interna em redes fortes e fracas.....	77
6.8 Análise do desempenho do critério da mínima tensão interna E' em diferentes condições de carregamento do sistema.....	80
6.8.1 Análise do comportamento da tensão interna E' com aumento em 50% e com curto-circuito	81
 CAPÍTULO 7	 83
CONCLUSÕES GERAIS	83
7.1 Sugestões para trabalhos futuros	84
 REFERÊNCIAS	 85
 APÊNDICE I – DADOS DO SISTEMA TESTE	 91
 ANEXO I – ARTIGOS PUBLICADOS	 92

1 Introdução

A energia, nas suas mais diversas formas, é indispensável à sobrevivência da espécie humana e, mais do que sobreviver, o homem procurou sempre evoluir, descobrindo fontes e formas alternativas de adaptação ao ambiente em que vive, atendendo as suas necessidades. Dessa forma, a exaustão, escassez ou inconveniência de um dado recurso tende a ser compensada pelo surgimento de outro(s). Em termos de suprimento energético, a eletricidade passou a ser recurso indispensável e estratégico para o desenvolvimento socioeconômico de uma nação (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2002).

O grande desafio está em satisfazer a crescente demanda de energia elétrica no mundo, sem agredir o meio ambiente. A solução encontrada está no uso de fontes de energia alternativas, originada para diminuir os impactos ambientais. Dentre elas, destaca-se a energia eólica, que além de atender aos requisitos anteriores, é considerada uma fonte energética renovável e inesgotável. A energia provinda do vento apresenta também como vantagens associadas à sua utilização, menores custos operacionais e de manutenção, quando comparada com as fontes convencionais de conversão de energia elétrica (ANEEL, 2002), e ainda menor impacto ambiental, pois não exige a queima de combustíveis, nem a formação de grandes reservatórios de água.

De acordo com o Global Wind Energy Council – GWEC (2010), a capacidade instalada das centrais eólicas tem evoluído não só no Brasil, como em todo o mundo. A escolha desta fonte de energia está relacionada à queda de custo e ao aumento da potência dos aerogeradores. O fornecimento de energia elétrica através da energia do vento está se aproximando das formas convencionais de produção de energia elétrica, uma vez que as turbinas modernas têm melhorado em eficiência e confiabilidade, (LI; CHEN, 2008).

No mundo todo, o aproveitamento de energia eólica cresce cerca de 31% a cada ano (GWEC, 2010). A expansão da capacidade de novas instalações de centrais eólicas é representada na Figura 1.1.

A evolução do setor eólico brasileiro se instituiu em 2002 pelo governo federal, coordenado pelo Ministério de Minas e Energia, e gerenciado pela Eletrobrás, com o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA), que tem por objetivo a diversificação da matriz

energética brasileira, visando especificamente o aumento da utilização de fontes renováveis de energia.

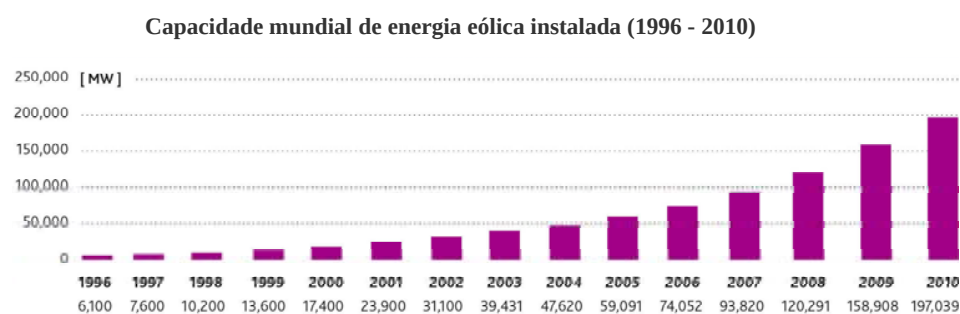


Figura 1.1 – Capacidade global instalada de energia eólica de 1996 – 2010, (GWEC, 2011).

O Brasil conta com 50 usinas eólicas instaladas em operação, o que corresponde a 0,76% da matriz energética do Brasil, como verificado no documento “Capacidade de Geração do Brasil” atualizado em 15 de janeiro de 2011 (ANEEL, 2011). A Tabela 1.1 apresenta a evolução das instalações eólicas no Brasil.

Tabela 1.1 – Capacidade acumulativa de geração de energia eólica no Brasil
(ANEEL, 2011; GWEC, 2011).

Ano	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
MW	22	29	29	29	237	247	341	606	931

Neste cenário de evolução das centrais eólicas no mundo, os setores elétricos têm vindo a experimentar alterações significativas na sua estrutura, levando a novas definições e combinações de condições técnicas, que assegurem a operação e a confiabilidade do sistema.

Devido às centrais eólicas, equipadas com máquinas síncronas e assíncronas estarem sujeitas a perturbações dinâmicas e transitórias originadas por curto-circuito na rede elétrica, pode-se comprometer o fornecimento ininterrupto da energia, assim como a qualidade de serviço manifestada por níveis de tensão e frequência. Visando principalmente a continuidade do fornecimento de energia, é de todo interessante analisar a estabilidade do gerador, conectado a

um grande sistema. Assim, procura-se estabelecer uma metodologia de análise, incluindo um critério de estabilidade.

A motivação principal deste trabalho foi dada pela ausência na literatura de um estudo claro à respeito das causas da instabilidade do gerador assíncrono. Sabe-se que o gerador de indução em gaiola de esquilo (SCIG – Squirrel Cage Induction Generator) apresenta deficiência de potência reativa e, conseqüentemente, não consegue controlar a tensão em seus terminais após um transitório, necessitando para isto de um suporte de potência reativa. Sabe-se também que a deterioração do perfil de tensão leva ao enfraquecimento da capacidade de transmissão de potência podendo prejudicar a estabilidade da operação.

À vista destas considerações, um método é proposto para o estudo da estabilidade dos geradores de indução, destacando que os métodos de análise, além de proverem uma avaliação da estabilidade do sistema, propiciam uma clarificação do entendimento sobre o comportamento dos geradores de indução conectados ao sistema elétrico de potência.

Nota-se que a tensão interna (usualmente designada por E') de um gerador de assíncrono é afetada pelo movimento transitório, se alterando conforme o desempenho do sistema e, durante um regime transitório pode comprometer a capacidade de transmissão de potência na linha, levando à instabilidade e conseqüente colapso da estabilidade do gerador de indução. Deste modo, faz-se a análise do desempenho transitório da máquina, pela observação da grandeza em que efetivamente reside a causa da instabilidade, ou seja, a própria tensão interna. A validação do método da tensão interna é realizada por meio de simulação digital.

Nesta dissertação considera-se o gerador SCIG visando estudar seu comportamento transitório com vista à estabilidade eletromecânica, incluindo o dispositivo FACTS (Flexible AC Transmission System) compensador estático de reativo SVC (Static Var Compensator) o qual, além da compensação de potência reativa necessária ao desempenho satisfatório do SCIG, propicia a possibilidade de regulação automática de tensão nos terminais da máquina e, por conseqüência, controle do desempenho dinâmico/transitório do sistema.

Embora a aplicação do SCIG em geradores eólicos de grande porte (acima de 1MW) vem diminuindo nos últimos anos (LI; CHEN, 2008), na geração distribuída se teve uma crescente aplicação (GRILLO, 2007), sendo que a justificativa para seu uso está na simplicidade construtiva. No que se refere especificamente a este trabalho, o estudo é motivado pelo fato de apresentar resultados satisfatórios no desenvolvimento da metodologia analítica, obtendo resultados bastante

acurados de detecção da condição de instabilidade do gerador, ensejando a expectativa de, na evolução posterior do trabalho, tratar sistema de maior complexidade.

1.1 Organização da dissertação

De forma simplificada, a organização desta dissertação permite obter uma visão clara do que vem a ser abordado ao decorrer dos capítulos.

- O Capítulo 2 trata brevemente da fundamentação teórica dos aerogeradores como o conjunto mecânico e elétrico, e os tipos de máquinas elétricas utilizadas nos aerogeradores.
- O Capítulo 3 descreve a modelagem matemática do gerador de indução em gaiola de esquilo SCIG, e do rotor bobinado duplamente alimentado (DFIG – Doubly Fed Induction Generator), para a representação em estudos dinâmico e transitório de sistemas de potência.
- O Capítulo 4 evidencia a modelagem do compensador estático reativo SVC, conectado a um sistema barra infinita com geradores de indução, para que seja realizado o estudo da estabilidade dinâmica/transitória do sistema.
- O Capítulo 5 apresenta o principal foco deste trabalho, o desenvolvimento do método analítico através da tensão E' da máquina de indução, com e sem compensação dinâmica de reativo.
- O Capítulo 6 enfatiza os resultados de simulações computacionais, realizadas com a comprovação do método da tensão interna. O método analítico oferecido é suficientemente preciso para avaliar o comportamento dos geradores de indução, conectado a um compensador variável de reativo, possibilitando ganhar um maior entendimento sobre a operação e o seu comportamento.
- O Capítulo 7 destaca as conclusões obtidas com o desenvolvimento deste estudo.

2 Aerogeradores: conceitos e componentes

2.1 Introdução

A justificativa para o desenvolvimento deste capítulo se dá pelo fato de os geradores estudados nesta dissertação serem utilizados na geração eólica e uma das etapas desta pesquisa está no conhecimento do aerogerador. Em razão disto, este capítulo tem como principal finalidade descrever e abordar brevemente teorias que compõem os aerogeradores, como conceitos relativos a aerodinâmica, tipos de turbinas eólicas, máquinas elétricas utilizadas na geração de energia eólica e por fim, os sistemas de controle.

2.2 Principais componentes do Sistema Eólico (Aspecto Construtivo)

De acordo com CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO – CRESEB (2008), os aerogeradores são constituídos por vários componentes mecânicos e elétricos que devem trabalhar em conjunto da melhor forma possível, a fim de propiciar um maior rendimento final. Os principais componentes que formam um aerogerador são apresentados na Figura 2.1 (PINTO, 2007):

- 1 – Anemômetro: mede a velocidade do vento;
- 2 – Pá: capta a energia cinética do vento;
- 3 – Freio da turbina eólica;
- 4 – Controlador de velocidade;
- 5 – Caixa de engrenagem: Utilizada em sistemas de máquina de indução, que converte a engrenagem de velocidade baixa do rotor para engrenagem de velocidade rápida do gerador. As turbinas eólicas que não tem este sistema, geralmente são turbinas equipadas com geradores síncronos, ligados diretamente ao rotor do gerador, estas máquinas possuem um elevado n° de pólos;
- 6 – Gerador: Transforma energia mecânica em energia elétrica;

- 7 – Eixo de alta velocidade: Ligado ao gerador;
- 8 – Eixo de baixa velocidade: Ligado à turbina eólica;
- 9 – Nacele: É o compartimento instalado no alto da torre e que abriga todo o mecanismo do gerador, o qual pode incluir: caixa de engrenagem, freios, embreagem, mancais, controle eletrônico, sistema hidráulico, etc;
- 10 – Pitch: É um sistema ativo que normalmente necessita de uma informação vinda do controlador do sistema. Sempre que a potência nominal do gerador é ultrapassada, devido a um aumento da velocidade do vento, as pás do rotor giram em torno do seu eixo longitudinal. Em outras palavras, as pás mudam o seu ângulo de passo para reduzir o ângulo de ataque e, conseqüentemente, reduzir a potência extraída do vento;
- 11 – Turbina Eólica: Capta parte da energia cinética do vento e a transforma em energia mecânica;
- 12 – Torre: É o elemento que sustenta o rotor e a nacele na altura adequada ao funcionamento da turbina eólica;
- 13 – Vento: Disponibilidade energética da natureza;
- 14 – Medidor de direção do vento;
- 15 – Engrenagem de posicionamento da turbina eólica;
- 16 – Motor da engrenagem.

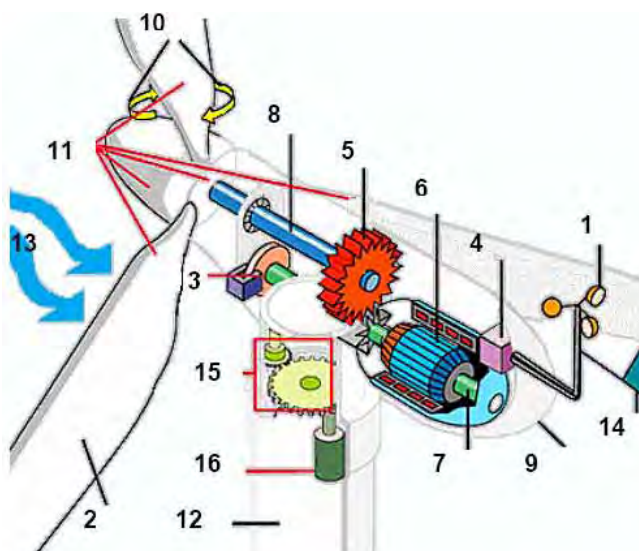


Figura 2.1 – Esquema de uma turbina eólica com gerador do tipo de indução, (Reproduzida com permissão de Pinto (2007)).

2.3 Potência da Turbina eólica

Um sistema eólico capta parte da energia cinética do vento, que passa pela área de varredura das pás do rotor da turbina eólica, que por sua vez aciona os eixos do gerador transformando-a em energia elétrica. A potência mecânica da turbina eólica é calculada pela seguinte expressão (SLOOTWEG et al., 2003):

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2.1)$$

Sendo:

ρ – Densidade do ar (kg/m³);

V_w – Velocidade do vento (m/s);

A – Área de varredura das pás da turbina (m²), sendo $A = \pi r^2$;

β – Ângulo de passo “pitch”;

C_p – Coeficiente de potência;

λ – Razão entre a velocidade linear das pontas das pás e a velocidade do vento, também conhecida por velocidade específica.

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{V_w} \quad (2.2)$$

R – Comprimento da pá da turbina eólica;

ω_r – Velocidade angular do eixo do rotor da turbina eólica, dada por: $\omega_r = \frac{\pi f}{R_v}$, onde R_v é a relação da velocidade (caixa de engrenagem), (MOTA, 2006).

Torque mecânico turbina/gerador é expresso da seguinte maneira:

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_r} = \frac{1}{2} \rho \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \pi R^3 V_w^2 \quad (2.3)$$

2.3.1 Coeficiente de potência

Nem toda energia disponível no vento pode ser aproveitada pelos aerogeradores por razões de perdas. De acordo com a Figura 2.2 nos sistemas eólicos, a parcela da energia do vento aproveitada pelas pás encontra-se numa determinada faixa de porcentagem, este valor se altera dependendo do tipo rotor, quantidade de pás e o controlador utilizado para regular o ângulo das próprias. Este percentual é conhecido como coeficiente de potência, determinado pelo físico alemão Albert Betz, que através de seus estudos constatou que o valor máximo teórico é $C_{p\max} = 59,3\%$ (AKHMATOV, 2003 (a)), e desta forma o limite de Betz corresponde à máxima potência extraída por uma turbina eólica.

A Figura 2.2 mostra o coeficiente de potência para diferentes tipos de rotores eólicos, evidenciando o coeficiente de potência máximo de cada rotor em função de λ , sendo “ λ ” a taxa de velocidade de extremidade “tip speed ratio” (DAHER et al., 1999). Estas curvas retratam que existe um ponto de máxima eficiência.

Existem limites de operação para os rotores eólicos, que, quando ultrapassados, comprometem irreversivelmente o desempenho, sendo necessárias técnicas de controle de forma a garantir a integridade física da turbina eólica, (DAHER et al., 1999).

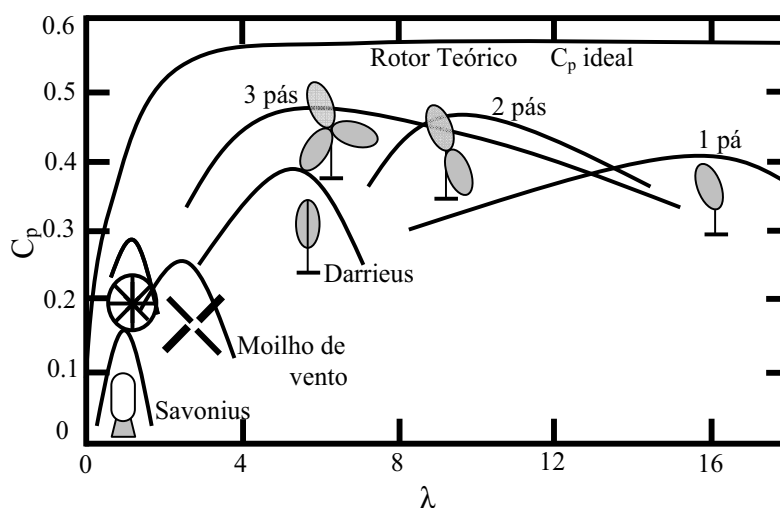


Figura 2.2 – Curvas dos $C_p \times \lambda$ para diferentes tipos de rotores eólicos.

Determinado o tipo de rotor eólico, o seu desempenho é definido através da curva do coeficiente de potência contra velocidade específica ($C_p \times \lambda$). Este tipo de curva, é dada por

um equacionamento matemático, definida por dados experimentais que são obtidos dos fabricantes. O entendimento sobre estas curvas nos dá o conhecimento do comportamento aerodinâmico da turbina no que respeita ao estudo sobre o comportamento dinâmico e de estabilidade transitória de sistemas de potência, (AKHMATOV (a); SLOOTWEG, 2003).

Com base nestas curvas, foram definidos então os controles aerodinâmicos de pitch e stall-active, usados nos sistemas eólicos para sua proteção e situações de elevadas velocidades de vento, e também com o propósito de extrair a máxima energia possível do vento, sempre seguindo as curvas de $C_p \times \lambda$ com diferentes tipos de valores de β (ângulo de orientação da pá).

As equações (2.4) e (2.5), conduzem a um conjunto de curvas de $C_p \times \lambda$ para diversos valores de β , ilustrado na Figura 2.3.

$$C_p(\lambda, \beta) = 0,22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0,4\beta - 5 \right) e^{\frac{-12,5}{\lambda_i}} \quad (2.4)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,008\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (2.5)$$

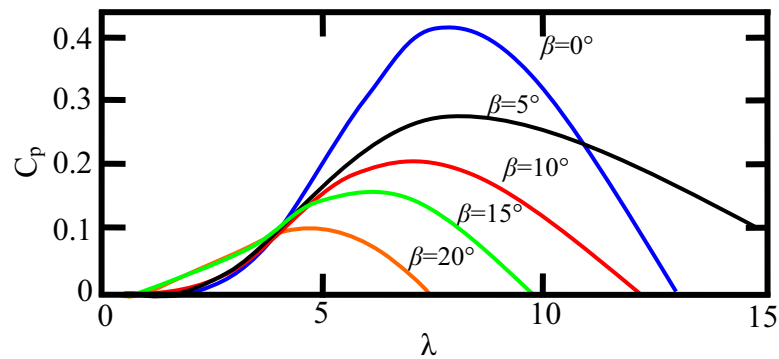


Figura 2.3 – Curvas $C_p(\lambda, \beta)$ em diversos valores de β .

2.3.2 Controles aerodinâmicos

Os aerogeradores são projetados para extraírem sempre o máximo de energia cinética possível que o vento disponibiliza. Porém, para uma operação segura, a potência captada não deve exceder os valores da potência nominal do gerador.

Para que o aerogerador se mantenha na condição de potência nominal, são adotados sistemas de controle que tem como função limitar a potência extraída do vento, realizado através de duas maneiras: a primeira através do controle de ângulo de passo (β) e a segunda por controle aerodinâmico (stall), (AKHMATOV, 2003 (a)).

1 – Controle do ângulo de passo, corresponde na variação do ângulo de β da Figura 2.4. Duas maneiras deste controle são abordadas a seguir:

- Pitch control – A estratégia deste controle consiste em, aumentar o ângulo β de modo que o excesso de vento não é aproveitado no sistema, diminuindo o coeficiente de potência. O efeito deste controle se aplica sobre as pás do rotor, que giram em torno do seu eixo longitudinal, mudando o seu ângulo de passo e reduzindo o ângulo de ataque α . A redução do ângulo de ataque, diminui as forças aerodinâmicas atuantes no aerogerador e por consequência, na extração da potência mecânica (NUNES, 2003). A orientação das pás varia de 0° a 90° .
- Stall-active – O maior número de aerogeradores convencionais de velocidade fixa, operam com controle de potência no conceito de stall-active. Este tipo de controle, é muito parecido com o controle de passo “pitch”, mas neste caso, as pás são projetadas de modo que, em determinada velocidade de vento aconteça o conceito aerodinâmico de stall. A diferença existente no controle stall-active, é dele mover as pás na direção contrária a do controle pitch que está entre 0° a -6° . Neste movimento contrário, aumenta-se o ângulo de ataque das pás do rotor da turbina, atingindo o stall, região de baixo rendimento, desperdiçando energia cinética do vento. Estes dois tipos de controle, são utilizados em turbinas eólicas com potência maior ou igual a 1MW.

2 – Stall passive – As pás do rotor estão fixadas com um ângulo de ataque fixo pré-estabelecido. A topologia deste perfil aerodinâmico faz com que seja criada uma turbulência (stall) na parte de trás da pá da turbina eólica, quando o vento atinge uma determinada velocidade elevada, consequentemente, faz com que a velocidade de rotação da turbina não exceda o valor pré-estabelecido de operação (ALMEIDA, 2006).

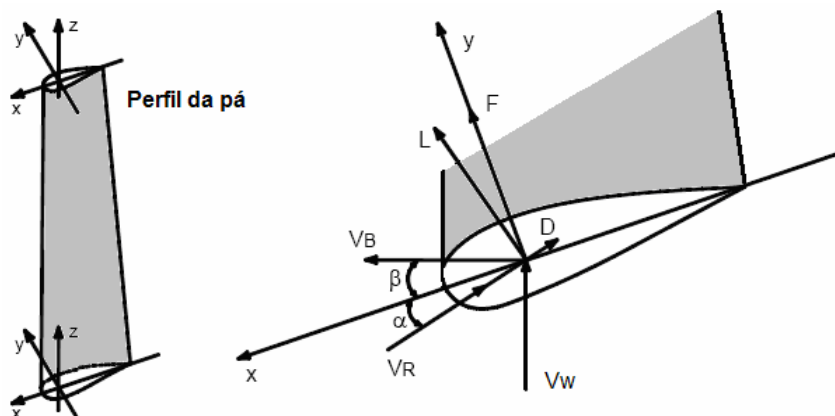


Figura 2.4 – Representação das grandezas aerodinâmicas da pá da turbina eólica.

As grandezas dimensionadas na Figura 2.4, são L (lift) forças de sustentação, D (drag) força de arrasto, F força resultante, V_w velocidade do vento, V_B velocidade da pá, V_R velocidade relativa, α ângulo de ataque, β ângulo do passo (HANSEN, 2008 (b)).

2.4 Tipos de geradores

Utilizam-se dois tipos de máquinas elétricas para a produção de energia elétrica, através dos aerogeradores: as assíncronas e síncronas. Os geradores assíncronos, quando de indução em gaiola de esquilo (SCIG), são utilizados para aplicações em velocidade fixa, enquanto que os geradores assíncronos de rotor bobinado (DFIG) e síncronos (PMSG – Permanent Magnet Synchronous Generators) são, geralmente, utilizados em aplicações com velocidade variável, (AKHMATOV, 2003 (a)). Mais detalhes dos modelos são abordados a seguir.

2.4.1 Gerador de Indução em Gaiola de Esquilo (SCIG)

Os aerogeradores equipados com geradores de indução em gaiola de esquilo SCIG se mostram bastante simples, robustos e de baixo custo por dispensarem controladores sofisticados (LI; CHEN, 2008).

Geralmente estes aerogeradores de indução são conectados diretamente à rede e sua velocidade angular está acima da velocidade síncrona $\omega_s = 2\pi f$. A característica de

velocidade fixa vem do fato da velocidade do estator do gerador ser mantida pela rede elétrica, (NUNES, 2003).

Para corresponder a velocidade da rede, o gerador pode ser ajustado através do seu número de par de pólos ou pela relação da caixa de engrenagens (multiplicador de velocidade). A Figura 2.5, ilustra o aerogerador equipado com gerador de indução em gaiola de esquilo, acoplado a um banco de capacitores (ALMEIDA, 2006).

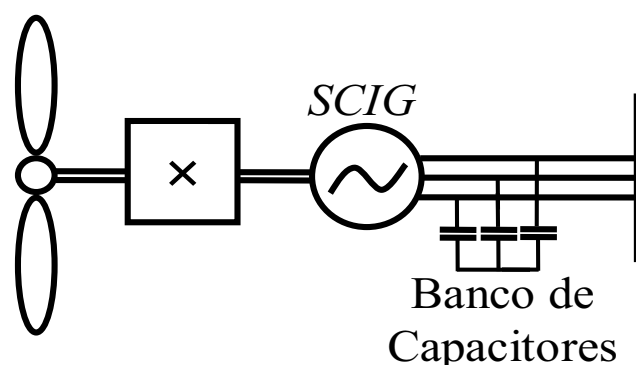


Figura 2.5 – Sistema eólico de velocidade fixa com gerador SCIG.

Um dos grandes problemas que este tipo de aerogerador enfrenta na ausência de suporte de reativos, é o consumo excessivo de potência reativa, que vem a ser requerido da rede elétrica, podendo vir a causar problemas de colapso de tensão no sistema, após um período transitório (NUNES, 2003). Para evitar tais inconvenientes, são instalados bancos capacitores junto aos aerogeradores, ou até mesmo controladores FACTS compensadores estáticos de reativos (SVC, STATCOM) em parques eólicos, com geradores do tipo SCIG, (AKHMATOV, 2003 (a, c), 2004; SLOOWTEG, 2003; ALMEIDA, 2006).

2.4.2 Gerador de Indução Duplamente Alimentado (DFIG)

Os aerogeradores de indução de rotor bobinado duplamente alimentado DFIG vem sendo cada vez mais utilizado na geração eólica, (LI; CHEN, 2008).

Neste esquema eólico, o estator do gerador está conectado diretamente à rede elétrica, enquanto que o rotor está a um conversor estático, conforme representa a Figura 2.6. A turbina eólica está acoplada ao gerador através da caixa de engrenagens multiplicadora de velocidades (AKHMATOV, 2002 (a, b)).

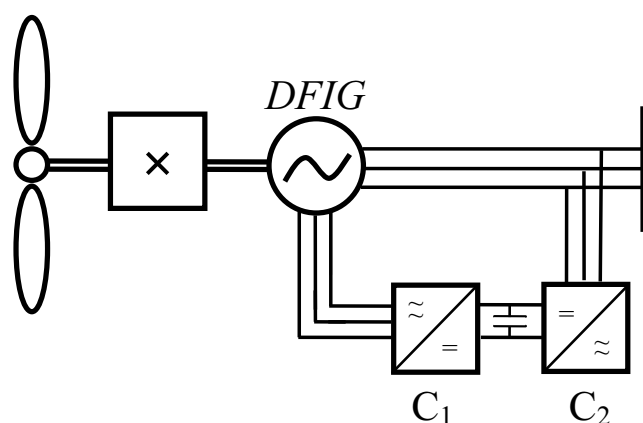


Figura 2.6 – Gerador eólico de velocidade variável equipado com gerador de indução Duplamente Alimentado (DFIG).

Segundo Akhmatov (2003 (a, b)) e Slootweg (2003), a tecnologia do DFIG se torna atrativa por ser de velocidade variável, causando menores impactos nas redes elétricas quando comparadas com a tecnologia dos geradores SCIG. Os conversores estáticos do DFIG têm usualmente capacidade de 30% da sua potência nominal.

O conversor estático C_1 interligado ao rotor do gerador funciona como fonte de tensão e corrente, controlando a velocidade e a tensão terminal do gerador (MÜLLER; DEICKE; DE DONCKER, 2002).

O conversor estático C_2 interligado à rede, funciona como uma fonte de tensão e corrente que controla a tensão no barramento “CC” e a potência ativa que o rotor troca com a rede. Um sistema de proteção “Crowbar” é utilizado para os conversores, prevenindo correntes elevadas que possam vir a danificar a integridade dos equipamentos (POLLER, 2003).

2.4.3 Gerador Síncrono (PMSG)

Quando equipados com geradores síncronos com rotor de ímã permanente PMSG, os aerogeradores são dotados de um grande número de par de pólos no rotor, permitindo a operação do gerador em baixas velocidades, sendo possível o acoplamento direto à turbina eólica, dispensando o uso do multiplicador de velocidade.

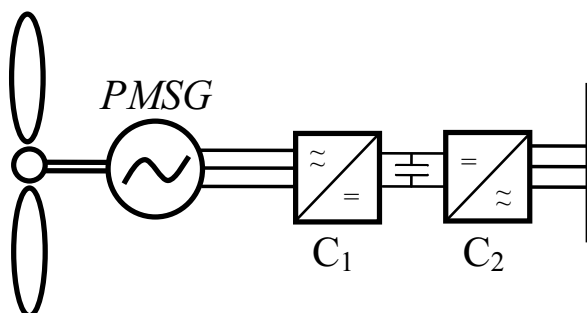


Figura 2.7 – Sistema eólico de velocidade variável com gerador síncrono de ímã permanente.

Os conversores estáticos são muito similares aos utilizados no DFIG, porém com estratégias distintas de controle. De certa forma, a potência nominal do conversor C_1 , deve ser 100% da potência nominal do gerador. Nesta configuração, permite-se a operação do PMSG com velocidade variável, maximizando a geração de energia elétrica em diferentes pontos de operação, (HANSEN, 2001, 2008 (a); SPOONER, 1996).

De acordo com (JENKINS, 2000; ACKERMANN, 2005; LI; CHEN, 2008), o uso dos PMSG é muito recente em turbinas eólicas, porém muito promissor. Encontra-se nas referências, (AKHMATOV, 2003 (a); CONROY; WATSON, 2007; JAUCH, 2007; HANSEN, 2008 (a); SALLES, 2009), mais sobre a tecnologia PMSG.

3 Modelo matemático do gerador de indução

O modelo empregado para representar a máquina de indução, é descrito em Mota (2004, 2006). Na busca de mais detalhes do modelamento das máquinas de indução SCIG e DFIG, as referências bibliográficas indicadas são: (AKHMATOV; 2003 (a); SLOOTWEG, 2003; LOPES; ALMEIDA, 2004).

Na Figura 3.1 são mostrados os enrolamentos da máquina de indução funcionando como gerador, considerando três enrolamentos na armadura: a, b, c; e três enrolamentos no rotor: A, B e C, aos quais se associam equações algébricas e diferenciais (MOTA, 2006).

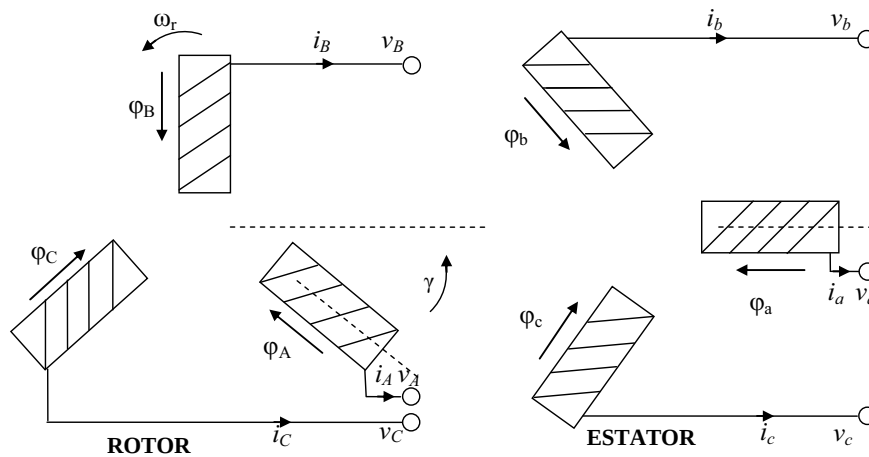


Figura 3.1 – Enrolamentos do rotor e do estator da máquina de indução.

Define-se γ como ângulo em que a fase A do rotor atrasa da fase a do estator, na direção da rotação do rotor. Sendo ω_r a velocidade angular do rotor e ω_s a velocidade angular no estator, considerando as velocidades em rad/s , o escorregamento s da máquina de indução é representado pela equação:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (3.1)$$

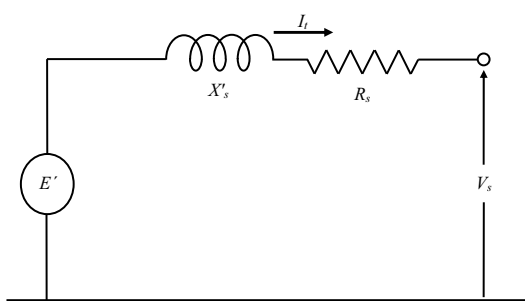
$$\gamma = \omega_r t = (1 - s)\omega_s t \quad (3.2)$$

As variáveis do sistema trifásico da Figura 3.1, são referidas a eixos ortogonais denominados direto (d) e em quadratura (q). Os eixos do estator giram à velocidade síncrona, tendo no instante $t=0$ o eixo d da transformação de Park alinhado com o eixo da fase a do estator, detalhes em (MOTA, 2006).

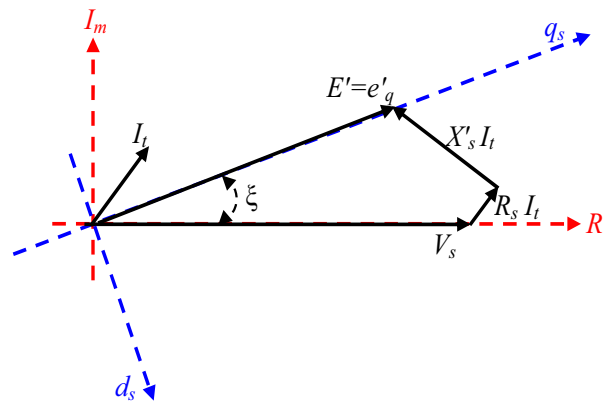
3.1 Máquina de indução em gaiola de esquilo (SCIG)

O gerador de indução em gaiola de esquilo (SCIG), pode ser representado pelo circuito equivalente referido ao estator, como mostrado na Figura 3.2. Para interligação com a rede, e para representação de fenômenos transitórios, o modelo usado é representado por uma fonte de tensão interna atrás de uma impedância transitória.

O circuito equivalente (a) e o diagrama fasorial (b) com respeito aos eixos do estator (d_s e q_s) são como segue:



(a) Circuito equivalente (SCIG)



(b) Diagrama fasorial (SCIG)

Figura 3.2 – Ilustrações da representação do SCIG.

Para a modelagem do gerador de indução, foi utilizada a transformação d - q de Park, com base em um eixo de referência girando à velocidade síncrona. A escolha do eixo de referência síncrono é particularmente conveniente quando se deseja incorporar as características desta máquina em um programa utilizado para estudos de estabilidade transitória em Sistemas Elétricos de Potência (KUNDUR, 1994).

A decomposição das variáveis nos eixos d - q podem ser explícitas da seguinte forma: $\tilde{V}_s = v_{ds} + jv_{qs}$ é a tensão terminal do gerador, $\tilde{I}_t = i_{ds} + ji_{qs}$, a corrente de armadura e, $\tilde{E}' = e'_d + je'_q$ é a tensão interna do gerador. As grandezas dimensionadas por d_s e q_s representam o eixo direto e quadratura do estator. De acordo com Kundur (1994), as equações que representam a variação da tensão interna E' do SCIG, governada pelas dinâmicas de suas componentes de eixo direto e'_d e em quadratura e'_q , são:

$$\dot{e}'_d = \frac{1}{T'_0} [-e'_d + (X_{ss} - X'_s)i_{qs}] + s\omega_s e'_q \quad (3.3)$$

$$\dot{e}'_q = \frac{1}{T'_0} [-e'_q - (X_{ss} - X'_s)i_{ds}] - s\omega_s e'_d \quad (3.4)$$

em que $T'_0 = \frac{L_{rr}}{R_r}$ é a constante de tempo transitória de circuito aberto, $X_{ss} = \omega_s L_{ss}$ a reatância de dispersão do estator, e X'_s a reatância transitória do gerador de indução, dada por,

$$X'_s = \omega_s \left(L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{rr}} \right).$$

3.1.1 Modelo dinâmico de um gerador de indução (SCIG) conectado à uma barra infinita através de um sistema de transmissão

Considera-se uma máquina de indução do tipo gaiola de esquilo (SCIG) conectada à um grande sistema representado por uma barra infinita através de um sistema de transmissão, como apresenta o diagrama unifilar da Figura 3.3.

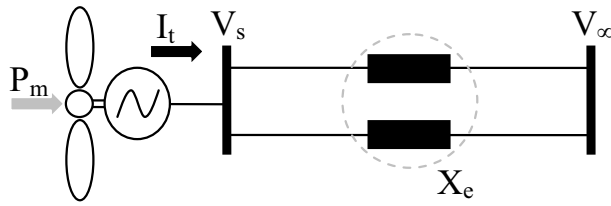


Figura 3.3 – Diagrama unifilar do gerador SCIG $\times$ BI (barra infinita).

A máquina assíncrona de gaiola de esquilo é representada pelo modelo de terceira ordem, por meio das equações dinâmicas da tensão interna (3.3) e (3.4), e pela equação de oscilação do rotor do gerador de indução, é descrita por:

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{2H} (T_m - T_e) \quad (3.5)$$

As equações algébricas da tensão terminal (v_{ds}) e (v_{qs}), são dada por:

$$v_{ds} = e'_d - R_s i_{ds} + X'_s i_{qs} \quad (3.6)$$

$$v_{qs} = e'_q - R_s i_{qs} - X'_s i_{ds} \quad (3.7)$$

A potência elétrica é representada pela equação (3.8):

$$P_e = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \quad (3.8)$$

3.1.2 Determinação do ponto de operação para SMI em regime permanente

Naturalmente, o sistema encontra-se em equilíbrio quando suas derivadas temporais se definem da seguinte forma, $\dot{e}'_d = \dot{e}'_q = \dot{\omega}_r = 0$, o que determina os valores de regime permanente das variáveis de estado, incluindo a óbvia igualdade $P_m = P_e$.

Considere-se o diagrama fasorial mostrado na Figura 3.4, em que se avaliam as condições da máquina conectada ao barramento infinito por meio da linha de transmissão. Desconsiderando as resistências do sistema de transmissão e do estator da máquina, as equações (3.3), (3.4) e (3.5), determinam o ponto de operação da máquina.

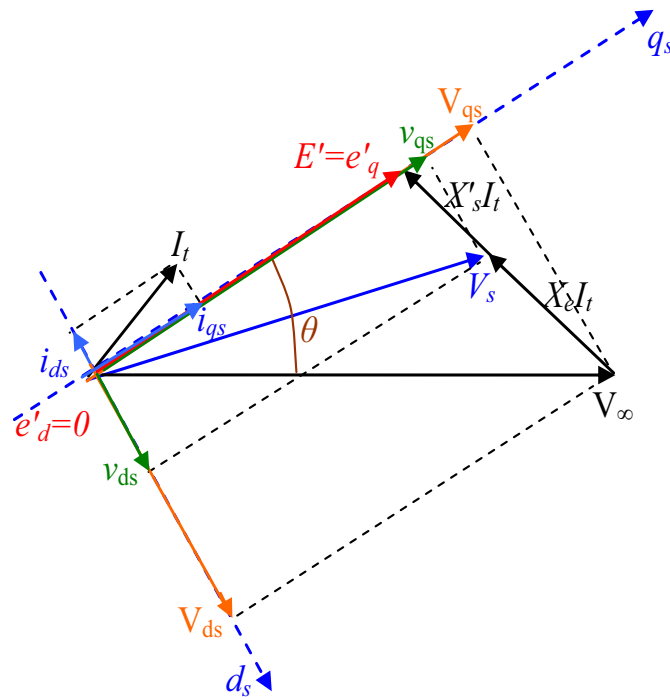


Figura 3.4 – Diagrama fasorial da SCIG $\times$ BI em regime permanente.

Do diagrama fasorial, nota-se que:

$$V_{ds} = e'_d + (X_e + X'_s)i_{qs} = V_\infty \sin \theta \quad (3.9)$$

$$V_{qs} = e'_q - (X_e + X'_s)i_{ds} = V_\infty \cos \theta \quad (3.10)$$

Na condição de equilíbrio, $e'_d = 0$, portanto, o ângulo θ é o ângulo de defasagem entre a tensão interna E' e a tensão da barra infinita, conforme apresenta a Figura 3.4. Porém, é importante observar que este ângulo não tem o mesmo significado que o ângulo de carga (normalmente designado por δ) das máquinas síncronas.

Determina-se a corrente da máquina do eixo direto e quadratura do estator:

$$i_{ds} = \frac{e'_q - V_\infty \cos \theta}{(X_e + X'_s)} \quad (3.11)$$

$$i_{qs} = \frac{V_\infty \sin \theta - e'_d}{(X_e + X'_s)} \quad (3.12)$$

A potência elétrica é dada por:

$$P_e = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \quad (3.13)$$

3.1.3 Gerador de indução (SCIG) conectado à uma barra infinita durante um regime transitório

O sistema dinâmico é de terceira ordem descrito pelas equações diferenciais: (3.3), (3.4), (3.5). A Figura 3.5 apresenta o diagrama fasorial do SCIG durante um transitório, onde surge o ângulo β' .

Define-se então, $\theta = \delta - \beta'$, dado que $\delta^0 = \theta^0$, então $\Delta \theta = -\Delta \beta'$. E, sendo $e_d'^0 = 0$, $\Delta \beta' = \beta'$, com o que $\Delta \theta = -\beta'$, em que θ^0 é o ângulo inicial de defasagem entre a barra infinita e a tensão interna.

A potência elétrica durante o transitório é dada por:

$$P_e = \frac{E' V_\infty}{X_e + X'_s} \sin(\theta^0 - \beta') \quad (3.14)$$

Sendo

$$E' = \sqrt{e_d'^2 + e_q'^2} \quad (3.15)$$

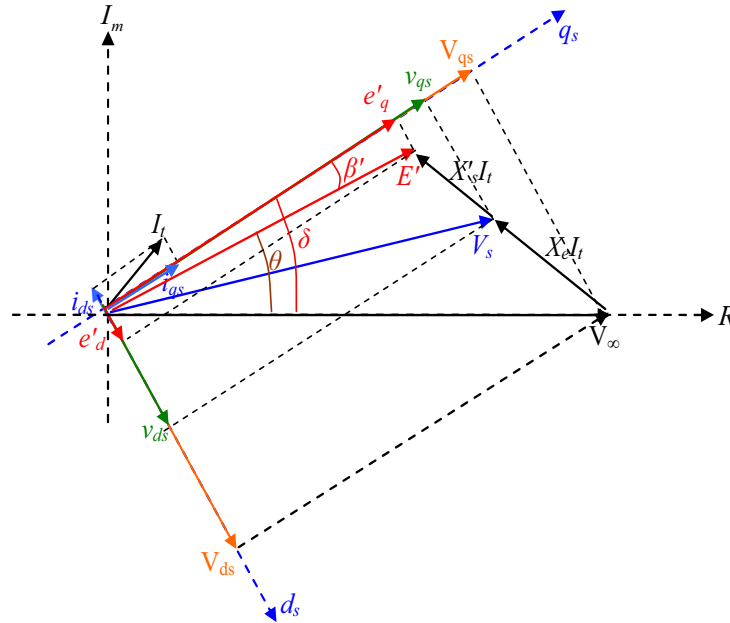


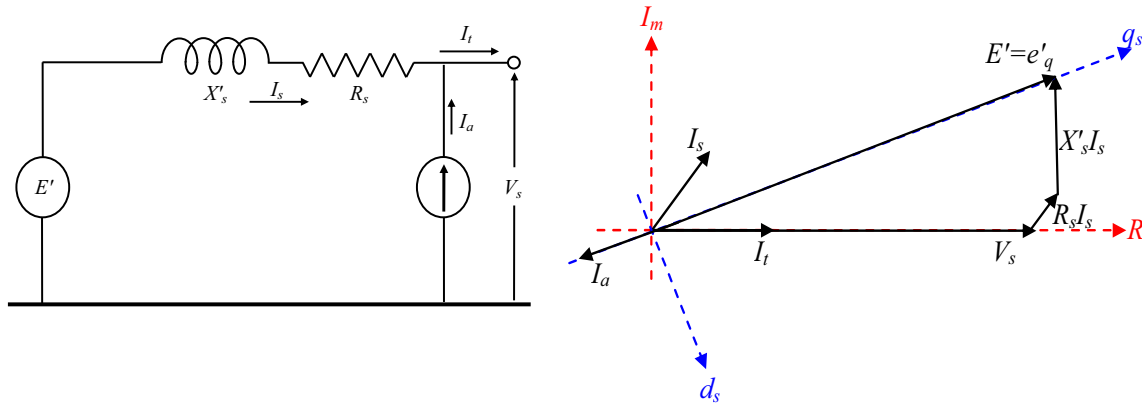
Figura 3.5 – Diagrama fasorial do SCIG × BI durante um transitório.

O ângulo β' surge durante o período transitório no sistema pelo movimento das equações e'_d e e'_q , sendo dado por $\beta' = \arctan\left(\frac{e'_d}{e'_q}\right)$, porém é válido ressaltar que quando o sistema se encontra em regime permanente o ângulo β' é anulado.

3.2 Máquina de indução duplamente alimentado (DFIG)

Para este tipo de gerador, a máquina pode ser representada pelo circuito equivalente referido ao estator, como se mostra na Figura 3.6.

Similarmente ao gerador tipo gaiola, as equações de movimento do DFIG são dadas pelas equações (3.18) e (3.19), diferenciando-se do SCIG pelo componente adicional E_{fd} e E_{fq} , que são componentes da tensão em corrente alternada (CA) aplicadas no rotor, oriundas do conversor no lado rotor e referidas ao circuito do estator. Por meio de E_{fd} , pode-se controlar a potência reativa ou a tensão terminal do gerador, através de E_{fq} , pode-se controlar a potência ativa ou a velocidade do rotor, sendo que detalhes dos controles são dados por (LOPES; ALMEIDA, 2004):



(a) Circuito equivalente (DFIG)

(b) Diagrama fasorial (DFIG)

Figura 3.6 – Ilustrações da representação do DFIG.

3.2.1 Modelo dinâmico de um gerador de indução duplamente alimentado (DFIG)

O modelamento da máquina de indução duplamente alimentada tem por base o modelo do gerador de indução em gaiola de esquilo. A diferença básica reside nas tensões do rotor, neste caso, diferentes de zero, por o rotor não se encontrar curto-circuitado. As equações que descrevem o funcionamento do gerador são (PENA, 1996; LOPES; ALMEIDA 2004; ALMEIDA, 2006; MOTA, 2006):

$$v_{ds} = e'_d - R_s i_{ds} + X'_s i_{qs} \quad (3.16)$$

$$v_{qs} = e'_q - R_s i_{qs} - X'_s i_{ds} \quad (3.17)$$

em que v_{ds} é a componente de eixo direto da tensão do estator e v_{qs} a componente de eixo em quadratura.

As componentes de eixo direto e em quadratura da tensão interna do DFIG são dadas pelas equações:

$$\dot{e}'_d = \frac{1}{T'_0} \left[-e'_d + (X_{ss} - X'_s) i_{qs} \right] + s \omega_s e'_q - \omega_s \frac{L_m}{L_{rr}} v_{qr} \quad (3.18)$$

$$\dot{e}'_q = \frac{1}{T'_0} \left[-e'_q - (X_{ss} - X'_s) i_{ds} \right] - s \omega_s e'_d + \omega_s \frac{L_m}{L_{rr}} v_{dr} \quad (3.19)$$

Sendo $E_{fq} = \frac{L_m}{L_{rr}} v_{qr}$ e $E_{fd} = \frac{L_m}{L_{rr}} v_{dr}$.

Para a máquina de indução DFIG, além das equações da tensão do estator (3.16) e (3.17) e da tensão interna (3.18) e (3.19), é importante definir as equações das correntes do rotor de eixo direto (3.20) e quadratura (3.21).

$$i_{dr} = \frac{L_m}{L_{rr}} i_{ds} + \frac{e'_q}{L_m} \quad (3.20)$$

$$i_{qr} = \frac{L_m}{L_{rr}} i_{qs} - \frac{e'_d}{L_m} \quad (3.21)$$

Por sua vez, as potências são definidas como (LOPES; ALMEIDA, 2004; MOTA, 2006):

$$P_s = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \quad (3.22)$$

$$Q_s = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} \quad (3.23)$$

$$P_r = v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr} \quad (3.24)$$

$$Q_r = v_{qr} i_{dr} - v_{dr} i_{qr} \quad (3.25)$$

Sendo P_s e Q_s as potências ativa e reativa do estator, e P_r , Q_r as potências ativa e reativa do rotor.

O torque elétrico é expresso da seguinte forma:

$$T_e = e'_d i_{ds} + e'_q i_{qs} \quad (3.26)$$

3.2.2 Estratégia de controle

O gerador de indução duplamente alimentado, é equipado com dois conversores estáticos, sendo eles:

- O conversor (C_1) interligado aos enrolamentos do rotor é equivalente a uma fonte de tensão controlada, que tem por função controlar a velocidade do rotor, bem como a potência reativa injetada ou consumida pelo gerador através do estator (MOTA, 2006).
- O conversor (C_2), conectado à rede, funciona como uma fonte de corrente controlada, cujo controle possibilita não somente impor valores de correntes desejadas, permitindo assim o controle do fluxo de potência ativa que o rotor troca com a rede, como também, o controle da tensão no barramento CC. Os conversores (C_1 e C_2), estão interligados através de um elo CC como evidencia a Figura 3.10 (POLLER, 2003).

3.2.2.1 Modelagem e controle do conversor ligado ao rotor

A modelagem do conversor (C_1) requer o uso do método de controle vetorial, conforme a Figura 3.7.

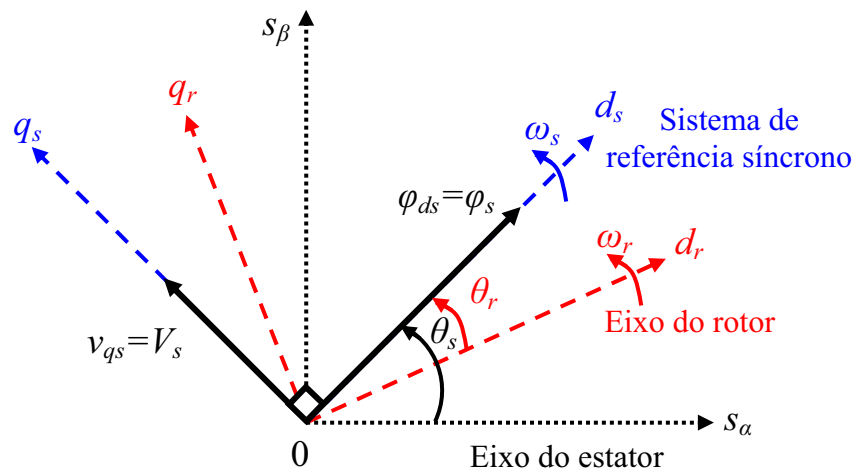


Figura 3.7 – Estratégia de controle vetorial.

Segundo Jenkins (2002), o conversor C_1 , funcionando como uma fonte de tensão controlada, impõe uma tensão alternada ao rotor da máquina. Para possibilitar o controle independente de potência e tensão do DFIG, a estratégia de controle para o conversor C_1 ,

parte da consideração de que o eixo d_s da referência d_s - q_s está sincronizada com o fluxo do estator (φ_s). Desta forma tem-se:

$$\begin{aligned} v_{ds} &= 0 \\ v_{qs} &= V_s \end{aligned} \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{ds} &= -L_{ss}i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \varphi_{qs} &= 0 = -L_{ss}i_{qs} + L_m i_{qr} \end{aligned} \quad (3.28)$$

As correntes do estator podem ser obtidas a partir da equação (3.28):

$$\begin{aligned} i_{ds} &= \frac{-\varphi_{ds} + L_m i_{dr}}{L_{ss}} \\ i_{qs} &= \frac{L_m i_{qr}}{L_{ss}} \end{aligned} \quad (3.29)$$

Nota-se que o torque elétrico e a potência ativa do gerador dependem da corrente i_{qr} do rotor.

$$\begin{aligned} P_s &= V_s i_{qs} \\ Q_s &= V_s i_{ds} \end{aligned} \quad (3.30)$$

O torque elétrico pode ser reescrito como:

$$T_e = \frac{L_m}{L_s + L_m} \frac{|V_s|}{\omega_s} i_{qr} \quad (3.31)$$

Através da equação (3.29) em (3.30), obtemos a potência ativa e reativa do estator:

$$P_s = |V_s| \frac{L_m}{L_{ss}} i_{qr} \quad (3.32)$$

$$Q_s = \frac{|V_s| L_m}{L_{ss}} i_{dr} - \frac{|V_s|^2}{L_{ss}} \quad (3.33)$$

Nota-se que a potência ativa é diretamente proporcional à componente do eixo em quadratura da corrente do rotor (i_{qr}), e a potência reativa dependente da componente do eixo direto da corrente do rotor (i_{dr}).

Para evitar a utilização de soluções complexas, optou-se por explorar controladores do tipo PI (proporcional integral), cujos ganhos e constante de tempo são ajustados por tentativa e erro, até proporcionarem a resposta desejada.

Neste estudo o sistema de controle é descrito nas Figuras 3.8 e 3.9, em que uma malha controla a velocidade angular/potência gerando o sinal de v_{qr} , e outra controla a tensão terminal/potência reativa gerando sinal v_{dr} (LOPES; ALMEIDA, 2004; MOTA, 2006; ALMEIDA, 2006).

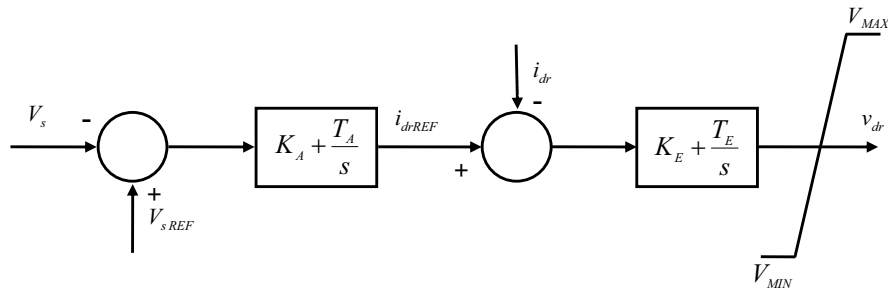


Figura 3.8 – Malha do controle da tensão terminal, potência reativa.

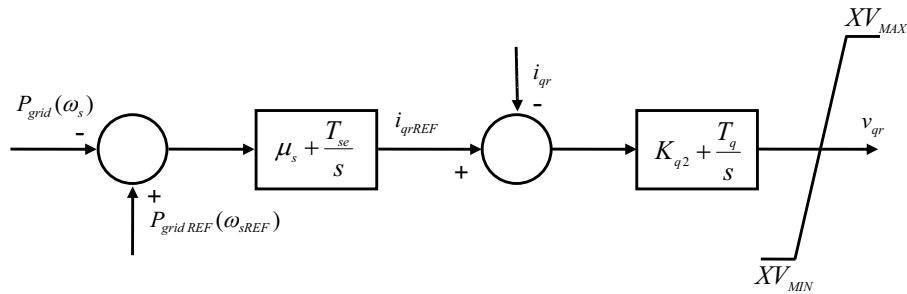


Figura 3.9 – Malha do controle da potência ativa/velocidade angular.

Das Figuras 3.8 e 3.9, s é o operador laplace.

Segundo Mota (2006), a injeção dessa tensão alternada no rotor, permite a operação com velocidade variável. A potência no rotor é dada por Müller, Deicke e De Doncker (2002):

$$P_r = -sP_s \quad (3.34)$$

A potência do DFIG entregue a rede é dada por:

$$P_{grid} = P_s + P_r \quad (3.35)$$

A potência ativa nos terminais do rotor depende do escorregamento e da potência ativa nos terminais do estator. O DFIG entrega potência ativa à rede em duas regiões de velocidade, sendo elas:

- Sub-síncrona – isto é, quando a velocidade do rotor da máquina é menor que a velocidade síncrona da rede, o escorregamento é positivo ($s > 0$), o fluxo da potência será da rede para o rotor. Desta forma, ($P_{rotor} < 0$) indica que o rotor está absorvendo potência da rede.
- Super-síncrona – quando a velocidade do rotor é maior que a velocidade síncrona da rede, o escorregamento é negativo ($s < 0$), a potência será fornecida à rede simultaneamente pelo rotor através dos conversores e pelo estator, de acordo com a Figura 3.10. Deste modo, ($P_{rotor} > 0$) indica o fornecimento de potência à rede através do rotor.

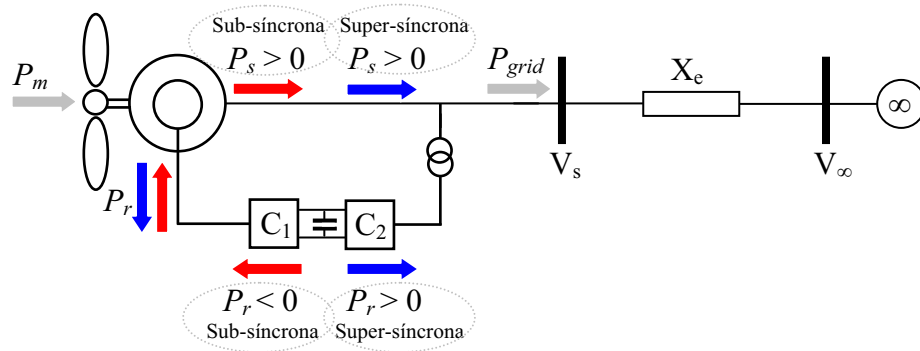


Figura 3.10 – Princípio de funcionamento do DFIG.

Desta forma é possível que o DFIG forneça energia elétrica para a rede, com a máquina trabalhando abaixo, acima e inclusive, na velocidade síncrona (HANSEN et al., 2001), caso não possível para as máquinas de indução equipadas com rotor em gaiola de esquilo.

As potências ativa (P_{grid}) e reativa (Q_{grid}) da DFIG fornecidas à rede, são dadas pelas equações (3.36):

$$\begin{aligned} P_{grid} &= P_s + P_{C2} \\ Q_{grid} &= Q_s + Q_{C2} \end{aligned} \quad (3.36)$$

$$\begin{aligned} P_{C2} &= P_r \\ Q_{C2} &= 0 \end{aligned} \quad (3.37)$$

De acordo com a equação (3.37), a potência reativa que a máquina entrega ao sistema será fornecida apenas pelo estator do gerador, ou seja, a potência reativa que o conversor C_2 troca com a rede será igual à zero $Q_{C2}=0$. Desta forma, o conversor interligado à rede funciona com fator de potência unitário, comum nas redes fracas (NUNES, 2003).

4 SCIG com SVC conectado a um SMBI

4.1 Modelo dinâmico da conexão do dispositivo SVC a um sistema barra infinita com gerador SCIG

O compensador estático de reativo SVC está conectado em derivação com a rede de transmissão, na qual injeta ou absorve potência reativa a fim de manter a tensão da barra do sistema na qual está conectado em torno de um valor especificado (HINGORANI, 2000).

A Figura 4.1 mostra a configuração mais comum do SVC, constituído por um reator controlado a tiristores (TCR – Thyristor-Controlled Reactor) ligado em paralelo com um banco de capacitores chaveado por tiristores (TSC – Thyristor-Switched Capacitor) (SONG, 1999).

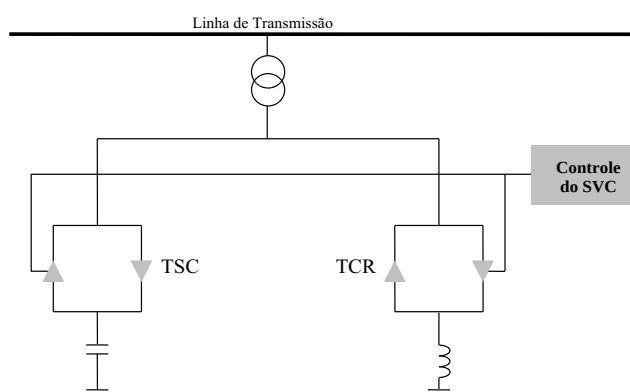


Figura 4.1 – Esquema elétrico do Static Var Compensator (SVC).

Uma vez que o compensador SVC altera a tensão da barra na qual está conectado, o mesmo pode ser visualizado como uma carga reativa variável, a qual é ajustada de forma a manter a tensão da barra aproximadamente constante.

De acordo com Akhmatov (2004) e Nassif (2004) a potência reativa que o SVC troca com o sistema é diretamente proporcional ao valor da sua susceptância e ao quadrado da tensão da barra, condição descrita pela equação.

$$Q_{SVC} = B_{SVC} V_s^2 \quad (4.1)$$

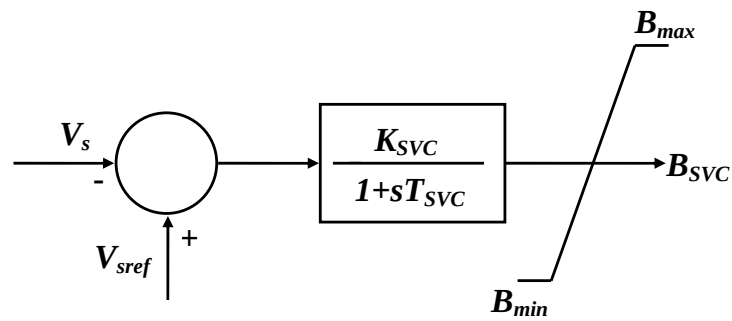


Figura 4.2 – Modelo dinâmico do SVC.

A Figura 4.2 mostra o diagrama de blocos de um modelo dinâmico que representa o controlador de tensão do SVC. Conforme esse modelo, a susceptância do SVC (B_{SVC}) é ajustada através da função de transferência de primeira ordem com ganho K_{SVC} e constante de tempo T_{SVC} de modo a controlar a tensão da barra. A constante de tempo representa o atraso do circuito de disparo dos tiristores, geralmente muito pequeno, B_{max} e B_{min} representam, respectivamente, os limites capacitivo e indutivo do equipamento. Na Figura 4.3 é apresentada a curva $V_s \times I_{SVC}$ do SVC (AKHMATOV, 2004).

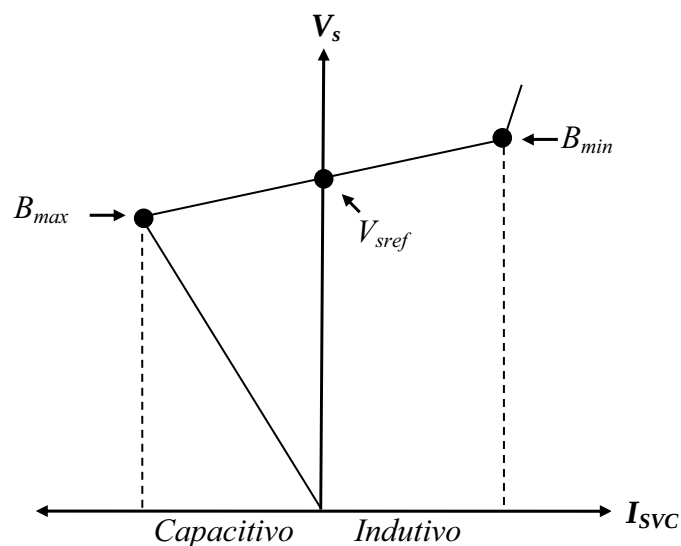


Figura 4.3 – Curva característica $V_s \times I_{SVC}$ do SVC.

De acordo com Figura 4.3, é importante notar que ao se atingir o limite de operação do modo capacitivo (B_{max}), a corrente que o SVC injeta no sistema diminui linearmente com a tensão da barra na qual ele está conectado e, conseqüentemente, o fornecimento de reativos do equipamento, dada pela equação (4.1), diminui com o quadrado dessa tensão.

4.2 Modelo matemático da conexão do SVC na barra terminal do sistema com gerador de indução SCIG

A Figura 4.4 ilustra o sistema de uma máquina de indução (SCIG) acrescida de um compensador estático de reativos SVC nos terminais, conectada à um grande sistema o qual é representado por uma barra infinita.

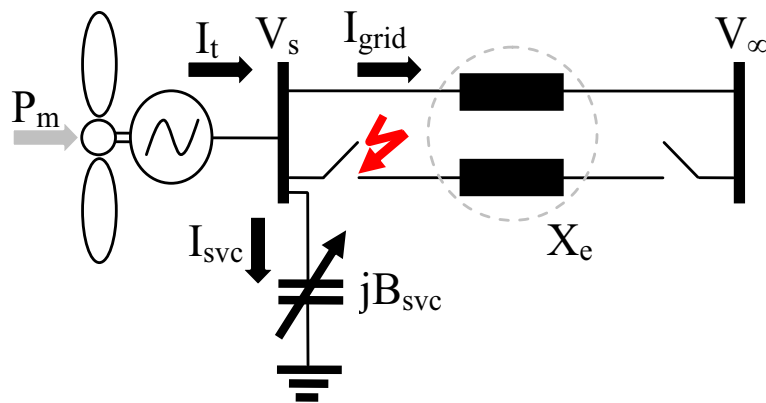


Figura 4.4 – SCIG × BI com compensador shunt SVC.

Nota-se que o sistema-teste é utilizado em Mota (2006), sendo que no presente caso, emprega-se o SVC em lugar de um capacitor fixo. A reatância equivalente X_e inclui o transformador representado pela reatância X_t e a reatância da linha de transmissão X_{lt} . A tensão terminal do gerador é representado por V_s , V_∞ é a tensão na barra infinita, I_{grid} é a corrente total fornecida a rede, I_t corrente nos terminais do gerador, I_{svc} corrente do SVC.

4.2.1 Equações do SMBI com o SVC

Quando não há um SVC instalado no sistema de transmissão de energia elétrica, pode-se determinar a tensão terminal da Figura 4.4 da seguinte forma (WANG, 2000):

$$V_s = V_\infty + jX_e I_{grid} \quad (4.2)$$

Nessa configuração (sem o SVC), o sistema é conhecido como uma máquina interligada a um barramento infinito, sendo as componentes da corrente de estator, de eixo direto e em quadratura dadas por (KUNDUR, 1994).

$$i_{ds} = \frac{e'_q - V_\infty \cos \theta}{(X_e + X'_s)} \quad (4.3)$$

$$i_{qs} = \frac{V_\infty \sin \theta - e'_d}{(X_e + X'_s)} \quad (4.4)$$

Considerando o SVC conectado ao sistema de potência como mostra a Figura 4.1, as equações que descrevem o circuito são,

$$I_{grid} = I_t - I_{SVC} \quad (4.5)$$

I_{SVC} é dada por

$$I_{SVC} = jB_{SVC}V_s \quad (4.6)$$

De acordo com Wang (2000) e Araujo (2002), manipulando-se as equações (4.2), (4.5) e (4.6) obtém-se a tensão terminal da SCIG na presença do SVC, dada por:

$$V_s = \frac{V_\infty}{1 - X_e B_{SVC}} + j \left(\frac{X_e}{1 - X_e B_{SVC}} \right) I_{grid} \quad (4.7)$$

Pode-se então considerar o gerador conectado à uma barra infinita equivalente por meio de uma linha de transmissão equivalente. A tensão do novo barramento infinito é dada por:

$$V'_\infty = \frac{V_\infty}{1 - X_e B_{SVC}} \quad (4.8)$$

Analogamente, a reatância da linha de transmissão que faz a ligação entre a máquina assíncrona e a barra infinita equivalente é:

$$X_E = \frac{X_e}{1 - X_e B_{SVC}} \quad (4.9)$$

A Figura 4.5 mostra o sistema equivalente obtido.

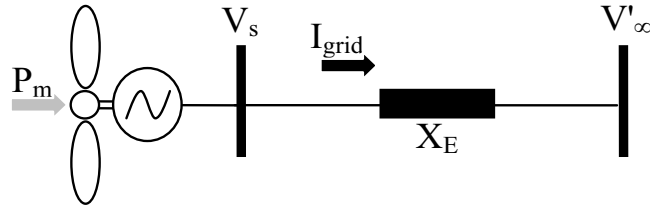


Figura 4.5 – Sistema equivalente da Figura 4.1.

Substituindo as equações (4.8) e (4.9) em (4.3) e (4.4), obtemos os cálculos das correntes do eixo direto e do eixo em quadratura, com a inclusão do dispositivo SVC.

$$i_{ds_{svc}} = \frac{e'_q - \frac{V_\infty \cos \theta}{(1 - X_e B_{SVC})}}{\frac{X_e}{(1 - X_e B_{SVC})} + X'_s} \quad (4.10)$$

$$i_{qs_{svc}} = \frac{\frac{V_\infty \sin \theta}{(1 - X_e B_{SVC})} - e'_d}{\frac{X_e}{(1 - X_e B_{SVC})} + X'_s} \quad (4.11)$$

As componentes d - q da tensão no terminal do SCIG com atuação do dispositivo SVC são obtidas,

$$v_{ds} = \frac{V_\infty \sin \theta}{(1 - X_e B_{SVC})} - \left[\frac{X_e}{(1 - X_e B_{SVC})} \right] i_{qs_{svc}} \quad (4.12)$$

$$v_{qs} = \frac{V_\infty \cos \theta}{(1 - X_e B_{SVC})} + \left[\frac{X_e}{(1 - X_e B_{SVC})} \right] i_{ds_{svc}} \quad (4.13)$$

A interpretação física das grandezas do SMBI com o SVC é a mesma do SMBI original, bastando, para reproduzi-lo, considerar que a susceptância do SVC seja zero ($B_{SVC}=0$) nas equações correspondentes.

5 Desenvolvimento do método para o estudo da estabilidade dos geradores de indução por monitoramento da tensão E'

5.1 Estudo da estabilidade dos geradores de indução através da tensão interna E'

A contribuição deste capítulo está no desenvolvimento do método analítico para a investigação da estabilidade dos geradores eólicos do tipo de indução, através da observação da tensão interna E' , diante de grandes perturbações. Considera-se uma máquina do tipo de indução em gaiola de esquilo (SCIG), representada pelo diagrama de impedâncias da Figura 5.1 com a dinâmica da tensão interna E' governada pelas dinâmicas de suas componentes de eixo direto e'_d e em quadratura e'_q (KUNDUR, 1994).

$$\dot{e}'_d = \frac{1}{T'_0} \left[-e'_d + (X_{ss} - X'_s) i_{qs} \right] + s\omega_0 e'_q \quad (5.1)$$

$$\dot{e}'_q = \frac{1}{T'_0} \left[-e'_q - (X_{ss} - X'_s) i_{ds} \right] - s\omega_0 e'_d \quad (5.2)$$

em que T'_0 é a constante de tempo transitória de circuito aberto, s o escorregamento do rotor, ω_0 a velocidade nominal e X_{ss} a reatância do estator, dada pela reatância de dispersão do estator somada à reatância de acoplamento estator-rotor.

O diagrama equivalente da Figura 5.1 mostra uma máquina assíncrona conectada a um grande sistema representado por uma barra infinita de tensão V_∞ :

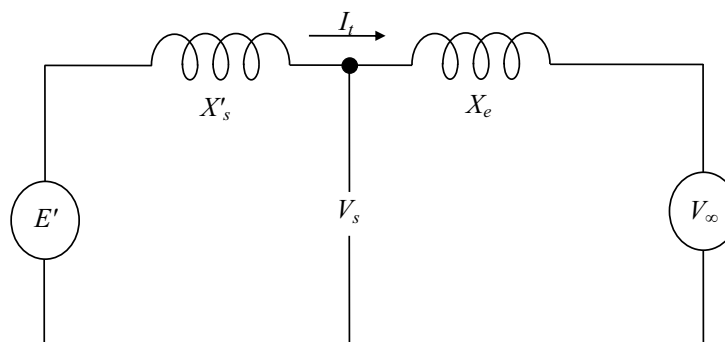


Figura 5.1 – Modelo equivalente da máquina de indução conectada a uma barra infinita.

Sendo X'_s a reatância transitória da máquina, X_e a reatância equivalente incluindo linha e transformador, I_t corrente terminal e V_s a tensão terminal do gerador as resistências das linhas de transmissão foram desconsideradas.

A dinâmica mecânica do rotor é descrita por (KUNDUR, 1994),

$$M\dot{\omega}_r = P_m - P_e \quad (5.3)$$

em que ω_r é a velocidade angular do rotor, P_m a potência mecânica, P_e a potência elétrica e M a constante de inércia.

Naturalmente, o sistema encontra-se em equilíbrio quando $\dot{e}'_d = \dot{e}'_q = \dot{\omega}_r = 0$, o que determina os valores de regime permanente das variáveis de estado, incluindo a óbvia igualdade $P_m = P_e$.

5.2 Análise da estabilidade por meio da tensão E'

Na Figura 5.2, mostra-se esta tensão em diagrama fasorial para o gerador de indução do tipo gaiola de esquilo conectado a um grande sistema através de uma linha de transmissão. Sabe-se que a SCIG absorve potência reativa do sistema, portanto a corrente I_t está adiantada em relação à tensão terminal (V_s).

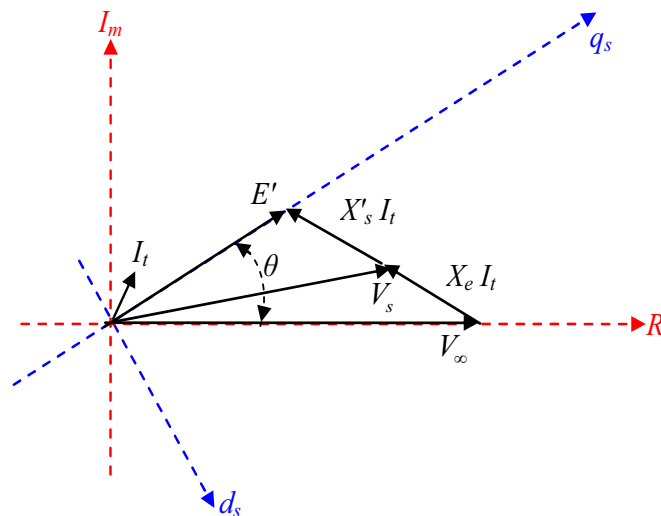


Figura 5.2 – Diagrama fasorial da SCIG × barra infinita.

A potência elétrica transmitida do gerador para o sistema é dada por:

$$P_e = \frac{E'V_{\infty}}{X_{total}} \sin \theta \quad (5.4)$$

O ângulo teta (θ), é o ângulo de defasagem entre a tensão interna (E') e a tensão da barra infinita, como mostrado na Figura 5.2. Porém, é importante destacar que este ângulo não tem o mesmo significado que o ângulo de carga (normalmente designado por delta δ) das máquinas síncronas, assim como é necessário notar que a tensão interna E' , uma vez que tem suas componentes governadas por (5.1) e (5.2) não é constante.

A equação da potência elétrica em função das variáveis E' e θ determina a superfície mostrada na Figura 5.3, onde se sobrepõe um plano representando a potência mecânica (constante).

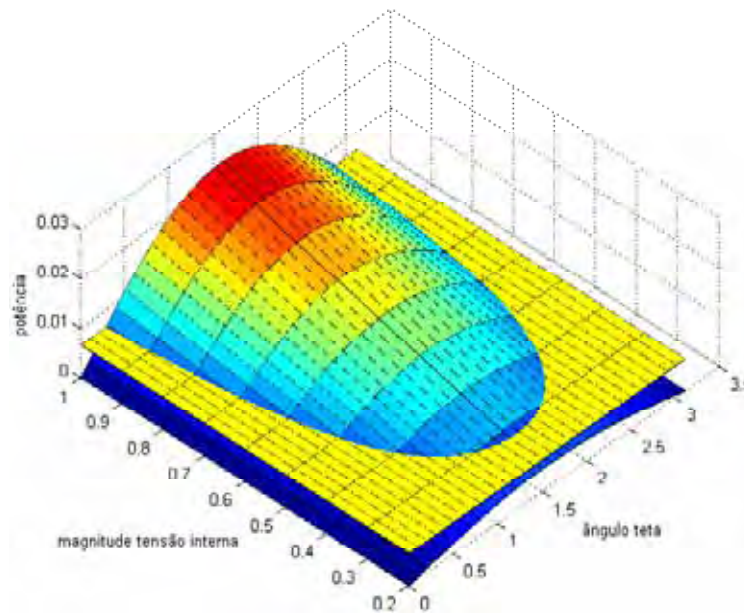


Figura 5.3 – Os parâmetros (tensão interna E' , ângulo θ , máxima potência elétrica) que definem E'_{crit} que está no vértice da parábola.

A interseção entre as duas superfícies é o lugar dos possíveis pontos de operação e o seu vértice determina a mínima tensão interna como condição necessária para a existência de equilíbrio. Dito de outro modo, a tensão interna E' avaliada no vértice da curva, determina a capacidade de transmissão justamente igual à potência entregue ao eixo da máquina e, se a tensão interna da máquina apresentar valor inferior a este, não há possibilidade de existência

do equilíbrio. Neste caso, o sistema de transmissão perde a capacidade de fornecimento de potência como decorrência da deterioração da tensão interna originada da desmagnetização da máquina. Nesta situação a potência mecânica inserida no eixo do rotor da máquina é aplicada para acelerar o rotor, e, no extremo, quando a tensão interna se anula, a totalidade da potência mecânica é convertida em potência acelerante. O valor da tensão interna avaliado no vértice da curva é aqui definido como tensão interna crítica (E'_{crit}).

A Figura 5.4 evidencia três situações de potência elétrica transmitida, com $E'^1 > E'_{crit}$, $E' = E'_{crit}$ e $E'^2 < E'_{crit}$. A primeira, traçada com $E'^1 > E'_{crit}$, apresenta capacidade de transmissão superior à potência mecânica aplicada no eixo da máquina, portanto apresentando possibilidade de operação estável, caracterizada pela existência de torque restaurativo do equilíbrio. A segunda, tangenciando o valor da potência aplicada ao eixo, caracteriza a situação limite, com a capacidade de transmissão justamente igual à potência no eixo da máquina. A terceira, com $E'^2 < E'_{crit}$ apresenta capacidade de transmissão inferior, manifestada pela deterioração da tensão interna originada da desmagnetização do SCIG e, neste caso, é impossível que toda a potência injetada no eixo da máquina seja transmitida. Nesta situação, não existe ponto de equilíbrio e uma parcela da potência mecânica é utilizada para acelerar o rotor, que instabiliza, com crescimento monotônico da velocidade.

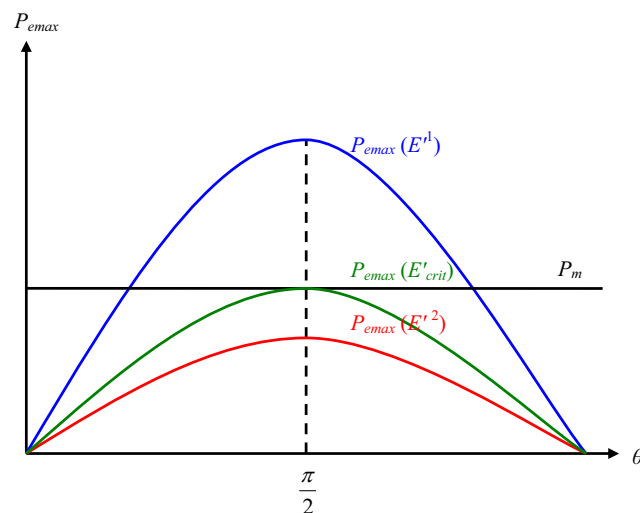


Figura 5.4 – Curvas de potência transmitida com diferentes valores da tensão interna do gerador de indução em função do ângulo teta (θ).

Considerado o exposto, determina-se o valor crítico da tensão interna para posterior uso como um apontador de criticidade durante transitório da máquina assíncrona.

A expressão que define a tensão interna crítica (E'_{crit}), é obtida a partir da equação da máxima potência transferida pelo gerador:

$$P_{e\max} = \frac{E' V_{\infty}}{X_{total}} \quad (5.5)$$

obtendo-se, no vértice da parábola, o ponto onde a curva de potência elétrica tangencia a superfície da potência mecânica,

$$E'_{crit} = \frac{P_m X_{total}}{V_{\infty}} \quad (5.6)$$

O procedimento de análise de estabilidade consiste em, durante um transitório, monitorar a tensão interna E' , comparando com o valor crítico E'_{crit} , determinando precisamente o instante em que o sistema perde a capacidade de estabilizar quando E' fica menor que E'_{crit} (ZAMPERIN; COLVARA, 2010).

Considere-se como exemplo a ocorrência de um curto-circuito trifásico próximo aos terminais do gerador. Durante o período em que a falta está aplicada, o fornecimento de potência elétrica é interrompido, ocasionando a queda da tensão interna e a aceleração do rotor, devido ao desbalanço das potências, sendo toda potência mecânica aplicada para acelerar o gerador. Eliminada a falta e restaurando a magnetização da máquina, o fornecimento da potência elétrica é restabelecido e, a partir deste instante, o sistema evolui para uma situação de regime de operação estável ou para a instabilidade de velocidade. A estabilidade se caracteriza pela evolução da tensão interna da máquina para valor acima do valor crítico, o que assegura a capacidade de transmissão suficiente para entregar ao sistema a potência que a máquina recebe no eixo, podendo-se estabelecer o equilíbrio. Se, por outro lado, a tensão interna cai abaixo do valor crítico, a capacidade de transmissão é prejudicada de modo a não ser possível entregar ao sistema a potência recebida no eixo e o rotor acelera monotonicamente constituindo-se esta situação na instabilidade de velocidade.

Entretanto, como evidenciado nas equações de $\dot{e}'_d$ (5.1) e $\dot{e}'_q$ (5.2), a tensão interna E' é governada por T'_0 não admite variações bruscas, de modo que, após a eliminação da falta, mesmo nos casos evidentemente estáveis, apresenta um necessário intervalo de tempo de regeneração. Neste intervalo, a aplicação do critério da tensão E' pode conduzir a um

resultado errôneo, apontando instabilidade quando o sistema ainda não se definiu. Visando evitar este tipo de erro, considera-se um intervalo de tempo após cessar a perturbação (no caso, eliminar a falta) antes de aplicar o método da tensão E' .

Da observação dos resultados das simulações, considera-se a aplicação do critério da mínima tensão interna após transcorrido intervalo equivalente a $T'_0/3$ a partir da eliminação da falta, como razoável. Este instante é denominado como intervalo de partida da aplicação do critério da mínima tensão interna (PACMTI).

Não é possível medir a tensão E' mas ela pode sem dificuldade ser obtida a partir de grandezas medidas no terminal da máquina, como se mostra na Figura 5.5.

Têm-se então as seguintes medidas: Tensão (V_s) e a corrente (I_t) nos terminais gerador e a potência reativa (Q_e) consumida pela máquina do sistema. Assim, considerando a potência reativa dada por

$$Q_e = V_s I_t \sin \varphi \quad (5.7)$$

obtem-se

$$\varphi = \arcsen \left(\frac{Q_e}{V_s I_t} \right) \quad (5.8)$$

e a tensão interna é determinada como,

$$\tilde{E}' = \tilde{V}_s + jX'_s I_t \angle \varphi \quad (5.9)$$

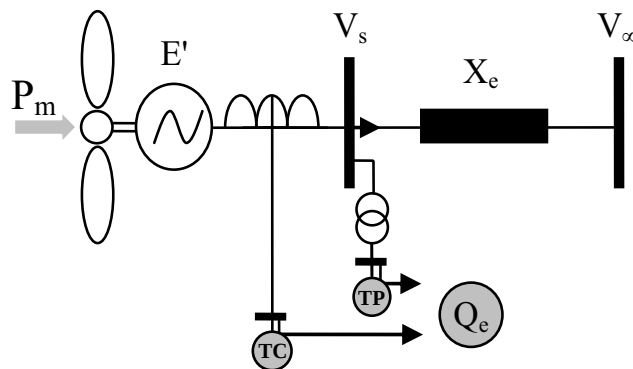


Figura 5.5 – SMBI com medidores.

O procedimento a efetuar durante um transitório consiste em monitorar o valor da tensão interna da máquina. Enquanto a tensão interna se mantiver acima do valor crítico, o sistema é dotado de torque restaurativo, podendo alcançar o equilíbrio. Se, no entanto, o valor da tensão interna cair abaixo do valor crítico após o transitório, ou seja, $E' < E'_{crit}$, não há mais possibilidade de restauração do equilíbrio e o sistema instabiliza (ZAMPERIN; COLVARA, 2010).

5.3 Estudo da estabilidade do gerador de indução através da tensão interna E' com um compensador de reativo SVC

Um dos motivos que encoraja o desenvolvimento deste trabalho, é a aplicabilidade do critério da mínima tensão interna nos sistemas equipados com máquinas de indução conectadas à um compensador estático de reativo SVC.

Enquanto a instalação do SVC resolve a questão da regulação de tensão do SCIG, sua incorporação ao modelo acrescenta novas dificuldades de análise a serem superadas e uma delas seria de como analisar a estabilidade do sistema, visto que o dispositivo adotado impõe alteração das características elétricas do sistema no tempo. Com as devidas considerações e adequações, o critério da tensão interna se aplica com a inserção do SVC, notando-se que então estaticamente o valor crítico da tensão interna passa a acompanhar a dinâmica da susceptância do SVC de modo que novos limites de operação são definidos a cada movimento do sistema e do dispositivo e estes limites são determinados imediata e analiticamente.

Nesta seção do trabalho, considera-se o sistema equivalente do SVC (conforme o capítulo 4), representado na Figura 5.6.

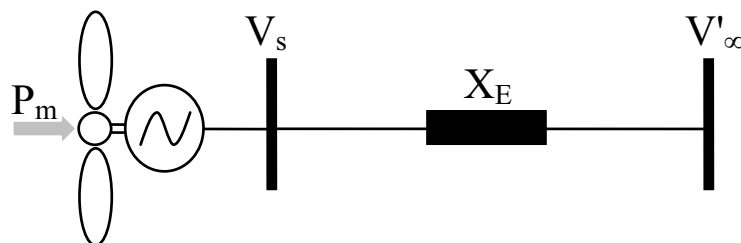


Figura 5.6 – Sistema equivalente MBI com SVC.

De acordo com as equações equivalentes (X_E , V'_∞) que redefinem o sistema com a conexão do SVC, estabelece-se a nova expressão para tensão interna crítica considerando o dispositivo SVC (E'_{crit_svc}).

$$E'_{crit_svc} = \frac{P_m}{V_\infty} (X_e + X'_s) \left[1 - \frac{X_e X'_s}{X_e + X'_s} B_{SVC} \right] \quad (5.10)$$

Considerando o aspecto estático, o valor mínimo da tensão interna se modifica quando o SVC estiver conectado no sistema, passando a definir um novo valor crítico para a tensão interna, tornando o sistema mais confiável com a atuação do dispositivo. A confiança que o dispositivo impõem, se verifica no capítulo 6, o qual ressalta que o aumento da susceptância do SVC aumenta o tempo crítico de eliminação da falta e diminui o valor crítico da mínima tensão interna, como evidencia a Figura 5.7. Em outras palavras o fato de reduzir o valor da tensão interna crítica, aumenta o limite de estabilidade do sistema.

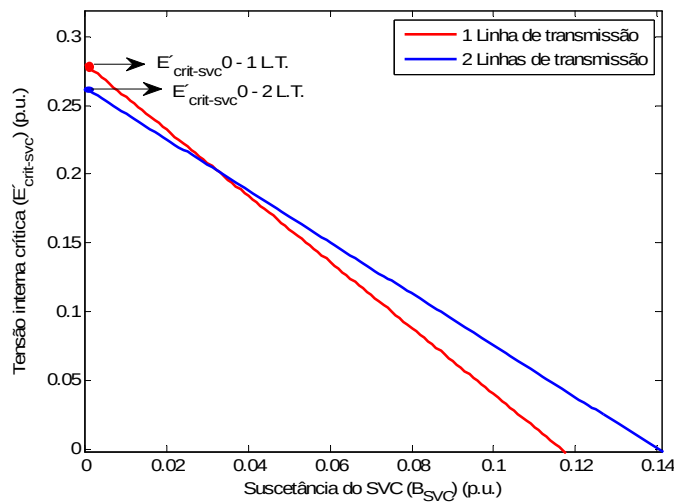


Figura 5.7 – Tensão interna crítica em função da susceptância do SVC, com uma e duas linhas de transmissão.

Têm-se então duas configurações do sistema a serem analisadas (vide Figura 5.7). O ponto definido como “ $E'_{crit_svc}^0 - 2 L.T.$ ”, indica o valor crítico inicial da mínima tensão interna na condição de operação do sistema com duas linhas de transmissão, uma característica de sistema forte, por ter uma baixa impedância.

O valor $E'_{crit_{svc}} = 0 - 1LT.$ indica o sistema com uma linha de transmissão. Observando a inclinação da reta, obtêm-se a seguinte conclusão: quanto mais fraco o sistema, maior será a dependência de $E'_{crit_{svc}}$ em relação ao SVC, isto evidenciado pela maior a declividade da reta, o que está em perfeito acordo com o fato conhecido de que a compensação é mais necessária em sistemas de transmissão mais fracos. Observem-se, exemplarmente, as situações extremas. No caso de o gerador ser conectado diretamente à barra infinita, a tensão terminal é fixada pela barra infinita (constante) e o valor de $E'_{crit_{svc}}$ é definido exclusivamente pelos parâmetros da máquina com valor constante, como evidenciado fazendo $X_e = 0$ em (5.10). Por outro lado, fazer $X_e = \infty$ em (5.10) leva a $E'_{crit_{svc}} = \infty$ concluindo-se que não há possibilidade de estabilidade, o que está em consonância com o fato de que esta situação é de a máquina desconectada do sistema.

A dependência de $E'_{crit_{svc}}$ com B_{SVC} mostra como o SVC afeta a estabilidade do sistema, e isto pode ser observado em termos da estabilidade transitória e da estabilidade dinâmica, como se observará no capítulo 6.

5.4 A origem da instabilidade do gerador de indução SCIG

A origem da instabilidade do gerador de indução SCIG, é definida pela tensão interna da máquina, e sua desmagnetização é a principal razão da instabilidade do gerador assíncrono.

Esta afirmação parte da equação de oscilação da máquina definida em (5.3). Nota-se que qualquer variação de velocidade é devida exclusivamente a variações da potência elétrica, uma vez que as demais grandezas são constantes. Observando a equação (5.4) a qual representa a potência elétrica, e focando a máxima potência transmitida (ou capacidade de transmissão) têm-se as seguintes grandezas invariáveis: tensão da barra infinita (V_∞), reatância total (X_{total}) e a única não constante é a tensão interna E' , sendo ela então a responsável pelas variações da velocidade ditadas pela equação de oscilação.

Considerando o exposto, caso o sistema sofra uma perturbação dinâmica ou transitória que possa levar o sistema à perda de estabilidade, este fato se deve à redução ou eventualmente à total anulação da capacidade de transmissão de potência decorrente da degeneração da tensão interna originada pela desmagnetização da máquina. Evidencia-se, assim, que a estabilidade ou instabilidade da máquina deve-se originalmente à tensão interna.

6 Simulações e resultados

6.1 Considerando o método analítico da tensão E'

Este capítulo tem por objetivo apresentar o método analítico da tensão E' sendo avaliado por simulações computacionais. O estudo de estabilidade transitória desenvolvido neste trabalho refere-se à análise de um sistema simplificado, consistindo somente de um gerador conectado à uma barra infinita (vide Figura 6.1). Inicialmente, este sistema será submetido a uma contingência sem ajuda de controladores e compensadores de reativos, visando testar o modelo da máquina.

Uma vez que o sistema-teste apresenta baixa complexidade, ele permite obter uma visão clara dos resultados, contribuindo para a precisão do desenvolvimento do método. Nota-se que, num sistema real é pouco provável a conexão do estator do SCIG diretamente à rede sem a compensação reativa, visto que neste caso o gerador de indução demanda grandes parcelas de potência reativa do sistema, e, submetido a um transitório, este sistema é altamente susceptível a um colapso de tensão.

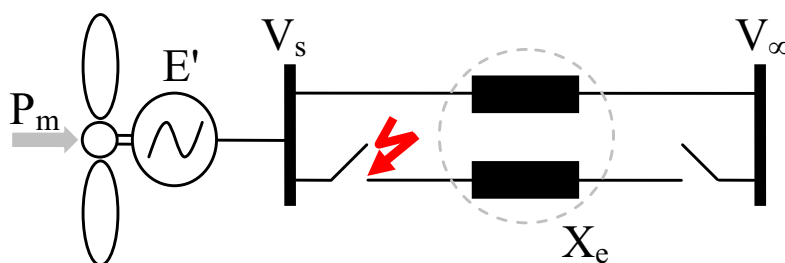


Figura 6.1 – Diagrama unifilar do SCIG x BI (barra infinita).

6.2 Análise do comportamento do SCIG durante o transitório

Considerando a topologia do sistema da Figura 6.1, foram realizados testes do tipo curto-circuito, com tempo de duração da falta de 580ms e 590ms, intervalo em que está contido o tempo crítico de eliminação da falta, ou seja, se a linha for desconectada em 580ms o sistema apresenta movimento posterior estável e se for desconectada em 590ms o movimento posterior é instável.

Considera-se que o sistema opera em condições normais (regime permanente), quando, no instante de tempo $t_f=2s$ ocorre um curto-circuito trifásico na linha de transmissão no terminal próximo do local do gerador, sendo que o defeito é eliminado posteriormente, por meio da abertura de uma linha de transmissão. Consideram-se dois tempos de duração da falta, sendo o caso criticamente estável e o criticamente instável, como segue. Durante o período em que a falta está aplicada, a tensão terminal é nula ou bastante próxima disto (vide Figura 6.2), o fornecimento de potência ativa pelo gerador ao sistema, assim como o recebimento, pelo mesmo de potência reativa, é interrompido (vide Figura 6.3), ocasionando a aceleração do rotor e queda da tensão interna.

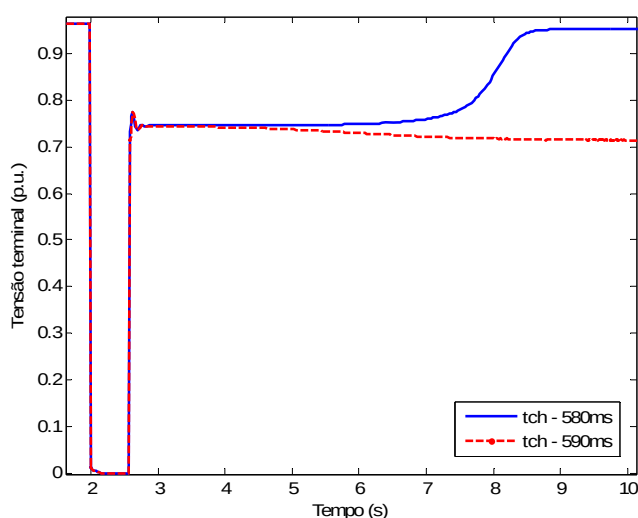


Figura 6.2 – Tensão terminal $\times$ tempo (pré-falta, falta, pós-falta).

Eliminada a falta com tempo de duração de 580ms, pode-se constatar que a tensão terminal (vide Figura 6.2) e as potências ativa (P_{es}) e reativa (Q_{es}) (vide Figura 6.3) se mostram bastante debilitadas, porém as curvas evoluem para um ponto de operação estável.

Considerando o tempo de duração da falta de 590ms, observa-se que para esta contingência, o sistema é instável. Diante desta condição, a SCIG não mantém a tensão nos seus terminais (vide Figura 6.2), neste caso não há transmissão de potência ativa (P_{ins}) e a potência reativa (Q_{ins}) (vide Figura 6.3) não estabelece um valor de operação normal. Nota-se que mesmo na condição instável do sistema a tensão terminal final não vai a zero (vide Figura 6.2), sendo este fato devido ao suporte de reativos estar provindo da barra infinita.

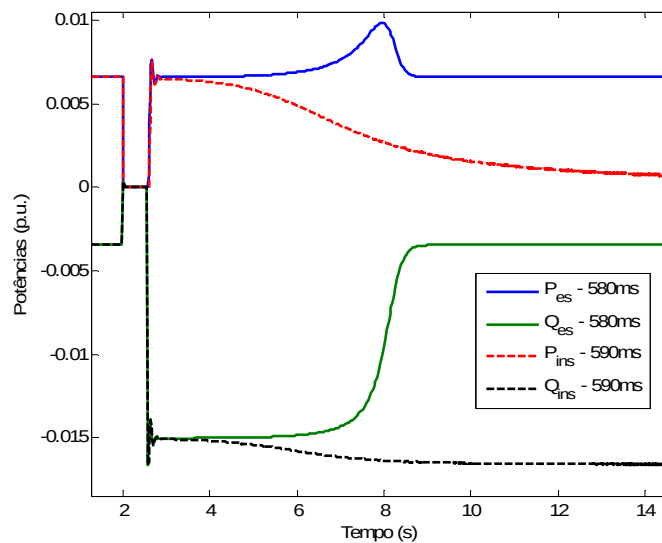


Figura 6.3 – Potências $\times$ tempo.

6.3 Análise da estabilidade do SCIG através do método da tensão interna E'

Como teste de validação do método analítico, consideram-se as situações críticas para estabilidade e instabilidade. Para o caso criticamente estável (duração da falta de 580ms), percebe-se na Figura 6.4, que a tensão interna não apresenta uma recuperação instantânea após o curto-circuito e se mostra bastante debilitada. Se o método da tensão E' fosse aplicado no instante da eliminação da falta, levaria a análise a uma falsa conclusão de instabilidade, uma vez que a tensão interna apresenta imediatamente após a eliminação da falta valor muito baixo e evidentemente abaixo do valor crítico para a estabilidade, porém nos instantes subsequentes apresenta uma rápida regeneração restabelecendo a capacidade de transmissão de potência e viabilizando a estabilização do sistema. Então, para evitar possível conclusão errônea por este motivo, é considerado um intervalo de “desabilitação” do teste, considerando-se como razoável adotar para este intervalo o valor correspondente a um terço do valor da constante de tempo T'_0 . Assim, o critério da tensão interna é efetivamente

aplicado após transcorrido tempo $\frac{1}{3}T'_0$ da eliminação da falta. Considerado a “habilitação” do

método da tensão interna no instante PACMTI, a curva da tensão E' mantém-se superior a E'_{crit} , e diante desta circunstância o sistema apresenta capacidade de transmissão superior à potência mecânica aplicada no eixo da máquina. Portanto, a condição de operação estável é caracterizada pela existência de torque restaurativo do equilíbrio.

Considerando t_{ch} -580ms na Figura 6.5, nota-se o comportamento estável da velocidade do rotor, mas a forma da curva permite considerar que o torque restaurativo encontra-se inicialmente debilitado. A debilitação do torque parte da degeneração da tensão interna, e por se tratar do limite criticamente estável do sistema.

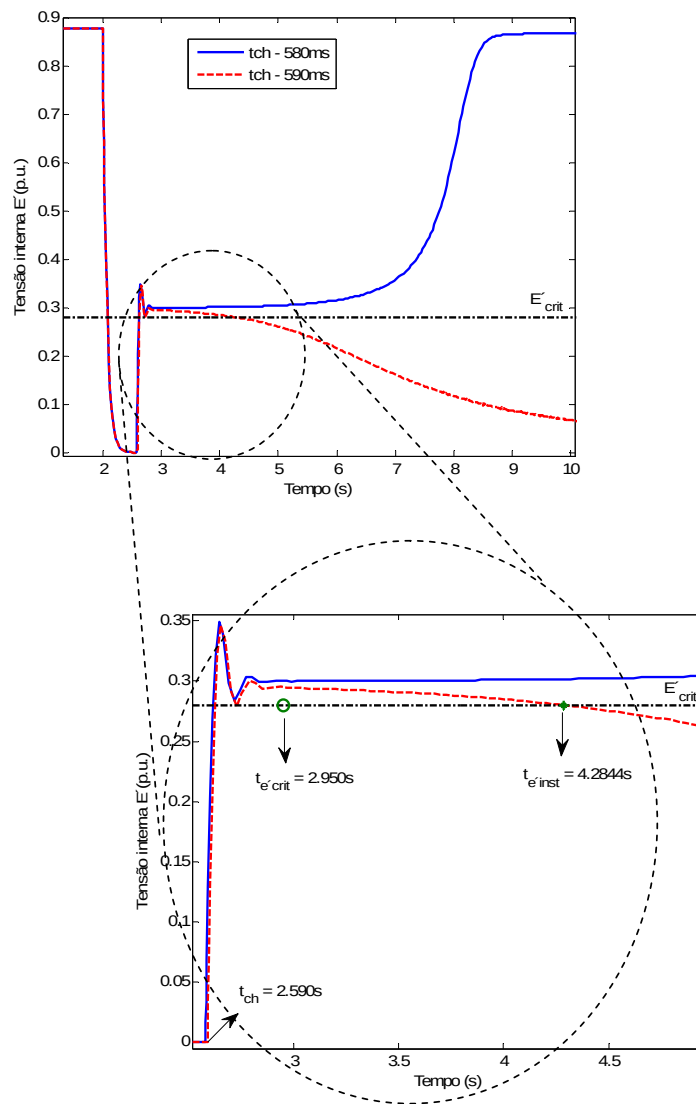


Figura 6.4 – Tensão interna E' do gerador: antes, durante e após o curto-circuito, identificando o limite da tensão E'_{crit} .

Para o caso crítico de instabilidade quando falta é eliminada em t_{ch} -590ms, ou seja, a falta é eliminada após o tempo crítico do sistema (t_{cr}), o critério da tensão interna é aplicado no instante de tempo $t_{e'crit}$ =2.950s no PACMTI e a instabilidade do sistema vem a ser detectada no instante que a tensão interna ultrapassar o valor de criticidade no ponto

$t_{e'inst}=4.2844s$, causando a perda da capacidade de transmissão da potência fornecida ao eixo da máquina em vista da degeneração da tensão interna, motivada pela desmagnetização do SCIG (ver figura 6.4). Diante desta condição, não há mais possibilidade de equilíbrio e o excedente da potência mecânica é utilizada para acelerar o rotor e a máquina instabiliza por aceleração angular, como apresenta a Figura 6.5.

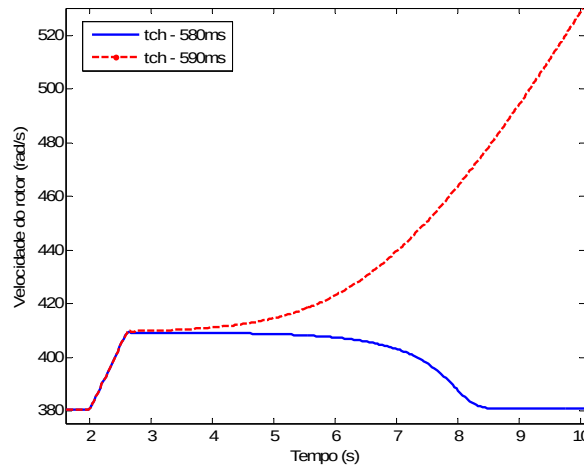


Figura 6.5 – Velocidade do rotor (rad/s) em 3 estágios (pré-falta, falta, pós-falta).

6.4 Método da tensão E' comparado com o método da velocidade

A validação e consequentemente a confiabilidade do método da tensão interna, é obtida pela observação da evolução das curvas de oscilação, após a verificação da condição de estabilidade do teste.

O uso do recurso da comparação do método da tensão interna com o critério da velocidade crítica desenvolvido em Grilo (2007), é realizada para evidenciar que existe uma equivalência entre eles. Porém é valido ressaltar que o uso comparativo, não é realizado para validar o método da tensão interna, o qual independe do método da velocidade crítica.

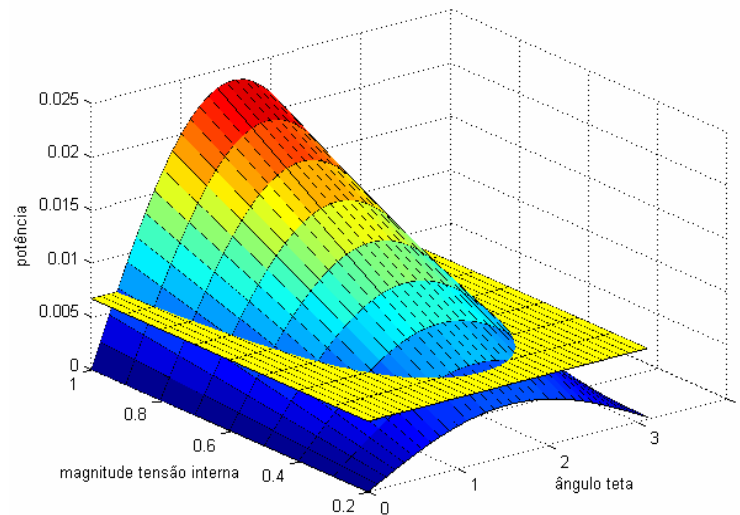


Figura 6.6 – Vértice da parábola definido como E'_{crit} .

Baseado na Figura 6.6, é definida a Figura 6.7, sendo um dos resultados mais interessantes deste trabalho. Nela, é possível observar de forma clara, a interpretação do critério da tensão interna: a reta inclinada é o lugar da máxima potência elétrica transferida em função da tensão interna. Traçada a potência mecânica constante, o ponto de intercepção destas duas retas define no eixo da tensão interna o ponto da tensão interna crítica (E'_{crit}). E quando a tensão interna violar o E'_{crit} após o PACMTI, o sistema torna-se instável por falta de capacidade de transmissão da potência aplicada ao eixo da máquina. Uma observação importante a ser tomada, em condições de potência mecânica “variável” seja por ação de regulação de velocidade ou por ação de variações da intensidade do vento do gerador eólico, o ponto de interseção excursiona sobre a linha inclinada determinando a correspondente excursão de E'_{crit} sobre o eixo de E' , e esta informação pode ser utilizada em estratégias de controle e proteção contra instabilidade.

Os dois métodos se tornam evidentes quando, comparados nas condições limites da es/instabilidade.

Caso estável – Considerando um curto-circuito com duração de 580ms, observa-se a estabilidade do sistema com o critério da mínima tensão interna, através das seguintes condições: $E' \geq E'_{crit}$ em todo instante decorrido após o PACMTI de modo que a $P_{e\max} \geq P_m$ e a evolução do movimento posterior do sistema evidencia que um novo ponto de operação estável é alcançado. Comparando com o método analítico da velocidade crítica, a velocidade do gerador opera dentro da faixa de velocidade estável do escorregamento entre $s_0 \leq s \leq s_{cr}$, conforme a Figura 6.8 (GRILO, 2007).

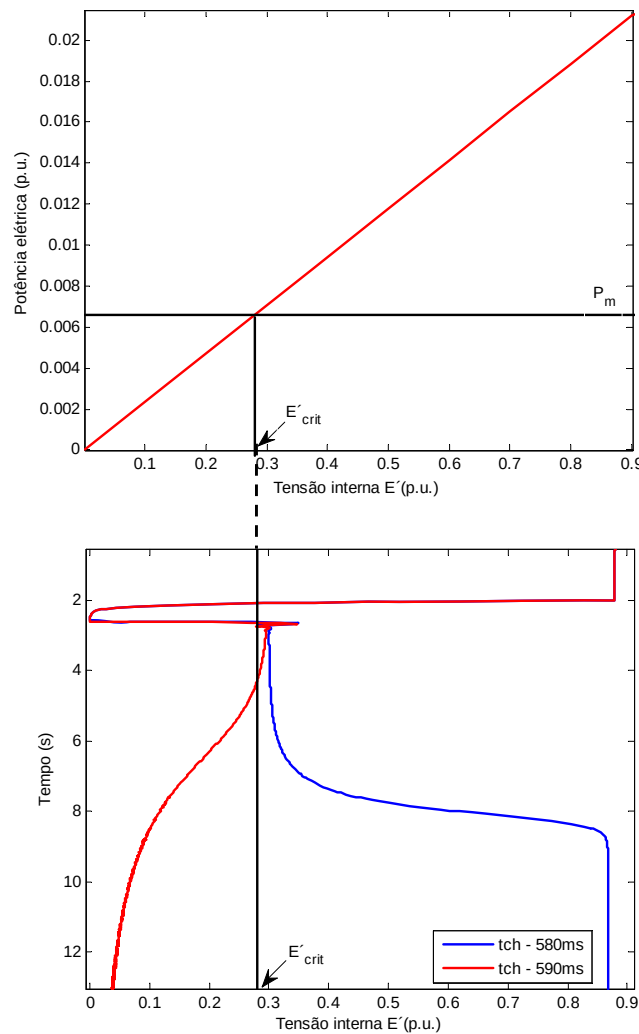


Figura 6.7 – Conceito do critério da mínima da tensão interna.

Caso instável – Considerando um curto-circuito com duração de 590ms, nos instantes iniciais após a eliminação da falta e antes de transcorrido o PACMTI o sistema volta operar transitoriamente com tensão interna superior a E'_{crit} , porém na sequência a tensão não se sustenta, decaindo para valor inferior ao crítico e o sistema não mais reúne condições para retomar a estabilidade. Ou seja, o sistema apresenta capacidade de transmissão inferior a potência mecânica aplicada no eixo da máquina, e uma parcela da potência mecânica é utilizada para acelerar o rotor da máquina, que instabiliza com crescimento monotônico da velocidade, caracterizando a instabilidade do sistema. Retomando a comparação com o critério da velocidade, observa-se que o s_{cr} é ultrapassado (vide Figura 6.8), uma vez violado o limite, define-se a instabilidade do sistema segundo Grilo (2007) e Samuelson e Lindahl (2005).

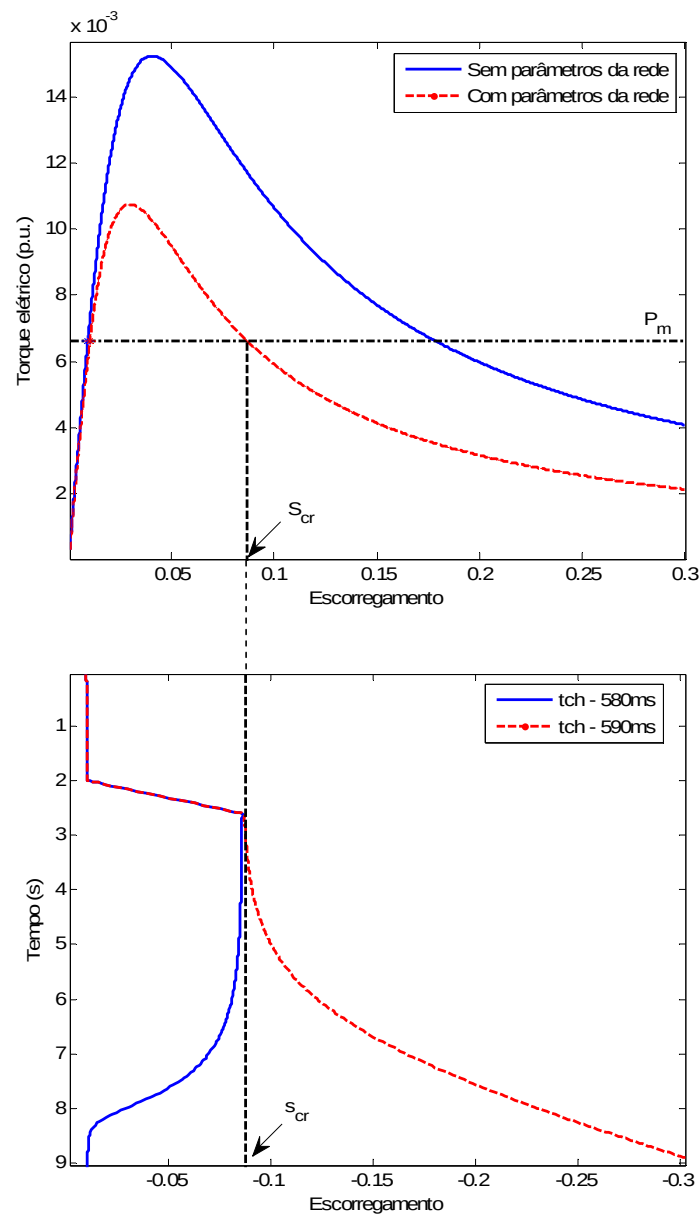


Figura 6.8 – Determinação dos pontos de estabilidade, através do método da velocidade crítica.

6.5 Estudo da estabilidade dos geradores de indução através da tensão interna E' com a instalação do compensador estático de reativo (SVC)

Nesta etapa do trabalho, o objetivo é analisar o comportamento do critério da tensão interna, com a compensação reativa no sistema e em seguida, realizar o estudo da estabilidade transitória. O sistema analisado é o da Figura 6.9.

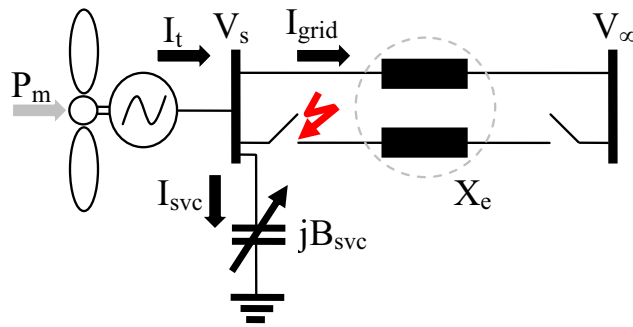
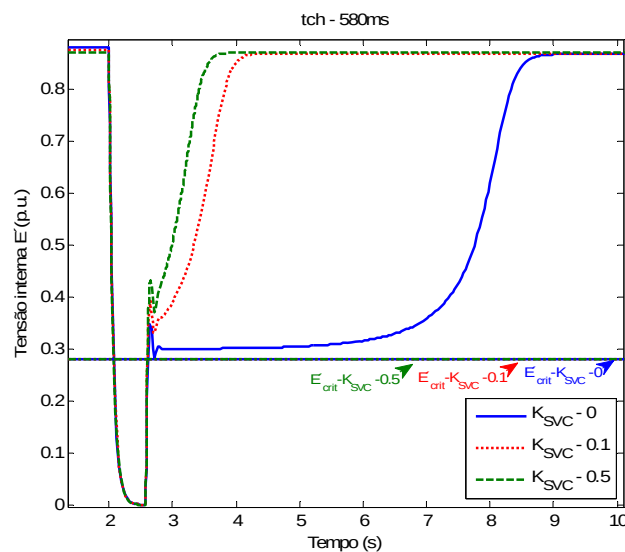


Figura 6.9 – SCIG × BI com SVC.

6.5.1 Tempo de falta t_{ch} – 580ms (estável sem o SVC)

O sistema-teste da Figura 6.9, está operando em regime permanente, quando no instante de tempo $t_f=2s$ sofre um curto-circuito trifásico, próximo à barra terminal do gerador, lugar onde se encontra o dispositivo compensador de reativo (SVC).

Tendo em conta que o tempo crítico do sistema sem o SVC, é de $t_{cr}=580ms$, observa-se que, no caso sem compensação, a tensão terminal (vide Figura 6.11) e a tensão interna (vide Figura 6.10) da máquina são muito susceptíveis de degeneração diante de perturbações do sistema, e com a inserção do compensador estático de reativo SVC, estas tensões apresentam comportamento mais robusto durante e após o período transitório. Verifica-se que, quanto maior a o ganho do dispositivo SVC menor o tempo para o sistema atingir o seu novo ponto de operação em regime permanente.



6.10 – Tensão interna E' × tempo com $t_{ch}=580ms$.

Quanto maior o ganho do dispositivo SVC, maior o tempo de eliminação da falta, nota-se: $K_{SVC}=0$ o $t_{cr}=580\text{ms}$; $K_{SVC}=0.1$ o $t_{cr}=810\text{ms}$; $K_{SVC}=0.5$ o $t_{cr}=978\text{ms}$.

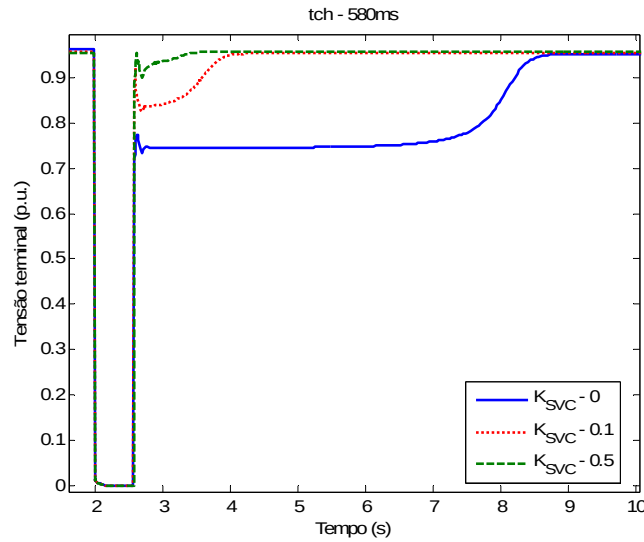


Figura 6.11 – Tensão terminal $\times$ tempo com $t_{ch}=580\text{ms}$.

De acordo com as Figuras 6.12 e 6.13 que representam a velocidade da máquina, nota-se que, aplicada a falta, o fornecimento de potência é interrompido e a potência mecânica é aplicada inteiramente sobre a inércia do rotor. Por este motivo, a máquina acelera, e quando a falta é eliminada, a transmissão de potência elétrica é retomada e o gerador inicialmente desacelera e posteriormente, restabelecido o balanço de potência, alcança o seu novo ponto de equilíbrio.

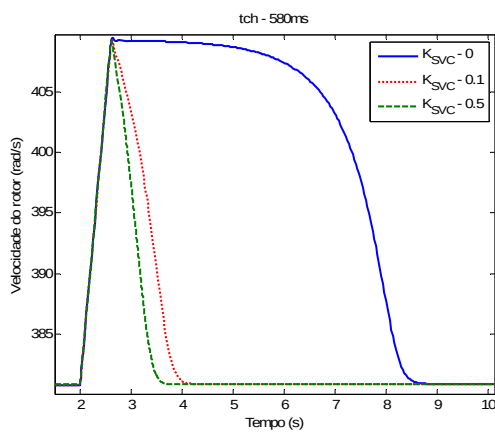


Figura 6.12 – ω_r (rad/s) $\times$ tempo.

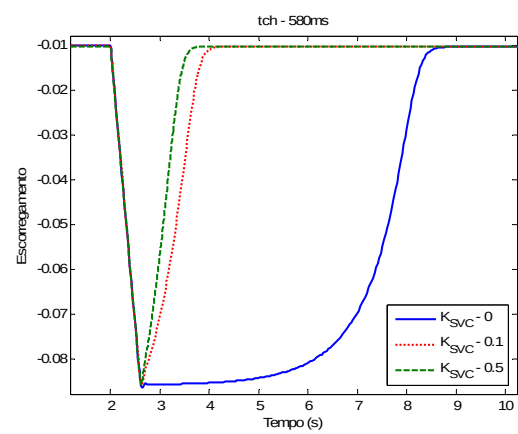


Figura 6.13 – Escorregamento $\times$ tempo.

Dos resultados obtidos, a melhoria na estabilidade do sistema com a instalação do SVC, foi substancial. Conforme se aumenta o ganho do dispositivo, mais rápida é a recuperação do sistema após a eliminação da falta.

6.5.2 Tempo de falta t_{ch} – 590ms (instável sem o SVC)

Suponha-se agora que o tempo de falta seja aumentado para 590ms, lembrando que, neste caso, o sistema é instável sem a atuação do SVC ($K_{SVC}=0$). Com aumento do ganho do SVC o sistema se torna mais seguro, e aquela perturbação já não causa instabilidade. Uma vez que o dispositivo SVC é considerado no sistema, a tensão interna apresenta uma rápida regeneração após o transitório, restabelecendo a capacidade de transmissão de potência e viabilizando uma maior margem de estabilidade avaliada através da metodologia da tensão interna.

É importante entender a maneira como o transitório do sistema ocorre. À medida que a duração da falta é aumentada, maior o intervalo da interrupção de fornecimento de potência para o sistema, e mais acentuada é a desmagnetização da máquina. Neste caso, a instabilidade pode ser causada pela incapacidade de fornecimento de potência, como mostra a curva correspondente a $K_{SVC}=0$ (vide Figura 6.14). Porém, com o aumento do ganho do SVC em 0.1 e 0.5, a tensão interna se recupera rapidamente após o período de falta, implicando diretamente no mais rápido restabelecimento da capacidade de transmissão, e o sistema que antes era instável passa a ser estável, como apresenta a Figura 6.14.

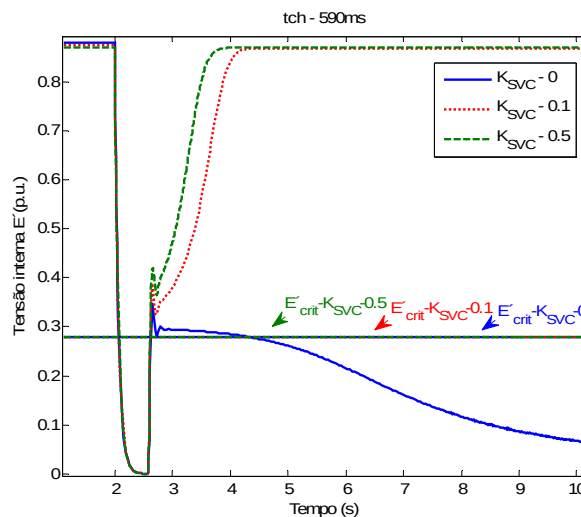


Figura 6.14 – Tensão interna $E' \times$ tempo com t_{ch} -590ms.

Os valores críticos da tensão interna das Figuras 6.10 e 6.14, são: $E'_{crit-ksvc-0} = 0.28$, $E'_{crit-ksvc-0.1} = 0.2796$, $E'_{crit-ksvc-0.5} = 0.2792$. Apesar de não ser muito significativa a redução dos valores da tensão interna crítica, nota-se por outro lado que o valor está se movimentando com a atuação do SVC. Na próxima seção, o movimento do valor crítico da tensão interna se torna evidente na Figura 6.20.

De acordo com a Figura 6.15, mesmo no caso de instabilidade com a tensão interna indo a zero, a tensão terminal se mantém próxima 0.7 p.u. Este motivo, se dá pelo suporte de reativo estar provindo da barra infinita, porém, é válido ressaltar que não existe potência ativa fluindo no sistema.

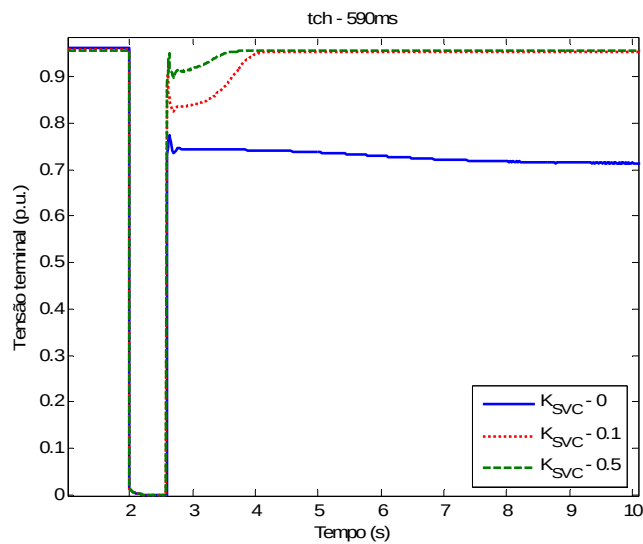


Figura 6.15 – Tensão terminal $\times$ tempo com t_{ch} -590ms.

De acordo com a equação (6.1), define-se o valor final da tensão terminal quando o sistema é instável, considerando que $X_{e\ pos}$ é a reatância do sistema pós-falta.

$$V_{s\ ins} = \frac{X'_s}{X'_s + X_{e\ pos}} V_{\infty} \quad (6.1)$$

A finalidade da compensação em derivação é fazer o suporte de reativo ao SCIG e, com o controle dinâmico, consequentemente melhorar a estabilidade do sistema. Com o aumento do ganho em 0.5, nota-se que a tensão terminal (ver Figura 6.15) apresenta uma recuperação rápida.

De acordo com as Figuras da velocidade (6.16) e (6.17), quando o SVC não estava atuante no sistema ($K_{SVC}=0$) com $t_{ch}=590ms$ o sistema era instável e, com o aumento da capacidade do dispositivo o sistema passou a ser estável. Nota-se que o uso do SVC aumenta o tempo crítico de eliminação da falta, maximizando o aumento da margem de estabilidade transitória do sistema.

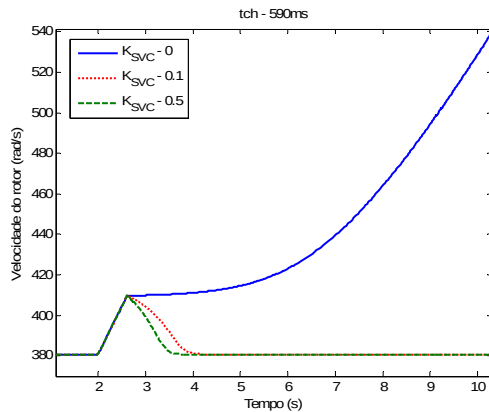


Figura 6.16 – ω_r (rad/s) $\times$ tempo.

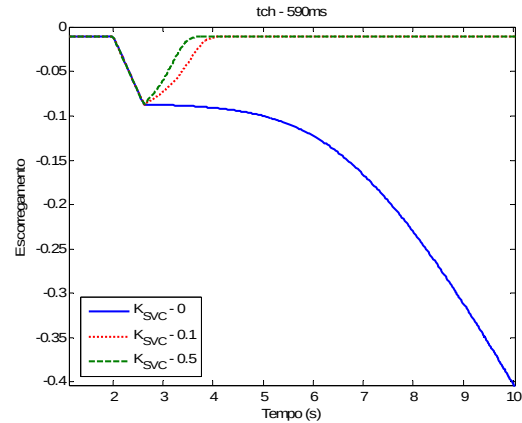


Figura 6.17 – Escorregamento $\times$ tempo.

6.6 Comportamento do SCIG com SVC

Como foi dito no início deste capítulo, a intenção deste estudo é de analisar o sistema com e sem a ajuda de controladores e averiguar o limite da estabilidade transitória. Visando suprir a necessidade de suporte de reativo, foi considerada a instalação de um SVC o qual, além da compensação reativa necessária ao desempenho satisfatório do SCIG, propicia a possibilidade de regulação automática de tensão nos terminais da máquina e, por consequência, controle do desempenho dinâmico/transitório do sistema.

Neste trabalho, considera-se que o SVC atua nos três períodos do sistema sendo eles: pré-falta, falta e pós-falta. Conforme a Figura 6.18 e 6.19 quando a falta é instalada no tempo $t_f=2s$ a corrente e a variação da susceptância do SVC atingem valores bastante significantes. Isto mostra a necessidade de potência reativa que o sistema passa a ter no período transitório. Nota-se que a susceptância do SVC atinge o valor máximo, definido como o limite capacitivo do SVC. Se o limitador não fosse considerado o sistema ficaria sujeito a um excesso por parte do fornecimento de reativo no que resultaria a instabilidade do sistema.

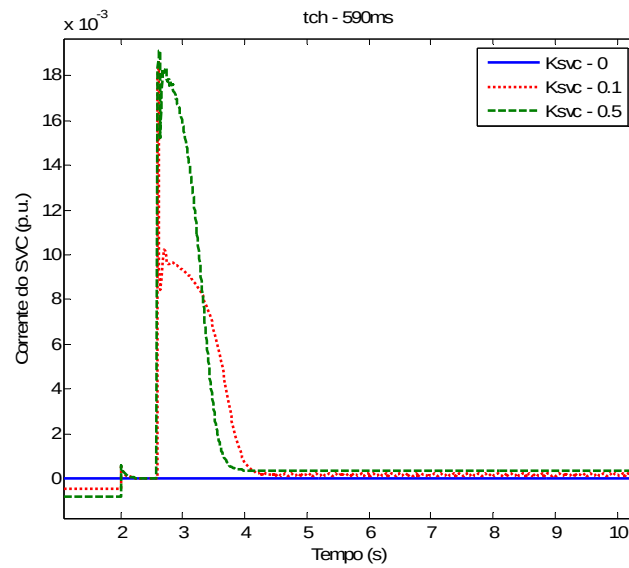


Figura 6.18 – Corrente o SVC× tempo.

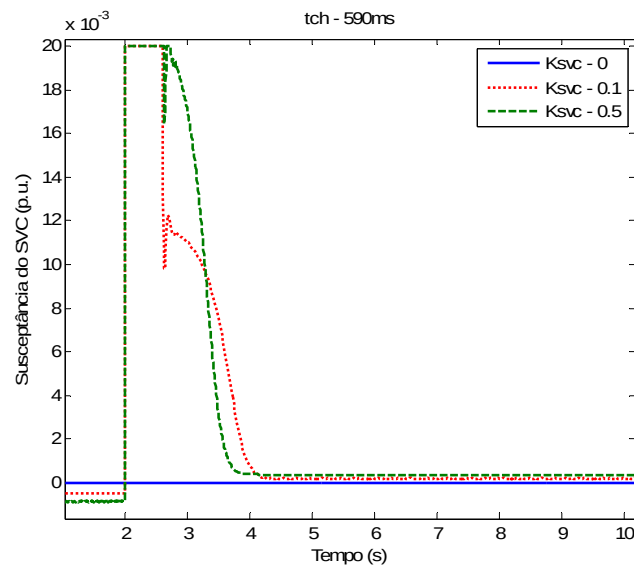


Figura 6.19 – Variação da susceptância do SVC × tempo.

Na Figura 6.20 têm-se o valor crítico da tensão interna em função dos valores da susceptância do SVC. Nota-se que o valor $E'_{crit}{}^0$ indica a mínima tensão interna para o sistema na configuração do sistema pós-falta.

O método da tensão interna é capaz de se redefinir com a variação do compensador evidenciando um novo limite de estabilidade, caso ilustrado na Figura 6.20, conforme se aumenta a capacidade de compensação do SVC no sistema, reduz-se o valor da mínima tensão interna. Com isto, o sistema vem a apresentar uma nova característica com a conexão de um compensador estático de reativo, de modo que o critério da tensão interna define uma nova

margem de estabilidade, tornando o sistema mais robusto. Conforme a Figura 6.14, o sistema sem atuação do SVC era instável com t_{ch} -590ms, e com a atuação do dispositivo o sistema passou a ser estável dando a possibilidade do aumento do tempo de chaveamento, desta forma aumentando a margem de estabilidade.

Visto que o gerador de indução demanda grandes parcelas de potência reativa do sistema, a conexão de um compensador estático de reativo melhora a estabilidade do sistema. Estes casos podem ser visualizados nas Figuras 6.14 a 6.17.

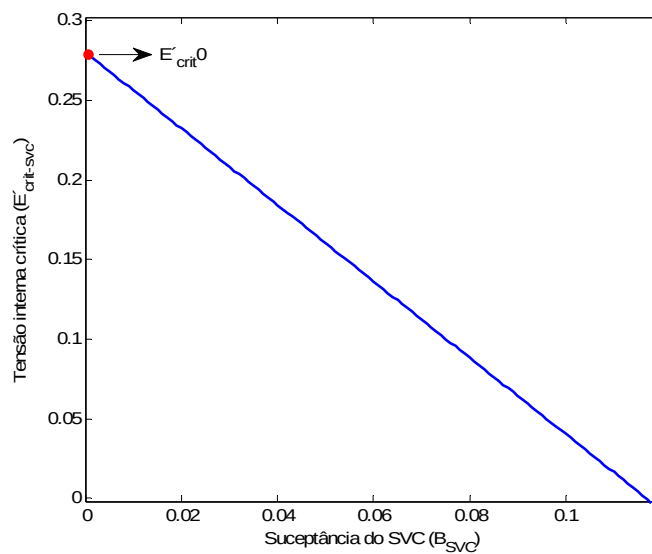


Figura 6.20 – Tensão interna crítica em função da susceptância do SVC.

6.7 Análise da influência do critério da mínima tensão interna em redes fortes e fracas

Esta seção tem por objetivo apresentar a aplicação do critério da tensão interna para análise da estabilidade do gerador de indução SCIG conectado a redes elétricas fortes e fracas.

Considera-se na Tabela 6.1 elevações da reatância do sistema de transmissão da Figura 6.9 em 50 e 100%, e o sistema submetido a um curto-circuito em situações criticamente estáveis. Para avaliação do método da tensão interna e para melhora do sistema utiliza-se um dispositivo dinâmico compensador de reativo SVC.

O sistema de transmissão se encontra em duas configurações: $X_{e\text{pré-falta}}$ com duas linhas de transmissão, e $X_{e\text{pós-falta}}$ com uma linha de transmissão.

Tabela 6.1 – Análise do sistema com aumento do carregamento do sistema com e sem SVC.

	Sem alteração	+50%	+100%
$X_{e\text{pré-falta}}$	9.277 p.u.	13.916 p.u.	18.554 p.u.
$X_{e\text{pós-falta}}$	11.887 p.u.	17.831 p.u.	23.774 p.u.
Tempo crítico	580ms	358ms	219ms
Tempo crítico $K_{SVC} 0.1$	810ms	689ms	610ms
Tempo crítico $K_{SVC} 0.5$	978ms	854ms	749ms

Analisando a Tabela 6.1, tem as seguintes considerações:

- Quanto mais fraco for o sistema de transmissão devido a linha ser mais longa (aumento da reatância em 50 e 100%), o sistema fica mais frágil durante o transitório, e consequentemente diminui-se o tempo crítico de eliminação de falta.
- Com o aumento do ganho do dispositivo SVC (K_{SVC} em 0.1 e 0.5), aumenta-se o tempo crítico de eliminação de falta, tornando o sistema mais seguro.

A Tabela 6.2 tem por finalidade considerar os valores da tensão interna crítica nas situações limites entre estabilidade e instabilidade.

Os valores identificados da tensão interna crítica seguem a seguinte descrição das condições críticas *pré-falta* - o sistema opera com duas linhas de transmissão, *pós-falta* - quando o sistema foi submetido a um curto-circuito e uma linha de transmissão foi desconectada para eliminá-lo.

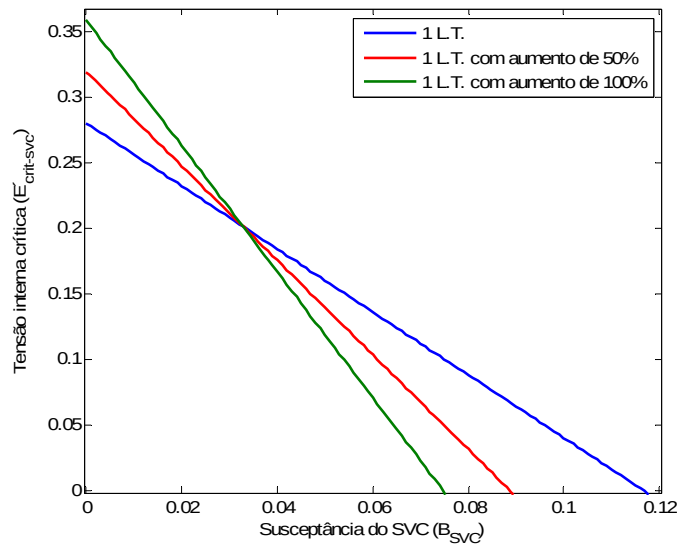
Para o caso *instável: pré-falta* considera-se o sistema em regime permanente com duas linhas de transmissão, o valor de E'_{crit} *pós-falta* representa o valor da tensão interna na trajetória interceptando o valor crítico, que corresponde ao instante em que o sistema perde a capacidade de transmissão de potência, motivada pela deterioração da tensão interna originada pela desmagnetização da máquina, e o sistema evolui para instabilidade.

Tendo a linha de transmissão o dobro do seu comprimento, o tempo crítico de eliminação da falta é reduzido, e a tensão interna crítica aumenta, tornando o sistema mais vulnerável a uma condição de instabilidade.

Tabela 6.2 – Valores da tensão interna crítica em diversas configurações do sistema.

	Rede sem alteração		Aumento de 50%		Aumento de 100%	
	t_{ch}	E'_{crit}	t_{ch}	E'_{crit}	t_{ch}	E'_{crit}
Sem SVC	t_{ch} -580 estável	pré-falta - 0.2628	t_{ch} -358 estável	pré-falta - 0.2934	t_{ch} -219 estável	pré-falta - 0.3240
		pós-falta - 0.28		pós-falta - 0.3193		pós-falta - 0.3585
K_{SVC} 0.1	t_{ch} -810 estável	pré-falta - 0.2638	t_{ch} -689 estável	pré-falta - 0.2944	t_{ch} -610 estável	pré-falta - 0.3245
		pós-falta - 0.2796		pós-falta - 0.3177		pós-falta - 0.3547
	t_{ch} -811 instável	pré-falta - 0.2638	t_{ch} -690 instável	pré-falta - 0.2944	t_{ch} -611 instável	pré-falta - 0.3245
		pós-falta - 0.2496		pós-falta - 0.2667		pós-falta - 0.2827
K_{SVC} 0.5	t_{ch} -978 estável	pré-falta - 0.2644	t_{ch} -854 estável	pré-falta - 0.2948	t_{ch} -749 estável	pré-falta - 0.3245
		pós-falta - 0.2792		pós-falta - 0.3167		pós-falta - 0.3532
	t_{ch} -979 instável	pré-falta - 0.2644	t_{ch} -855 instável	pré-falta - 0.2948	t_{ch} -750 instável	pré-falta - 0.3245
		pós-falta - 0.2321		pós-falta - 0.2474		pós-falta - 0.2626

A Figura 6.21 mostra quanto mais longa for a linha, ou seja, conforme se aumenta a impedância do sistema de transmissão, mais acentuada é a declividade da reta, e consequentemente menor o tempo crítico do sistema. Neste caso o critério da tensão interna aponta um menor limite de estabilidade para o sistema, pois o valor de E'_{crit} está aumentando.

Figura 6.21 – Tensão interna crítica $\times B_{svc}$.

6.8 Análise do desempenho do critério da mínima tensão interna E' em diferentes condições de carregamento do sistema

O critério da tensão interna é aplicado para análise da estabilidade do sistema em diferentes condições de carregamento do sistema. Submete-se o sistema a aumentos no carregamento em porcentagens de 10 a 50%, e são obtidos os tempos críticos para cada caso.

Observe a Figura 6.22 onde se mostra a superfície da potência elétrica e três exemplos de planos de potência mecânica em função das variáveis E' e θ . Nota-se que para o caso de aumento de 20%, a tensão interna crítica assume o valor $E'_{crit}=0.3361$ p.u. como mostrado na Tabela 6.3. Aumentando o carregamento para 50% o sistema ficou muito mais frágil, reduzindo o tempo crítico do sistema, e a tensão interna passando para $E'_{crit}=0.4201$ p.u.

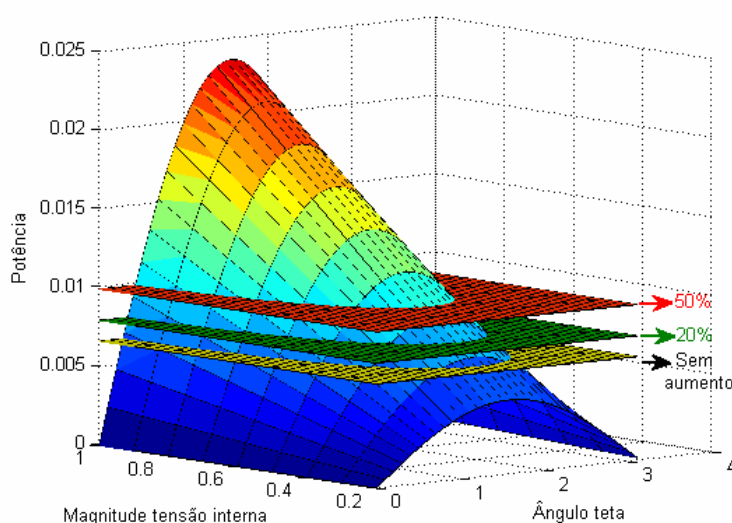


Figura 6.22 – Superfície evidenciando ao aumento do carregamento do sistema

Em situações de carregamentos crescentes, a Tabela 6.3 mostra que o valor da tensão interna aumenta e o tempo crítico diminui.

Tabela 6.3 – Valores do tempo crítico e do E'_{crit} para diversos carregamentos do sistema.

Aumento do carregamento em %	Tempo crítico (t_{cr})	Tensão interna crítica (E'_{crit}) pós-falta
Sem alteração	580ms	0.2800
10 %	439ms	0.3080
20 %	312ms	0.3361
30 %	218ms	0.3641
40 %	162ms	0.3921
50 %	89ms	0.4201

Observando a Figura 6.23, nota-se a medida que o carregamento do sistema aumenta, o valor a tensão interna sofre um aumento, neste caso existe uma redução da margem da estabilidade identificado pelo critério da mínima tensão interna.

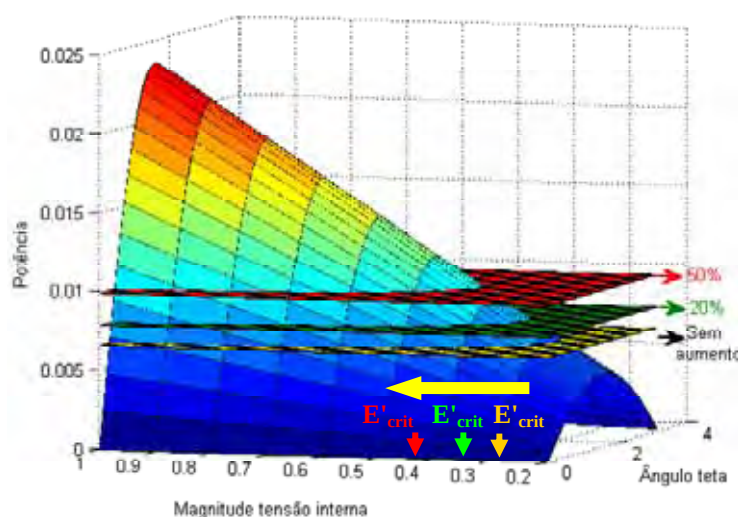


Figura 6.23 – Superfície evidencia o movimento da tensão interna crítica com aumento do carregamento do sistema.

6.8.1 Análise do comportamento da tensão interna E' com aumento do carregamento em 50% e com curto-circuito

Nesta seção do trabalho considera-se o sistema com aumento de 50% no carregamento do sistema. O transitório do tipo curto-circuito trifásico é aplicado no instante de tempo $t_f=2s$ com duração de 89ms, sendo este o limite criticamente estável do sistema. Na avaliação das simulações é realizada a compensação dinâmica de reativos com dispositivo SVC.

Eliminada a falta sem a compensação de reativo a recuperação da tensão interna se apresenta bastante debilitada. Com aumento do ganho do dispositivo SVC a trajetória da tensão interna após eliminação do transitório volta para seu ponto de operação rapidamente, observa-se que o valor da mínima tensão interna se altera com a inclusão do compensador estático de reativo. A medida que a tensão interna se reduz, o sistema passa a ser mais seguro, passando a ter uma maior margem de estabilidade por o SVC ter uma maior atuação.

O critério da tensão é capaz de indicar novos limites de operação a partir da variação do ganho do SVC. Como mostra a Figura 6.24 com o aumento do K_{SVC} , diminui-se o limite crítico da tensão interna crítica.

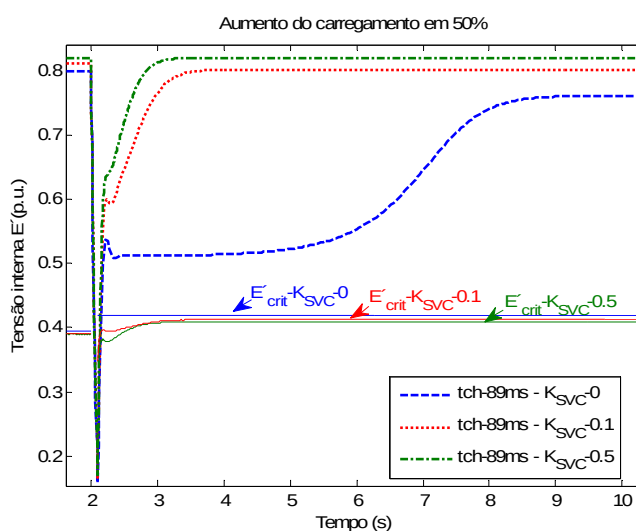


Figura 6.24 – Avaliação da tensão interna determinando o tempo crítico com aumento do carregamento do sistema em 50%.

7 Conclusões

Tratou-se neste trabalho a estabilidade do gerador de indução do tipo SCIG empregado em geração eólica, considerando que a instabilidade de velocidade que a máquina pode sofrer, é devida à deterioração da capacidade de transmissão de potência do sistema, decorrente da degeneração da tensão interna originada da desmagnetização da máquina.

A motivação do principal objetivo deste trabalho, foi dada pela ausência na literatura de um estudo claro, à respeito das causas da instabilidade do gerador assíncrono. Neste sentido, foi desenvolvido um método de análise de estabilidade de geradores eólicos do tipo de indução, com base no monitoramento da tensão interna E' ao longo de um movimento transitório do sistema.

O método de análise desenvolvido contribui para obter uma compreensão detalhada dos fenômenos relacionados à instabilidade dos geradores de indução, conectados em redes de energia elétrica, com e sem compensadores estáticos de reativos. O critério apresentou resultados acurados de detecção da condição de instabilidade do gerador, levando à avaliações de tempo crítico de eliminação do defeito, com precisão da ordem de milésimo de segundo.

E uma das vantagens obtidas no uso do critério da tensão interna, está na sua aplicabilidade em sistemas com compensadores variáveis de reativos, levando em conta a flexibilidade introduzida pelo SVC. Neste caso o método da tensão interna revelou ser capaz de avaliar adequadamente os novos limites de estabilidade determinados por variações da susceptância do compensador. Assim, com as devidas considerações e adequações, o critério da tensão interna se aplica ao sistema com a inserção do SVC, notando-se que então o valor crítico da tensão interna passa a acompanhar a dinâmica da susceptância do SVC, de modo que novos limites de operação são definidos a cada instante em um movimento do sistema e do dispositivo, sendo estes limites determinados imediata e analiticamente, como demonstrado no desenvolvimento teórico e comprovado através das simulações.

Por apresentar um contexto associado à geração eólica, pode-se se questionar que ao longo dos capítulos não foi abordado nenhum estudo sobre a estabilidade do sistema, ligada à aleatoriedade do vento, rajadas de vento, corte de carga, fenômenos que os sistemas com geração eólica estão sujeitos. Porém, o método da tensão E' pode ser considerado para estes tais fenômenos, bastando que seja implementado de forma adequada.

Embora tenha sido tratado um modelo de considerável simplicidade, tratando transitório devido a curto-circuito trifásico, considera-se como vantagens do critério da tensão

E' , a possibilidade de estender sua aplicação a análise de sistema de maior porte, podendo envolver mais de um SCIG avaliando os seus desempenhos dinâmico/transitório entre as máquinas do sistema, assim como analisar o sistema diante de perturbações originadas de outros tipos de contingências, o que deverá ser motivo de estudos futuros.

7.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, com base no contexto do trabalho:

- O estudo da estabilidade dos geradores assíncronos do tipo DFIG, com o método da mínima tensão interna E' .
- O desenvolvimento de um sistema de maior porte, podendo envolver mais de um SCIG e DFIG, conectados a um sistema de potência realista multimáquinas, avaliando a estabilidade entre máquinas, via formulação de matrizes de rede e capacidade de transmissão intermáquinas.
- Análise dos aerogeradores, quando submetidos à condições aleatórias do vento, bem como variações de carregamentos.
- Aplicação do critério da tensão interna em um sistema real, com autorização de uma concessionária de energia elétrica, integrado a sistemas de controle e proteção.

Referências

ACKERMANN, T. **Wind power in power systems**. England: John Wiley & Sons, 2005. 745p.

AKHMATOV, V. (a) Variable-speed wind turbines with doubly-fed induction generators part I: modelling in dynamic simulation tools. **Wind Engineering**, London, v. 26, n. 2, p. 85 - 108, 2002.

AKHMATOV, V. (b) Variable-speed wind turbines with doubly-fed induction generators – part II: power system stability. **Wind Engineering**, London, v. 26, n. 3, p. 171 - 188, 2002.

AKHMATOV, V. (a) **Analysis of dynamic behaviour of electric power systems with large amount of wind power**. 2003. 270 f. Tese (Doutorado) - Technical University of Denmark, Dinamarca, 2003.

AKHMATOV, V. (b) Variable-speed wind turbines with doubly-fed induction generators - part III: model with the back-to-back converters. **Wind Engineering**, London, v. 27, n. 2, p. 79 - 91, 2003.

AKHMATOV, V, et al. (c) Modelling and transient stability of large wind farms. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Oxford, v. 25, p. 123 - 144, 2003.

AKHMATOV V.; SØBRINK K. A static VAR compensator model for improved ride through capability of wind farms. **Wind Engineering**, London, v. 28, n. 6, p. 715 - 728, 2004.

ALMEIDA, R. G. **Contribuições para a avaliação da capacidade de fornecimento de serviços de sistema por parte de aerogeradores de indução duplamente alimentados**. 2006. 254 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2006.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Atlas de energia elétrica do brasil**. [S.l.: s.n.], 2002. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 15 julh. 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Banco de informação de geração- BIG**. [S.l.: s.n.], 2011. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 15 jan. 2011.

ARAUJO JUNIOR, R. L.; ARAUJO, P. B. Modelo linear do sistema elétrico de potência com a inclusão do compensador estático de reativos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA - CBA, 14., 2002, Natal. **Anais...** Natal: [s.n.], 2002. p. 2840 - 2845.

BARROS L. S.; MOTA, W. S. **Uma estratégia de controle para o melhoramento do comportamento dinâmico de máquinas de indução duplamente alimentadas operando como geradores eólicos**. 2006. 136 f. Tese (Doutorado) - Centro de Engenharia Elétrica e Informática Universidade Federal de Campina Grande, 2006.

CONROY, J.; WATSON, R. Torsional damping control of gearless full-converter large wind turbine generators with permanent magnet synchronous machines. **Wind Engineering**, London, v. 31, n. 5, p. 325 - 340, 2007.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO - CRESESB. **Energia eólica princípios e tecnologias**. [S.l.: s.n.], 2008. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br>>. Acesso em: 3 abr. 10.

DAHER, S.; PONTES, R.; ANTUNES, F. A. Stand-alone three-phase induction generator based wind energy storage system. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE- IECON, 25., 1999, San Jose. **Proceedings...** San Jose: [s.n.], 1999. v. 3, p. 1397 - 1402.

GRILO, A. P.; MOTA, A. A.; MOTA, L. T. M.; FREITAS, W. An analytical method for analysis of large-disturbance stability of induction generators. **IEEE Transaction Power Systems**, Piscataway, v. 22, n. 4, p. 1861 - 1869, 2007.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL- GWEC. **Global installed wind power capacity 2008/2009**. [S.l.: s.n.], 2010.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL- GWEC. **Global wind report: annual market update 2010**. [S.l.: s.n.], 2011. 72 p.

HANSEN, L. H. et al. **Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines**. Roskilde: Riso National Laboratory, 2001. 108 p.

HANSEN, A. D.; MICHALKE (a) G. Modelling and control of variable-speed multi-pole permanent magnet synchronous generator wind turbine. **Wind Energy**, West Sussex, v. 11, n. 5, p. 537 - 554, 2008.

HANSEN, M. O. L. (b) **Aerodynamics of wind turbines**. 2. ed. Enfield: Fish Books, 2008. 192 p.

HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. **Understanding FACTS: Concepts and technology of flexible AC transmission systems**. New York: IEEE Press - John Wiley & Sons, 2000 452 p.

JAUCH, C. Transient and dynamic control of a variable speed wind turbine with synchronous generator. **Wind Energy**, West Sussex, v. 10, n. 3, p. 247 - 269, 2007.

JENKINS, N. et al. **Embedded generation**. London: The Institution of Engineering and Technology, 2000. 293 p.

JENKINS, N.; HOLDSWORTH, L.; WU, X. **Dynamic and steady-state modelling of the double-Fed induction machine (DFIM) for wind turbine application**. [S.l.]: Internal MCEE UMIST, 2002.

KUNDUR, P. **Power system stability and control**. New York: Mac.Graw - Hill, 1994. 1196 p.

LI, H.; CHEN, Z. Overview of different wind generator systems and their comparisons. **IET Renewable Power Generation**, Stevenage, v. 2, n. 2, p. 123 - 138, 2008.

LOPES, J. P.; ALMEIDA, R. G. **Descrição de modelos matemáticos de máquinas de indução convencional e duplamente alimentada e estratégias de controlo para estudo dinâmico e de estabilidade transitória**. [S.l.]: INESC PORTO, 2004. 21 p. Trabalho de Consultoria para o ONS Brasil.

MOTA, W. S. **Simulação de transitórios eletromecânicos em sistema de potência**. Campina Grande: EPGRAF, 2006. 368 p.

MOTA W. S.; SODRÉ E. A. Modelo para simulação dinâmica de geradores eólicos de indução ligados à rede de transmissão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 15., 2004, Gramado. **Anais...** Gramado: [s.n.], 2004. 1 CD/ROM.

MÜLLER, S.; DEICK, M.; DE DONCKER, RICK W. Doubly fed induction generator systems for wind turbines. **IEEE industry Applications Magazine**, Piscataway, p. 26-33, May-June, 2002.

NASSIF, A. B.; CASTRO, M. S.; COSTA, V. F.; SILVA, L. C. P.; COSTA, V. F. Comparação do PSS, SVC e STATCOM no amortecimento de oscilações do modo local em sistemas de potência. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA- CBA, 15, 2004, Gramado. **Anais...** Gramado: [s.n.], 2004. 1 CD/ROM.

NUNES, M. V. A. **Avaliação do comportamento de aerogeradores de velocidade fixa e variável integrados em redes elétricas fracas**. 2003. 224 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina- UFSC, Florianópolis, 2003.

PENA, R.; CLARE J. C.; ASHER, G. M. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy conversion. **IEE Proceedings Electric Power Applications**, Stevenage, v. 143, n. 3, p. 231 - 241, May 1996

PINTO, V. P . **Modelagem e simulação de uma planta eólica controlada por um regulador linear quadrático conectada ao sistema de distribuição de energia elétrica**. 2007. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

POLLER, Markus A. Doubly-fed induction machine models for stability assessment of wind farms. **Power Tech Conference Proceedings**, Bologna, v.3, Junho 23 - 26, 2003.

SALLES, M. B. C. **Modelagem e análises de geradores eólicos de velocidade variável conectados em sistemas de energia elétrica**. 2009. 139 f. Tese (Dourado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SAMUELSSON, O.; LINDAHL S. On speed stability. **IEEE Transaction on Power Systems**, Piscataway, v. 20, n. 2, p. 1179 - 1180, 2005.

SLOOTWEG, J. G.; HAAN, S. W. H.; POLINDER, H.; KLING, W. L. General model for representation variable speed turbines in power system dynamics simulations. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 18, n. 1, p. 144 - 151, 2003.

SLOOTWEG, J. G. **Wind power: modelling and impact on power system dynamics**. 2003. 219 f. Tese (Doutorado) - Technical University of Delft, Holanda, 2003.

SONG, Y. H.; JOHNS, A. T. **Flexible AC transmission system - FACTS**. London: The Institute of Electrical Engineers, 1999. 592 p.

SPOONER, E.; WILLIAMSON, A .C.; CATTO, G. Modular design of permanent-magnet generators for wind turbines. **IEEE Proc Electric Power Applications**, Stevenage, v. 143, n. 5, p. 388 - 395, 1996.

WANG, H. F. Interaction analysis and co-ordination of SVC voltage and damping control. In: INTERACTION analysis and co-ordination of SVC voltage and damping control. London: [s.n.], 2000. p. 361 - 365, 2000

ZAMPERIN, J. L. B.; COLVARA, L. D. Estudo da estabilidade do gerador eólico assíncrono através da tensão interna. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA - CBA, 18., 2010, Bonito. **Anais...** Bonito: [s.n], 2010. p. 432 - 438.

Apêndice I

Dados do sistema teste

Considere o sistema-teste da Figura A.I.1, cujos dados se encontram nas tabelas abaixo (MOTA, 2006).

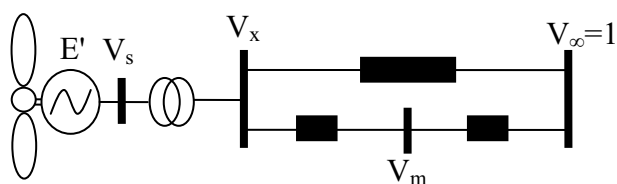


Figura A.I.1 – Sistema gerador eólico ligado a uma barra infinita através de uma rede de transmissão (MOTA, 2006).

Tabela A.I.1 – Dados das linhas de transmissão em p.u. de 100MVA e tensões do sistema.

Da barra	Para a barra	R_{lt}	X_{lt}
V_{∞}	V_x	2,01	5,22
V_{∞}	V_m	1,01	2,61
V_m	V_x	1,01	2,61
V_s	V_x	0	6,66

Tabela A.I.2 – Dados do gerador assíncrono.

$P_n (KW)$	$V_n (KV)$	$R_s (p.u.)$	$X_s (p.u.)$	$R_r (p.u.)$	$X_r (p.u.)$	$X_m (p.u.)$	$H (s)$
660	0.69	0,001941	0,131695	0,00804	0,0070145	3,2107	4

Tabela A.I.3 – Dados do sistema de excitação para controle de tensão da máquina tipo DFIG.

K_A	T_A	T_{M2}	T_{M3}	K_E	T_E
1.00	3.00	1,00	0,05	0,25	0,00125

Tabela A.I.4 – Dados do sistema de excitação para controle de velocidade da máquina tipo DFIG.

μ_s	T_{se}	T_{M2}	T_{M3}	K_{q2}	T_q
0.70	1.75	1,00	0,05	0,30	0,00150

Anexo I Artigos Publicados

ZAMPERIN, J. L. B.; COLVARA, L. D. Estudo da estabilidade do gerador eólico assíncrono através da tensão interna. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA - CBA, 18., 2010, Bonito. **Anais...** Bonito: [s.n], 2010. p. 432 - 438.