



Bernardo Henrique Todt Seelig

**Índices de Adequação das Ações de Controle
de Tensão para Reforço das Condições
de Segurança de Tensão**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Ricardo Prada

Rio de Janeiro, setembro de 2004

Bernardo Henrique Todt Seelig

**Índices de Adequação das Ações de Controle
de Tensão para Reforço das Condições
de Segurança de Tensão**

Tese de Doutorado apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor 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 Prada

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Dra. Angela Barbosa Greenhalgh

Consultora

Dr. Djalma Mosqueira Falcão

COPPE/UFRJ

Dr. Júlio César Rezende Ferraz

CEPEL

Dr. Luiz Alberto da Silva Pilotto

Andrade & Canellas Ltda.

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 de setembro de 2004

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

Bernardo Henrique Todt Seelig

Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Santa Úrsula em 1992. Mestre em Engenharia Elétrica pela PUC-Rio em 1999.

Ficha Catalográfica

Seelig, Bernardo Henrique Todt

Índices de adequação das ações de controle de tensão para reforço das condições de segurança de tensão / Bernardo Henrique Todt Seelig ; orientador: Ricardo Prada. – Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2004.

144 f. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Controle de tensão. 3. Segurança de tensão. 4. Estabilidade de tensão. 5. Colapso de tensão. I. Prada, Ricardo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Para meu tio, Gualter Todt
In Memoriam

Agradecimentos

Ao professor Ricardo Prada pelo apoio e orientação no desenvolvimento deste trabalho.

Ao CNPQ pelo suporte financeiro concedido, sem o qual este trabalho não se realizaria.

Ao CEPEL¹, pela cessão das ferramentas computacionais ali desenvolvidas e usadas nesta tese.

A todos os companheiros do curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, pelo estímulo e pela saudável convivência.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio pela atenção e presteza.

¹ Este trabalho é parte integrante dos Acordos Específicos 16/98 e 02/01 entre o CEPEL e a PUC-Rio.

Resumo

Seelig, Bernardo Henrique Todt. **Índices de Adequação das Ações de Controle de Tensão para Reforço das Condições de Segurança de Tensão**. Rio de Janeiro, 2004. 144p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A falta de recursos e a questão ecológica têm limitado a expansão do sistema de transmissão. Esta realidade, em conjunto com o crescimento da carga, faz com que os sistemas elétricos trabalhem bastante carregados. Esta nova condição pode levar a situações de colapso de tensão.

Métodos para avaliação do carregamento da rede de transmissão tornaram-se necessários e imprescindíveis para que se possa entender o funcionamento do sistema nestas condições e possibilitar a sua operação de modo correto.

Ferramentas analíticas têm sido usadas para reforço das condições de segurança de tensão do sistema em tempo real, se for avaliado que o sistema não é suficientemente seguro. Ações operativas de controle são determinadas, para mover o estado do sistema para um ponto de operação seguro. Entretanto, ferramentas de avaliação e reforço não são a única necessidade. As mesmas ações de controle, que podem afastar o sistema de uma situação de instabilidade de tensão, também podem ter efeito oposto ao esperado e contribuir para o problema, podendo até mesmo levar o sistema ao colapso. Portanto, é necessário o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para avaliar a adequação de ações de controle de tensão.

Neste trabalho é proposta uma ferramenta computacional, desenvolvida com base no sistema linearizado das equações de fluxo de carga, incluindo equações de controle de tensão e limites, para a avaliação do efeito das ações de controle de tensão. São obtidos índices que permitem avaliar se a ação de controle é adequada ou não. Além disso, esses índices podem avaliar a interdependência entre os controles, porque além de indicarem o efeito do controle sobre a tensão da barra controlada, podem indicar também o efeito do controle sobre as outras barras de tensão controlada do sistema. Estes índices podem ser obtidos de forma extremamente rápida, e são adequados para uso em tempo-real.

Palavras - chave

Controle de tensão, segurança de tensão, estabilidade de tensão, colapso de tensão.

Abstract

Seelig, Bernardo Henrique Todt. **Adequacy Indexes of Voltage Control Action for Voltage Security Condition Reinforcement**. Rio de Janeiro, 2004. 144p. Doctorate Thesis – Electrical Engineering Department, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The lack of investments and the ecological matter have limited the expansion of the transmission system. This reality, together with the load growth, makes the electric systems to work heavy loaded. This new condition can lead to situations of voltage collapse.

Methods for evaluation the transmission network loading became necessary and indispensable for understanding system performance under these conditions and for making possible secure operation.

Analytic tools have been used to evaluate the voltage security of the system in real time. If it is evaluated that the system is not sufficiently secure in relation to voltage, control actions can be determined, in order to move the state of the system for a secure operation point. However, these tools are not the only need. The same control actions that can move away the system from a situation of voltage instability, can also have opposite effect and contribute for worsening the problem, perhaps leading to system collapse. Therefore, it is necessary the development of computational tools to evaluate the adequacy of these control actions.

In this work it is proposed a computational tool, based on the linearized set of power flow equations, including equations for voltage control and limits, for the evaluation of the effect voltage control actions. Indexes that allow the evaluation whether the control action is adequate or not are obtained. The indexes can also evaluate the interdependence among the controls, because besides indicating the effect of the control action on the voltage of the controlled bus, they can also indicate the effect on the other voltage controlled buses. The indexes can be calculated in an extremely fast way, and are appropriate for use in real-time operation.

Keywords

Voltage control, voltage security, voltage stability, voltage collapse.

Sumário

1	Introdução.....	18
1.1	Considerações Gerais	20
1.2	Estrutura da Tese	20
2	Avaliação do Carregamento da Rede de Transmissão	21
2.1	Introdução.....	21
2.2	Ferramenta Analítica	21
2.2.1	Magnitude do Determinante da Matriz $[D']$	22
2.2.2	Sinal do Determinante da Matriz $[D']$	23
2.2.3	Interpretação dos Índices	25
2.3	Avaliação das Condições de Segurança de Tensão	28
2.4	Casos Especiais	34
2.4.1	Análise do Elemento Diagonal da Matriz Admitância de Barra ...	35
2.4.2	Análise do Determinante da Matriz $[D']$	36
2.5	Conclusões	38
3	Características em Regime Permanente dos Dispositivos de Controle de Tensão.....	39
3.1	Descrição e Importância do Problema.....	39
3.1.1	Exemplo Numérico	40
3.2	Variáveis a Serem Consideradas no Controle da Tensão	42
3.3	Instabilidade do Controle de Tensão: Sistemas Demonstrativos.....	43
3.3.1	Gerador	43
3.3.1.1	Controle Remoto de Tensão na Barra de Carga	44
3.3.1.2	Controle Local de Tensão na Barra Terminal do Gerador	46
3.3.2	LTC	50
3.3.2.1	Controle Local de Tensão na Barra do LTC	50
3.3.2.2	Controle Remoto de Tensão.....	52
3.4	Instabilidade de Tensão: Sistemas Reais	54

3.4.1	Introdução	54
3.4.2	Controle de Tensão por Compensador Estático	54
3.4.2.1	Descrição da Barra em Análise	54
3.4.2.2	Testes	55
3.4.2.3	Conclusões	66
3.4.3	Controle de Tensão por Compensador Síncrono	66
3.4.3.1	Descrição da Barra em Análise	66
3.4.3.2	Testes	69
3.4.3.3	Conclusões	73
3.4.4	Controle de Tensão por Geradores e LTCs	74
3.4.5	Controle de Tensão por Corte de Carga	74
3.5	Conclusões	75
4	Índices de Adequação das Ações de Controle de Tensão	76
4.1	Introdução	76
4.2	Representação de Controles e Cálculo dos Índices	76
4.2.1	Gerador	77
4.2.1.1	Índice Tensão Interna x Tensão Terminal para Controle Local de Tensão	78
4.2.1.2	Índice Tensão Interna x Tensão Remota para Controle de Tensão Remoto	80
4.2.2	Transformador com Comutação de Taps em Carga (LTC)	82
4.2.2.1	Índice Tap do LTC x Tensão da Barra Controlada Localmente	83
4.2.2.2	Índice Tap do LTC x Tensão da Barra Controlada Remotamente	86
4.2.3	Capacitor e Reator	87
4.2.3.1	Índice Susceptância x Tensão Terminal	87
4.2.3.2	Índice Susceptância x Tensão Remota	90
4.2.4	SVC	92
4.2.4.1	Reatância e Susceptância do SVC	92
4.2.4.2	Modelagem do SVC	94
4.2.4.3	Equações de Controle para o Cálculo dos Índices	98

4.2.4.4	Estrutura da Matriz Jacobiana e Cálculo dos Índices ...	99
4.2.4.5	Testes	105
4.3	Cálculo dos Índices em Sistemas com Vários Controles	114
4.3.1	Sistema com Dois LTCs	114
4.3.2	Sistema com Dois LTCs e Um Capacitor	119
4.4	Interação entre os Controles.....	123
4.4.1	Análise dos Índices Obtidos em (4.115).....	124
4.4.2	Análise dos Índices Obtidos em (4.117).....	125
4.5	Forma Geral para o Cálculo dos Índices de Adequação das Ações de Controle de Tensão	127
4.6	Conclusões	132
5	Avaliação da Eficiência Computacional	133
5.1	Introdução.....	133
5.2	Análise Separada de Cada Ação de Controle	133
5.2.1	Cálculo da Matriz $[D']$ usando o Lema da Matriz Inversa Generalizada.....	136
5.3	Análise Simultânea das Ações de Controle.....	138
5.4	Conclusões	139
6	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	140
7	Referências Bibliográficas	142

Lista de Figuras

Figura 2.1	Localização dos Vetores Gradientes de P_i e Q_i no Plano $V \times \theta$	24
Figura 2.2	Sinal da Margem na Curva $V \times S$	27
Figura 2.3	Tronco de Transmissão ITAIPU -T. PRETO	34
Figura 2.4	Detalhe da Estrutura Física da Barra 62 - IV-FOZ-1-765	36
Figura 3.1a	Potência Reativa Gerada x Índice det $[D'] * V$	41
Figura 3.1b	Potência Reativa Gerada x Tensão Controlada	41
Figura 3.1c	Admitância do SVC x Tensão Controlada	42
Figura 3.2	Sistema-Teste de Duas Barras	44
Figura 3.3	Tensões na Linha de Transmissão	46
Figura 3.4	Sistema de Duas Barras com a Linha de Transmissão Dividida em Dois Trechos	47
Figura 3.5	Sistema de 3 Barras.....	48
Figura 3.6	Tensão ao Longo da Rede.....	49
Figura 3.7	Tensões ao Longo da Rede	50
Figura 3.8	Lugar Geométrico das Tensões para Carga Ativa Constante, Carga Reativa Constante e para Fator de Potência Constante para Taps de 0,95 e 1,0	52
Figura 3.9	Circuito de 3 Barras com LTC e Linha de Transmissão	53
Figura 3.10	Situação da Barra 450 no Sistema N/NE	55
Figura 3.11	Potência Reativa Gerada x Tensão Controlada	57
Figura 3.12	Admitância do SVC x Tensão Controlada	58
Figura 3.13	Potência Reativa Gerada x Tensão Controlada	60
Figura 3.14	Admitância do SVC x Tensão Controlada	60
Figura 3.15	Potência Reativa Gerada x Tensão Controlada	62
Figura 3.16	Admitância do SVC x Tensão Controlada	63
Figura 3.17	Potência Reativa Gerada x Tensão Controlada, Tensão-Base na Barra 453 Variável com a Tensão-Base da Barra 450	65
Figura 3.18	Admitância do SVC x Tensão Controlada	65

Figura 3.19	Comportamento da Tensão Interna do Compensador Síncrono e da Tensão Controlada Remotamente na Barra 178, Sistema S/SE, abril/97, 18h	71
Figura 3.20	Comportamento da Tensão Interna do Compensador Síncrono e da Tensão Controlada Remotamente na Barra 178, Sistema S/SE, abril/97, 15h	73
Figura 4.1	Sistema de 3 Barras.....	78
Figura 4.2	Sistema de 3 Barras com LTC	83
Figura 4.3	Sistema de 5 Barras.....	87
Figura 4.4	Sistema-Teste de 3 Barras.....	90
Figura 4.5	Estrutura do SVC	92
Figura 4.6	Reatância Equivalente do SVC em função do Ângulo de Disparo dos Tiristores ($X_C = 15 \Omega$ e $X_L = 2,56 \Omega$).....	93
Figura 4.7	Susceptância Equivalente do SVC em função do Ângulo de Disparo dos Tiristores ($X_C = 15 \Omega$ e $X_L = 2,56 \Omega$).....	94
Figura 4.8	Característica V-I em Regime Permanente do SVC.....	95
Figura 4.9	Característica V-Q em Regime Permanente do SVC.....	95
Figura 4.10	Efeito Esperado da Variação de α sobre V_{cont}	102
Figura 4.11	Efeito Oposto ao Esperado da Variação de α sobre V_{cont}	105
Figura 4.12	Sistema de 5 Barras com SVC.....	105
Figura 4.13	Susceptâncias do FC, TCR e SVC em função do Ângulo de Disparo dos Tiristores.....	107
Figura 4.14	Influência das Ações de Controle do Sistema de 5 Barras no Ponto de Operação da Tabela 4.5.....	121
Figura 4.15	Influência das Ações de Controle do Sistema de 5 Barras no Ponto de Operação da Tabela 4.6.....	123

Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Índices para a Barra 44 com Compensador Síncrono.....	30
Tabela 2.2	Índices para a Barra 178 Controlada pela Barra 44	31
Tabela 2.3	Índices para a Barra 1107	31
Tabela 2.4	Índices para a Barra 253	32
Tabela 2.5	Índices para a Barra 106	33
Tabela 2.6	Índices para a Barra 140	33
Tabela 2.7	Índices para Barras de mesma Classe de Tensão.....	35
Tabela 2.8	Índices para a Barra 62	37
Tabela 2.9	Índices para a Barra 62 com a Compensação Série Atenuada.....	37
Tabela 3.1	Módulo da Tensão Controlada, Potência Reativa Gerada, Admitância do SVC e Índice de $[D'] * V$	40
Tabela 3.2	Ponto de Operação do Sistema de Duas Barras	45
Tabela 3.3	Módulo e Ângulo da Tensão da Barra de Carga para Variações na Tensão Terminal do Gerador	45
Tabela 3.4	Ponto de Operação do Sistema	48
Tabela 3.5	Pontos de Operação Antes e Após Decréscimo na Tensão Interna	49
Tabela 3.6	Valores do Circuito de 2 Barras, da Carga e da Tensão no Gerador.....	51
Tabela 3.7	Tensões na Carga nas Regiões A e B para Dois Valores de Tap.....	51
Tabela 3.8	Valores do Circuito de 3 Barras, de Carga e da Tensão no Gerador.....	53
Tabela 3.9	Tensões nas Regiões A e B para Dois Valores de Tap	53
Tabela 3.10	Admitância do SVC, Tensão, Potência Injetada, Injeção Máxima de Potência e Ângulo entre ∇P e ∇Q	56
Tabela 3.11	Admitância do SVC, Tensão, Potência Injetada, Injeção Máxima de Potência e Ângulo entre ∇P e ∇Q	59
Tabela 3.12	Admitância do SVC, Tensão, Potência Injetada, Injeção Máxima de Potência e Ângulo entre ∇P e ∇Q	61

Tabela 3.13	Admitância do SVC, Tensão, Potência Injetada, Injeção Máxima de Potência e Ângulo entre ∇P e ∇Q	64
Tabela 3.14	Relatório de Estabilidade de Tensão, Sistema S/SE, abril 97, 18:00 hs	67
Tabela 3.15	Relatório de Estabilidade de Tensão, Sistema S/SE, abril 97, 15:00 hs	68
Tabela 3.16	Avaliação do Comportamento do Controle de Tensão da Barra 178, Sistema S/SE, abril 97, 18:00 hs.....	70
Tabela 3.17	Avaliação do Comportamento do Controle de Tensão da Barra 178, Sistema S/SE, abril 97, 15:00 hs.....	72
Tabela 4.1	Ponto de Operação onde a Ação de Controle tem efeito Oposto ao Esperado.....	80
Tabela 4.2	Ponto de Operação onde a Ação de Controle tem o efeito Esperado.....	80
Tabela 4.3	Ponto de Operação onde a Barra Controlada está na Região B.....	84
Tabela 4.4	Ponto de Operação onde a Barra Controlada está na Região A.....	85
Tabela 4.5	Dados do Sistema de 5 Barras	89
Tabela 4.6	Dados do Sistema de 5 Barras com a Barra 5 na Região B	89
Tabela 4.7	Ponto de Operação na Região B	91
Tabela 4.8	Ponto de Operação na Região A	91
Tabela 4.9	Derivadas para o Cálculo do Índice Susceptância x Tensão Controlada.....	100
Tabela 4.10	Derivadas para o Cálculo do Índice Ângulo de Disparo dos Tiristores x Tensão Controlada (Modelo de Injeção de Corrente).....	103
Tabela 4.11	Derivadas para o Cálculo do Índice Ângulo de Disparo dos Tiristores x Tensão Controlada (Modelo de Injeção de Potência Reativa)	104
Tabela 4.12	Dados de Linha do Sistema de 5 Barras.....	106
Tabela 4.13	Ponto de Operação Inicial (Região A).....	111
Tabela 4.14	Efeito no Aumento de V_{esp} no Ponto de Operação da Tabela 4.13.....	111
Tabela 4.15	Ponto de Operação Inicial (Região B).....	112
Tabela 4.16	Efeito no Aumento de V_{esp} no Ponto de Operação da Tabela 4.15.....	112

Tabela 4.17	Efeito da Variação de t_{13} sobre V_3 , V_4 e V_5 no Ponto de Operação da Tabela 4.5	124
Tabela 4.18	Efeito da Variação de t_{24} sobre V_3 , V_4 e V_5 no Ponto de Operação da Tabela 4.5	125
Tabela 4.19	Efeito da Variação de b_{sh} sobre V_3 , V_4 e V_5 no Ponto de Operação da Tabela 4.5	125
Tabela 4.20	Efeito da Variação de t_{13} sobre V_3 , V_4 e V_5 no Ponto de Operação da Tabela 4.6	126
Tabela 4.21	Efeito da Variação de t_{24} sobre V_3 , V_4 e V_5 no Ponto de Operação da Tabela 4.6	126
Tabela 4.22	Efeito da Variação de b_{sh} sobre V_3 , V_4 e V_5 no Ponto de Operação da Tabela 4.6	127

Abreviaturas e Siglas

WSCC	Western Systems Coordinating Council
OLTC	on-load tap changing
V	módulo da tensão
S	potência aparente
P	potência ativa
Q	potência reativa
ΔP	variação incremental de potência ativa
ΔQ	variação incremental de potência reativa
[J]	matriz jacobiana
$\Delta\theta$	variação incremental do ângulo da tensão
ΔV	variação incremental do módulo da tensão
[A]	sub-matriz da matriz jacobiana
[B]	sub-matriz da matriz jacobiana
[C]	sub-matriz da matriz jacobiana
[D]	sub-matriz da matriz jacobiana
[D']	matriz obtida de uma redução da matriz jacobiana
S_i	potência injetada na barra i
S_m	potência aparente máxima que pode ser injetada na barra i
Y	admitância
∇P	gradiente do fluxo de potência ativa
∇Q	gradiente do fluxo de potência reativa

$\frac{\partial P}{\partial \theta}$	derivada parcial do fluxo de potência ativa em relação ao ângulo da tensão
$\frac{\partial Q}{\partial V}$	derivada parcial do fluxo de potência reativa em relação ao módulo da tensão
$\frac{\partial P}{\partial V}$	derivada parcial do fluxo de potência ativa em relação ao módulo da tensão
$\frac{\partial Q}{\partial \theta}$	derivada parcial do fluxo de potência reativa em relação ao ângulo da tensão
β	ângulo entre o gradiente do fluxo de potência ativa ∇P e o gradiente de potência reativa ∇Q
β_0	ângulo entre o gradiente do fluxo de potência ativa ∇P e o gradiente de potência reativa ∇Q do caso base
M	margem de potência
M_0	margem de potência do caso base
M_1	margem de potência após o evento em análise
II	índice de influência
LTC	load tap changing
TCR	thyristor controlled reactor
SVC	static var compensator
FC	fixed capacitor