



Armando Gonçalves Leite

**Simulação Estática e Dinâmica do Controle de
Tensão por Gerador e Compensador Síncrono**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Ricardo Bernardo Prada
Co-orientador: José Eduardo Onoda Pessanha

Rio de Janeiro
Março de 2008



Armando Gonçalves Leite

Simulação Estática e Dinâmica do Controle de Tensão por Gerador e Compensador Síncrono

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Dr. Ricardo Bernardo Prada
Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

Dr. José Eduardo Onoda Pessanha
Co-orientador
UFMA

Dr. Ricardo Diniz Rangel
Cepel

Dr. Antonio Luiz Bergamo do Bomfim
Eletrobrás

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 28 de março de 2008

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Armando Gonçalves Leite

Técnico em Eletrotécnica formado pelo CEFET-RJ em 1999. Graduou-se em Engenharia Elétrica na Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ em 2004. Operador de Sistema Elétrico do Centro de Operação do Sistema – CTOS – de Furnas Centrais Elétricas S.A. de 2000 a 2006, exercendo a função de supervisor de turno. Atualmente é engenheiro da Centrais Elétricas Brasileiras S.A. – ELETROBRÁS.

Ficha Catalográfica

Leite, Armando Gonçalves

Simulação estática e dinâmica do controle de tensão por gerador e compensador síncrono / Armando Gonçalves Leite; orientador: Ricardo Bernardo Prada. – 2008.

134 f. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) –Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Estabilidade de tensão. 3. Adequação do controle de tensão. 4. Simulação estática e dinâmica I. Prada, Ricardo Bernardo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

À minha querida família...
...que é a base de tudo.

Agradecimentos

A Deus.

À minha família, Armando (meu pai), Aldecir (minha mãe) e Aline (minha irmã) pelos seus conselhos, apoio e por sempre acreditarem que isto seria possível.

Ao meu orientador Ricardo Bernardo Prada pelo permanente apoio nas diferentes etapas do desenvolvimento nesta dissertação, por sua atenção e paciência na discussão dos diferentes aspectos relacionados ao tema de pesquisa e ao meu co-orientador José Eduardo Onoda Pessanha pelas inestimáveis colaborações para o desenvolvimento da tese.

Ao CEPEL, pela cessão dos programas para fins de pesquisa.

Aos meus grandes amigos de Furnas que me apoiaram para iniciar essa caminhada e continuaram apoiando durante a mesma.

Aos amigos do curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio e da UFMA, em especial Carlos Enrique Portugal Poma, Alex Ricardo Arquinego Paz, Renato Teixeira Lima, Marcel René Vasconcelos de Castro e Bruno do Carmo Pontes.

Aos amigos da ELETROBRÁS que me apoiaram no final desta caminhada.

Resumo

Leite, Armando Gonçalves, Prada, Ricardo Bernardo (Orientador). **Simulação Estática e Dinâmica do Controle de Tensão por Gerador e Compensador Síncrono**. Rio de Janeiro, 2008. 134p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O tema abordado neste trabalho é a observação e análise, em regime permanente e dinâmico, da ocorrência de um fenômeno que já foi observado em condições reais de operação do sistema elétrico brasileiro, que é a relação oposta entre a tensão de excitação de geradores e compensadores síncronos e a tensão controlada. Nessas situações, a capacidade nominal de um gerador / compensador síncrono, por exemplo, não seria útil para manter a tensão controlada. Em virtude da relação oposta, um aumento na excitação da máquina abaixaria a tensão controlada. O controle automático continuaria agindo, abaixando ainda mais a tensão. Este mecanismo pode levar o sistema ao colapso. A abordagem do problema baseou-se na verificação do comportamento do gerador / compensador como dispositivo de controle de tensão, em regime permanente e dinâmico, ante as diversas situações normais de um sistema elétrico, tais como variações do valor da tensão de referência (tensão controlada) e de carga. A análise em regime permanente utilizou um algoritmo de fluxo de carga, enquanto a análise em regime dinâmico utilizou a simulação no domínio do tempo. A real existência do fenômeno foi comprovada através de várias destas análises, mostrando inclusive a mudança da região de operação em algumas delas. Em outros casos, os resultados da análise em regime permanente não coincidiram com os da análise em regime dinâmico.

Palavras - chave

Estabilidade de tensão, controle de tensão, segurança de tensão, simulação no domínio do tempo e simulação em regime permanente.

Abstract

Leite, Armando Gonçalves, Prada, Ricardo Bernardo (Advisor). **Static and Dynamic Simulation of Voltage Control by Generator and Synchronous Compensator**. Rio de Janeiro, 2008. 134p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The aim of this work is to investigate, in steady state and dynamic performance, the phenomenon of the opposite relationship, already observed at real operation conditions of the Brazilian Electric System, between generators and synchronous compensators excitation voltage and the controlled one. In these situations, the generator / synchronous compensator nominal capacity, for example, would not be useful to keep the voltage controlled. Due the opposite relationship, an increase in the excitation voltage would reduce the controlled voltage. The automatic control would keep acting and reducing more the voltage. This mechanism can lead the system to the collapse. The study of this problem was based in the generator / compensator behavior as a control voltage device, in steady-state and dynamic performance, front of several operation situations of electric power system, like reference voltage (controlled voltage) variation and load changing. The steady state analysis used a load flow algorithm, while the time domain simulation was utilized for the dynamic performance analysis. The real existence of the phenomenon was verified through these analyses, emphasizing the operation region changing in some of them. In other cases, the analyses results in the steady-state were different of the dynamic performance results.

Keywords

Voltage stability, voltage control, voltage security, time domain simulation, steady state simulation.

Sumário

1	Introdução	18
1.1	Considerações Gerais	18
1.2	Objetivo	19
1.3	Estrutura da Dissertação	19
2	Estabilidade de Tensão	21
2.1	Introdução	21
2.2	Curvas P, Q e ϕ Constantes	23
2.3	O Limite de Estabilidade de Tensão (LET)	25
2.4	A Existência da Potência Transmitida "Maximum Maximorum"	30
2.5	O Porquê da Potência Transmitida Máxima para a Carga	34
2.6	O Porquê da Introdução de um Capacitor Diminui a Tensão	38
2.7	Índices de Avaliação das Condições de Segurança de Tensão	41
2.7.1	Magnitude do Determinante da Matriz [D']	43
2.7.2	Sinal do Determinante da Matriz [D']	46
2.7.3	Margem de Potência	48
2.8	Relação entre Grandezas Controladas e Controladoras	50
2.9	Índices de Adequação das Ações de Controle de Tensão	51
2.9.1	Representação dos Controles e Cálculo dos Índices	51
3	Análise do Efeito do Controle de Tensão em Geradores	54
3.1	Modelagem do Gerador / Compensador Síncrono	54
3.2	Modelagem da Carga	55
3.2.1	Carga "Potência Constante"	56
3.2.2	Carga "Impedância Constante"	61
3.2.3	Carga "ZIP" (20% Z, 20% I e 60% P)	67
3.3	Conclusões	74
4	Análise em Regime Permanente e Dinâmico de um Gerador	76
4.1	Introdução	76
4.2	Análise em Regime Permanente	76
4.2.1	Região Normal de Operação	77
4.2.2	Região Anormal de Operação	79

4.3	Análise no Domínio do Tempo	81
4.3.1	Região Normal de Operação	81
4.3.2	Região Anormal de Operação	84
4.3.3	Mudança da Região de Operação	88
4.3.4	Aumento da Carga do Sistema	95
4.4	Conclusões	99
5	Análise em Regime Permanente e Dinâmico de um Compensador Síncrono	101
5.1	Introdução	101
5.2	Análise em Regime Permanente	102
5.2.1	Região Normal de Operação	105
5.2.2	Região Anormal de Operação	106
5.3	Análise no Domínio do Tempo	108
5.3.1	Região Normal de Operação	108
5.3.2	Região Anormal de Operação	109
5.3.3	Aumento da Carga do Sistema	111
5.3.4	Variação de Tensão em Outra Barra do Sistema	115
5.4	Conclusões	117
6	Conclusões, recomendações e trabalhos futuros	118
7	Referências Bibliográficas	121
	Apêndice A – Relação entre a Reatância Síncrona e a Indutância Síncrona	123
	Apêndice B – Dados das simulações	126
B.1	Simulações em regime permanente	126
B.1.1	Sistema-teste de 3 barras	126
B.1.1.1	Região normal	127
B.1.1.2	Região anormal	127
B.1.2	Sistema-teste de 10 barras (Kundur)	127
B.1.2.1	Região normal	127
B.1.2.2	Região anormal	128
B.1.3	Sistema New England	128
B.1.3.1	Região normal	129
B.1.3.2	Região anormal	130

B.2	Simulações no domínio do tempo	131
B.2.1	Sistema-teste de 3 barras	132
B.2.2	Sistema-teste de 10 barras (Kundur)	132
B.2.3	Sistema New England	133

Lista de figuras

Figura 2.1 – Diagrama unifilar do sistema série de duas barras	21
Figura 2.2 - Três possibilidades de solução para a tensão na carga com mesmo fator de potência	24
Figura 2.3 - Curva para fator de potência constante na barra de carga no plano SV	25
Figura 2.4 - Circuito com as impedâncias da transmissão e da carga	26
Figura 2.5 - Limite de estabilidade de tensão no plano SV	30
Figura 2.6 - Lugar geométrico da tensão na carga para todos os possíveis diferentes níveis de potência ativa constante e para alguns níveis de potência reativa constante	31
Figura 2.7 - Aumento e diminuição da tensão respectivamente na região superior e inferior da curva com a introdução de um capacitor	32
Figura 2.8 - Potência ativa consumida na carga com fator de potência constante	37
Figura 2.9 - Circuito sem capacitor	38
Figura 2.10 - Circuito com capacitor	38
Figura 2.11 – Localização do vetor gradiente de P_i e Q_i no plano $V\theta$	48
Figura 2.12 – Sinal da margem na curva SV	49
Figura 2.13 – Diagrama unifilar do sistema-teste de 3 barras	52
Figura 3.1 – Diagrama unifilar do sistema-teste de 3 barras	54
Figura 3.2 – Curva PV com carga tipo potência constante	57
Figura 3.3 – Variação da tensão interna X tensão terminal, carga “potência constante”	58
Figura 3.4 – Variação da tensão interna e tensão terminal, carga “potência constante”, no domínio do tempo	59
Figura 3.5 – Variação da tensão interna X tensão terminal e carga “potência constante”	60
Figura 3.6 – Variação da tensão interna e tensão terminal, carga “potência constante”, no domínio do tempo	61
Figura 3.7 – Curva PV com carga tipo “impedância constante” e ponto de operação na parte superior da curva	62
Figura 3.8 – Curva PV com carga tipo “impedância constante” e ponto de operação na parte inferior da curva	63
Figura 3.9 – Variação da tensão interna X tensão terminal, carga “impedância	

constante”	64
Figura 3.10 – Variação da tensão interna e tensão terminal, carga “impedância constante” no domínio do tempo	65
Figura 3.11 – Variação da tensão interna X tensão terminal, carga “impedância constante”	66
Figura 3.12 – Variação da tensão interna e tensão terminal, carga “impedância constante”, no domínio do tempo	67
Figura 3.13 - Curva PV com carga tipo “ZIP”	68
Figura 3.14 – Detalhe do ponto de operação na região anormal da curva PV com carga tipo “ZIP”	68
Figura 3.15 – Variação da tensão interna X tensão terminal, carga ZIP	70
Figura 3.16 – Variação da tensão interna e tensão terminal, carga “ZIP”, no domínio do tempo	71
Figura 3.17 – Variação da tensão interna X tensão terminal, carga “ZIP”	72
Figura 3.18 – Variação da tensão interna e tensão terminal, carga “ZIP”, no domínio do tempo	73
Figura 3.19 – Variação da tensão interna para o comando de elevar a tensão terminal com carga “ZIP”	73
Figura 3.20 – Variação da tensão terminal para o comando de elevação com carga “ZIP”	74
Figura 4.1 – Diagrama unifilar do sistema-teste de 10 barras	76
Figura 4.2 – Curva VQ da barra 3	78
Figura 4.3 – Variação da tensão interna X tensão terminal na região normal de operação	79
Figura 4.4 – Variação da tensão interna X tensão terminal na região anormal de operação	80
Figura 4.5 – Comparação entre a variação da tensão interna e da tensão terminal da região normal de operação no domínio do tempo	82
Figura 4.6 - Variação da tensão interna na região normal de operação no domínio do tempo	83
Figura 4.7 – Variação da tensão terminal na região anormal de operação no domínio do tempo	83
Figura 4.8 – Comparação entre a variação da tensão interna e da tensão terminal na região anormal de operação no domínio do tempo	84
Figura 4.9 – Variação da tensão interna na região anormal de operação no domínio do tempo	85

Figura 4.10 – Variação da tensão terminal na região anormal de operação no domínio do tempo	86
Figura 4.11 – Comparação entre a variação da tensão interna e da tensão terminal na região anormal de operação com uma seqüência de comandos	87
Figura 4.12 – Variação da tensão interna na região anormal de operação com uma seqüência de comandos	87
Figura 4.13 – Variação da tensão terminal na região anormal de operação com uma seqüência de comandos	88
Figura 4.14 – Comparação entre a variação da tensão interna e da tensão terminal mudando de sentido	89
Figura 4.15 – Variação da tensão interna mudando de sentido	90
Figura 4.16 – Variação da tensão terminal sempre no mesmo sentido	90
Figura 4.17 – Comparação entre a variação da tensão interna e terminal mudando de sentido	91
Figura 4.18 – Variação da tensão interna mudando de sentido	92
Figura 4.19 – Variação da tensão terminal sempre no mesmo sentido	92
Figura 4.20 – Comparação entre a variação da tensão interna e tensão terminal até a divergência do caso	94
Figura 4.21 – Variação da tensão interna até a divergência do caso	94
Figura 4.22 – Variação da tensão terminal até a divergência do caso	95
Figura 4.23 – Acréscimo da carga ativa no sistema	96
Figura 4.24 – Acréscimo da carga reativa no sistema	96
Figura 4.25 – Comparação entre a variação da tensão interna e da tensão terminal em decorrência do acréscimo de carga no sistema	97
Figura 4.26 – Variação da tensão interna em decorrência do acréscimo de carga no sistema	98
Figura 4.27 – Variação da tensão terminal em decorrência do acréscimo de carga no sistema	98
Figura 5.1 – Diagrama unifilar do sistema New England com compensador síncrono	101
Figura 5.2 – Curva VQ da barra 16	102
Figura 5.3 – Variação da tensão interna X tensão terminal na região normal de operação	106
Figura 5.4 – Variação da tensão interna X tensão terminal na região anormal de operação	107

Figura 5.5 – Comparação entre a variação da tensão interna e da tensão terminal na região normal de operação no domínio do tempo	109
Figura 5.6 – Comparação entre a variação da tensão interna e da tensão terminal na região anormal de operação no domínio do tempo	110
Figura 5.7 – Potência reativa gerada pelo compensador síncrono	111
Figura 5.8 – Acréscimo da carga ativa no sistema.....	112
Figura 5.9 – Acréscimo da carga reativa no sistema.....	112
Figura 5.10 – Comparação entre a variação da tensão interna e da tensão terminal em decorrência do acréscimo de carga no sistema.....	113
Figura 5.11 – Variação da tensão interna em decorrência do acréscimo de carga no sistema	114
Figura 5.12 – Variação da tensão terminal em decorrência do acréscimo de carga no sistema	114
Figura 5.13 – Variação da tensão na barra 39	115
Figura 5.14 – Variação da tensão na barra 16, terminal do compensador síncrono.....	116
Figura 5.15 – Variação da tensão interna do compensador síncrono	116

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Três possibilidades de solução para a tensão na carga com mesmo fator de potência	24
Tabela 2.2 - Variações de tensão, corrente e potência na barra de carga.....	36
Tabela 2.3 - Pontos de operação para avaliar o aumento ou decréscimo da tensão com a introdução de um capacitor	40
Tabela 3.1 – Ponto de operação inicial	57
Tabela 3.2 – Variação tensão terminal controlada e respectiva variação da tensão interna controladora, carga “potência constante”.....	58
Tabela 3.3 – Ponto de operação inicial	59
Tabela 3.4 – Variação da tensão interna e tensão terminal, carga “potência constante”	60
Tabela 3.5 – Variação da tensão interna e tensão terminal, carga “impedância constante”	64
Tabela 3.6 – Variação da tensão interna e tensão terminal, carga “impedância constante”	65
Tabela 3.7 – Variação da tensão interna e tensão terminal, carga “ZIP”	69
Tabela 3.8 – Variação da tensão interna e tensão terminal, carga “ZIP”	71
Tabela 4.1 – Ponto de operação na região normal	77
Tabela 4.2 – Variação da tensão interna e da tensão terminal na região normal de operação.....	78
Tabela 4.3 – Ponto de operação na região anormal	79
Tabela 4.4 – Variação da tensão interna e da tensão terminal na região normal de operação	80
Tabela 4.5 – Variação da tensão interna e da tensão terminal na região normal de operação – análise no domínio do tempo.....	82
Tabela 4.6 – Variação da tensão interna e da tensão terminal na região anormal de operação – análise no domínio do tempo.....	84
Tabela 4.7 – Variação da tensão interna e da tensão terminal na região anormal de operação – seqüência de comandos	86
Tabela 4.8 – Variação da tensão interna e da tensão terminal mudando da região normal para anormal.....	89
Tabela 4.9 – Variação da tensão interna e da tensão terminal mudando da região anormal para normal.....	91
Tabela 4.10 – Variação da tensão interna e da tensão terminal mudando da	

região normal para anormal até a divergência do caso.....	93
Tabela 4.11 – Variação da tensão interna e terminal em decorrência da elevação de carga do sistema	97
Tabela 5.1 – Resultado de execução da margem de potência reativa na região normal.....	103
Tabela 5.2 – Resultado de execução da margem de potência reativa na região anormal.....	104
Tabela 5.3 – Ponto de operação na região normal	105
Tabela 5.4 – Variação da tensão interna e da tensão terminal na região normal de operação	105
Tabela 5.5 – Ponto de operação na região anormal	106
Tabela 5.6 – Variação da tensão interna e da tensão terminal na região anormal de operação	107
Tabela 5.7 – Variação da tensão interna e da tensão terminal na região normal de operação – domínio do tempo	109
Tabela 5.8 – Variação da tensão interna e da tensão terminal na região anormal de operação – domínio do tempo	110
Tabela 5.9 – Variação da tensão interna e da tensão terminal em decorrência da elevação de carga do sistema	113

Abreviaturas e Siglas

H	Constante de inércia
D	Constante de amortecimento
ω	Velocidade angular da máquina
ω_s	Velocidade angular síncrona da máquina
δ	Ângulo do eixo q da máquina em relação à reatância síncrona
T_{q0}''	Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura em circuito aberto
T_{d0}'	Constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto
T_{d0}''	Constante de tempo subtransitória de eixo direto em circuito aberto
L_q	Indutância síncrona de eixo em quadratura
L_q''	Indutância subtransitória de eixo quadratura
L_d	Indutância síncrona de eixo direto
L_d'	Indutância transitória de eixo direto
L_d''	Indutância subtransitória de eixo direto
L_L	Indutância de dispersão da armadura
E_{Fd} / E_g	Tensão de campo da máquina
V_{TR}	Tensão Terminal
V_{Ref}	Sinal de referência
X_L	Reatância da linha
LET	Limite de estabilidade de tensão
Z_t	Módulo da impedância da linha de transmissão
α_t	Ângulo da impedância da linha de transmissão
Z_c	Módulo da impedância de carga
P_G	Potência Ativa Gerada MW
Q_G	Potência Reativa Gerada Mvar
θ_i	Ângulo da Tensão na Barra i
V_i	Módulo da Tensão na Barra i
ϕ	Ângulo de impedância de carga