

Rover Figueiró França

**Índices e Margens para Avaliação da
Segurança de Tensão**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Departamento de Engenharia Elétrica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Rio de Janeiro
Julho de 2003



Rover Figueiró França

Índices e Margens para Avaliação da Segurança de Tensão

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Ricardo Bernardo Prada

Rio de Janeiro, março de 2003



Rover Figueiró França

Índices e Margens para Avaliação da Segurança de Tensão

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

Ricardo Bernardo Prada
Orientador
PUC - Rio

Ricardo Bernardo Prada
PUC - Rio

Ricardo Bernardo Prada
PUC - Rio

Ricardo Bernardo Prada
PUC - Rio

Prof. Paulo Batista Gonçalves
Coordenador(a) Setorial do Centro
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 30 de Julho de 2003

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

Rover Figueiró França

Graduou-se em Engenharia Elétrica na PUC - Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) em 2001.

Ficha Catalográfica

França, Rover Figueiró

Índices e margens para avaliação da segurança de tensão / Rover Figueiró França; orientador: Ricardo Bernardo Prada. – Rio de Janeiro : Departamento de Engenharia Elétrica, 2003.

93 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Segurança de tensão. 3. Estabilidade de tensão. 4. Colapso de tensão. 5. Controle. 6. Carregamento de rede. I. Prada, Ricardo Bernardo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Para meus pais, Jaques Figueiró França e Eliane Maria Figueiró França,
pelo imenso trabalho que tiveram para me preparar para a vida,
para meus sobrinhos Michael, Jaques e Jamile,
por serem bênçãos de DEUS,
e para minha noiva Aline Ramalho,
pelo apoio e confiança.

Agradecimentos

A Deus.

Ao meu orientador Professor Ricardo Bernardo Prada pelo estímulo, paciência e parceria para a realização deste trabalho.

À CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Ao meu amigo e Professor Carlos Velasco Juarez, por todo apoio, paciência e compreensão.

As minhas irmãs e ao meu irmão, landra, Jaqueline, e Alvaro, aos amigos, que de uma forma ou de outra me estimularam ou me ajudaram.

Aos professores que participaram da Comissão examinadora.

A todos os amigos do curso de Pós – Graduação em Engenharia Elétrica, pelo estímulo e pela amizade.

Ao Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), pelos subsídios operacionais que viabilizaram este trabalho.

A todos os professores e funcionários do Departamento pelos ensinamentos e pela ajuda.

Resumo

França, Rover Figueiró. **Índices e Margens para Avaliação da Segurança de Tensão**. Rio de Janeiro, 2003. 100p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Apresenta-se uma abrangente ferramenta de avaliação das condições de segurança de tensão, composta de índices com significado físico / matemático, propícia para uso na operação em tempo real. A ferramenta identifica se a solução de tensão para uma carga conectada à barra i está na parte superior, na inferior e a distância ao máximo carregamento da curva $V \times P, Q$. Neste trabalho a ênfase está no desenvolvimento da margem de potência, distância em MVA do atual ao máximo carregamento, assim como na análise do ângulo entre os vetores-gradiente dos fluxos de potência ativa e reativa chegando / saindo de barras de carga / geração.

Mostra-se a evolução desses índices durante um horizonte de tempo correspondente a uma rampa de carregamento do sistema. A área Rio do sistema brasileiro foi escolhida para observação por ter seu desempenho fortemente influenciado pela coordenação entre os diversos recursos de controle internos e externos e, também por ser um grande centro de carga com sistema de suprimento radial. A implementação das lógicas desses recursos de controle, caracterizada pela escolha das barras controladas e faixas de tensão, refletiram a experiência acumulada na operação do sistema, respeitando-se todos os limites operativos

Verifica-se a ocorrência de situações extremas que levariam o sistema ao colapso de tensão. Apresenta-se ainda um estudo de barras associadas à compensação série no tronco de transmissão entre Itaipu a Tijuco Preto, barras que apresentam índices com valores atípicos.

Conclui-se que o método computacional de avaliação das condições de segurança de tensão é adequado para a operação em tempo real, quando é monitorada a evolução dos índices relativos a uma seqüência de diferentes pontos de operação.

Palavras – chave

Segurança de tensão, estabilidade de tensão, colapso de tensão, carregamento da rede de transmissão.

Abstract

França, Rover Figueiró. "Indexes and Margins for Voltage Security Assessment". Rio de Janeiro, 2003. 81p. Master Dissertation – Electrical Engineering Department, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work presents a comprehensive and meaningful tool for voltage security assessment adequate for real time operational monitoring. With this tool it is possible to verify if the voltage is in the upper or in the lower region of the V, P,Q curve, as well as to quantify voltage stability margin. The emphasis of this work is on the development of margins, the distance in MVA from the current to the maximum loading, as well as on the analysis of the angle between the gradient vectors of active and reactive power flow leaving / arriving generation / load buses.

It is shown the evolution of the indexes during a period of time that corresponds to a system-loading ramp. The Rio and Espírito Santo area of the Brazilian electric system was chosen for observation because its performance is strongly influenced by the coordination between the several types of internal and external existing controls. Also because this area represents a large load centre with an almost radial transmission system. The logic implementation of these control resources, characterised by controlled buses and voltage limits choice, respecting all the operational limits, reflected the operational experience acquired by system operators.

It is verified the occurrence of extreme situations that could lead to voltage collapse in the network. It is also presented a study on the buses associated with series compensation on the Itaipu – Tijuco Preto bulk transmission path that present unusual values for the indexes.

It is concluded that the computational method of voltage security assessment is adequate for real time operation, when the evolution of indexes related to different operation points are monitored.

Keywords:

Voltage security, voltage stability, voltage collapse, transmission network loading.

Sumário

Lista de Tabelas	iii	
Lista de Figuras	iv	
Abreviaturas e Siglas	vi	
1	Introdução	1
1.1	Considerações Gerais	1
1.2	Objetivo	2
2	Comparação dos Índices [Prada, 2002] e [Kessel, 1986].....	3
2.1	Indicador L [Kessel, 1986].....	3
2.1.1	Demonstração Analítica	3
2.1.2	Critério de Estabilidade de Tensão para Sistema Duas Barras	7
2.1.3	Critério de Estabilidade de Tensão para Sistema Multi-Nó	7
2.1.4	Interpretação do Indicador L	12
2.2	Índices Associados à Matriz [D'] [Prada, 2002]	13
2.2.1	Magnitude do Determinante da Matriz [D']	14
2.2.1.1	Sistema Duas Barras	14
2.2.1.2	Sistema Multi-Nó.....	16
2.2.2	Sinal do Determinante da Matriz [D'].....	18
2.2.3	Margem de Potência	19
2.2.4	Índice de Influência	21
3	Análise do Ângulo β	23
3.1	Índice β Referente à Barra de Carga.....	23
3.1.1	Cálculo do Módulo da Tensão no Máximo Carregamento	28
3.1.2	Cálculo do Ângulo da Tensão no Máximo Carregamento	30
3.1.3	Comportamento do Ângulo β	30
3.2	Índice β Referente à Barra de Geração.....	32

3.2.1	Cálculo do Módulo da Tensão no Máximo Carregamento	36
3.2.2	Cálculo do Ângulo da Tensão no Máximo Carregamento	38
3.2.3	Comportamento do Ângulo β	38
3.3	Conclusões	41
4	Análise da Estimativa da Máxima Injeção S_m e da Margem M	43
4.1	Interpretação do Determinante da Matriz $[D']$	43
4.2	Interpretação dos Índices S_m e M	45
4.2.1	Análise da Curva $V \times P, Q$ para um Sistema Duas Barras.....	45
4.2.2	Análise da Curva $V \times P, Q$ para um Sistema Multi-nó	46
4.2.2.1	Operação na Região Normal de Operação.....	47
4.2.2.2	Operação no Ponto de Máximo Carregamento.....	47
4.2.2.3	Operação na Região Anormal de Operação	47
4.3	Estudo de Casos Utilizando o Programa Computacional EstabTen	48
4.4	Proposição para Solução dos Problemas dos Índice S_m e M	55
4.4.1	Proposta de Definição e Interpretação da Margem	57
4.5	Sugestão para Imprimir os Resultados do Programa EstabTen	59
5	Casos Especiais.....	69
5.1	Análise do Elemento Diagonal da Matriz Admitância de Barra	70
5.2	Análise do Determinante da Matriz $[D']$	73
5.3	Conclusões	74
6	Sugestão para trabalhos futuros	76
7	Conclusões	77
8	Referências Bibliográficas.....	80
9	Bibliografia	81

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Índices para a Barra de Geração 1107 – ITAIPU60-8MQ	42
Tabela 3.2 – Índices para a Barra de Geração 16 – FURNAS---3MQ	42
Tabela 4.1– Índices para a Barra de Carga 1718 – MAGE69	51
Tabela 4.2 – Índices para a Barra de Carga 1754 – TERESOPOL138.....	51
Tabela 4.3 – Índices para a Barra de Geração 1107– ITAIPU60-8MQ	52
Tabela 4.4 – Índices para a Barra de Geração 2696 – ROSAL----2MQ.....	53
Tabela 4.5 – Índices para a Barra de Passagem 149 – VITORIA—345	54
Tabela 4.6 – Índices para a Barra de Carga 1718 – MAGE69.....	61
Tabela 4.7 – Índices para a Barra de Carga 1754 – TERESOPOL138.....	61
Tabela 4.8 – Índices para a Barra de Geração 1107 ITAIPU60-8MQ	62
Tabela 4.9 – Índices para a Barra de Geração 2696 – ROSAL----2MQ.....	62
Tabela 4.10 – Índices para a Barra de Passagem 149 – VITORIA---345	63
Tabela 4.11 – Índices para a Barra de Geração 10 – ANGRA-1--1MQ	64
Tabela 4.12 – Índices para a Barra de Geração 253 – FONTES---3MQ.....	64
Tabela 4.13 – Índices para a Barra de Tensão Controlada 44 – GRAJAU-1-1CS.....	65
Tabela 4.14 – Índices para a Barra de Carga 178 – GRAJAU--138.....	65
Tabela 4.15 – Índices para a Barra de Geração 3977 – MERCHANT12MQ	66
Tabela 4.16 – Índices para a Barra de Passagem 106 – ADRIANO--500.....	66
Tabela 4.17 – Índices para a Barra de Passagem 140 – ADRIANO--345.....	67
Tabela 4.18 – Índices para a Barra de Carga 175 – CAMPOS--138.....	68
Tabela 5.1 – Índices para Barras de Mesma Classe de Tensão.....	71
Tabela 5.2 - Relatório de Dados de Linha	72
Tabela 5.3 – Relatório de Barras.....	72
Tabela 5.4 – Índices para a Barra 62	74
Tabela 5.5 - Índices para a Barra 62 com a Compensação Série Atenuada	74

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Sistema de Duas Barras.....	3
Figura 2.2 – Círculos de Módulo de Tensão Constante	6
Figura 2.3 – Indicador L e sua Relação com a Tensão Crítica.....	12
Figura 2.4 – Localização do Vetor Gradiente de P_i e Q_i no Plano $Vx\theta$	19
Figura 2.5 – Sinal da Margem na Curva $V \times P, Q$	20
Figura 2.6 – Movimento dos Pontos de Operação na Curva $V \times P, Q$	22
Figura 2.7 – Curva $V \times P, Q$ para Análise do Índice de Influência.....	22
Figura 3.1 – Sistema de Duas Barras.....	23
Figura 3.2 – Localização do Vetor Gradiente de P_i no Plano $Vx\theta$	25
Figura 3.3 – Localização do Vetor Gradiente de Q_i no Plano $Vx\theta$	26
Figura 3.4 – Localização do Vetor Gradiente de P_i e Q_i no Plano $Vx\theta$	27
Figura 3.5 – Localização do Vetor Gradiente de P_i e Q_i no Plano $Vx\theta$	28
Figura 3.6 – Localização do Vetor Gradiente de P_i e Q_i no Plano $Vx\theta$	31
Figura 3.7 – Localização do Vetor Gradiente de P_i e Q_i no Plano $Vx\theta$	31
Figura 3.8 – Localização do Vetor Gradiente de P_i no Plano $Vx\theta$	34
Figura 3.9 – Localização do Vetor Gradiente de P_i no Plano $Vx\theta$	35
Figura 3.10 – Localização do Vetor Gradiente de Q_i no Plano $Vx\theta$	36
Figura 3.11 – Localização do Vetor Gradiente de P_i e Q_i no Plano $Vx\theta$	39
Figura 3.12 – Localização do Vetor Gradiente de P_i e Q_i no Plano $Vx\theta$	40
Figura 3.13 – Localização do Vetor Gradiente de P_i e Q_i no Plano $Vx\theta$	40
Figura 4.1 – Sinal do $\det[D']$ na curva $V \times P, Q$	43
Figura 4.2 – Sinal da Margem na Curva $V \times P, Q$ para um Sistema de Duas Barras.....	45
Figura 4.3 – Sinal da Margem para na Curva $V \times P, Q$ para um Sistema Multi-Nó	46
Figura 4.4 – Comportamento do Índice S_m	53
Figura 4.5 - Margem na Base de Potência S_m para um Sistema de Duas Barras.....	55
Figura 4.6 - Margem na Base de Potência S_i para um Sistema de Duas Barras	56
Figura 4.7 - Margem para um Sistema de Duas Barras	57
Figura 4.8 - Sinal da Margem na Curva $V \times P, Q$	59
Figura 4.9 – Curvas $V \times P, Q$ para uma Barra de Tensão Controlada / Passagem da Região Normal para a Anormal.....	67

Figura 5.1 – Detalhe da Estrutura Física do Tronco ITAIPU – T. PRETO.....	69
Figura 5.2 – Detalhe da Estrutura Física da Barra 62 - IV-FOZ-1-765.....	73

Abreviaturas e Siglas

b_{ik}	susceptância série do ramo $i - k$,
r_{ik}	resistência série do ramo $i - k$,
Y_{ii}	elemento diagonal da matriz admitância de barra,
CA	corrente alternada,
CC	corrente contínua,
CER	compensador estático de potência reativa,
M_i	estimativa da distância ao máximo carregamento, calculada no ponto de operação em análise (margem de potência),
P_i	potência ativa injetada na barra i no ponto de operação em análise,
Q_i	potência reativa injetada na barra i no ponto de operação em análise,
S_{base}^{ca}	potência base do sistema CA,
S_i	potência injetada na barra i no ponto de operação em análise,
S_m	estimativa da potência aparente que estaria sendo injetada na barra i , calculada no ponto de operação em análise, caso este fosse o ponto de máxima injeção,
S_{io}	potência aparente máxima maximorum que pode ser injetada para a barra i para um sistema duas barras,
$\Delta det * V_i$	relaciona à potência injetada no restante do sistema que limita a injeção de potência na barra i ,
$det[D] * V_i$	indica a distância de S_i^2 a S_{io}^2 , bem como indica a região de operação da curva $V \times P, Q$ (para um sistema de duas barras),
$det[D'] * V_i$	indica a distância de S_i^2 a S_{io}^2 , bem como indica a região de operação da curva $V \times P, Q$ (para um sistema multi-nó),
V_i	tensão na barra i ,
$\nabla \dot{P}_i$	vetor gradiente de potência ativa na barra i ,
$\nabla \dot{Q}_i$	vetor gradiente de potência reativa na barra i .
β_i	ângulo entre os vetores gradientes $\nabla \dot{P}_i$ e $\nabla \dot{Q}_i$,
ϕ	Ângulo do fator de potência,
L_i	Índice nodal para avaliação do carregamento da rede de transmissão,