



Anselmo Barbosa Rodrigues

**Análise Probabilística da Estabilidade
de Tensão em Sistemas Compostos de
Geração e Transmissão**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Ricardo Bernardo Prada
Co-orientadora: Profa. Maria da Guia da Silva

Rio de Janeiro
Novembro de 2009



Anselmo Barbosa Rodrigues

**Análise Probabilística da Estabilidade de Tensão
em Sistemas Compostos de Geração e
Transmissão**

Tese 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.

Prof. Ricardo Bernardo Prada
Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Profa. Maria da Guia da Silva
Co-orientadora
UFMA

Prof. Armando Martins Leite da Silva
UNIFEI

Prof. Marcus Theodor Schilling
UFF

Prof. Roberto Nogueira Fontoura Filho
ONS

Prof. Albert Cordeiro Geber de Melo
CEPEL

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico

Rio de Janeiro, 16 de novembro de 2009

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

Anselmo Barbosa Rodrigues

Graduou-se em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Maranhão (São Luís, Brasil) em 1997. Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Maranhão em 2003.

Ficha Catalográfica

Rodrigues, Anselmo Barbosa

Análise da estabilidade de tensão em sistemas compostos de geração e transmissão / Anselmo Barbosa Rodrigues; orientador: Ricardo Bernardo Prada; co-orientador: Maria da Guia da Silva. – 2009.

203 f. : il. (color.); 29,7 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Estabilidade de tensão. 3. Métodos probabilísticos. 4. Método da matriz D. 5. Fluxo de potência ótimo. 6. Método dos pontos-interiores. 7. Simulação Monte Carlo. 8. Enumeração de estados. I. Prada, Ricardo Bernardo. II. Silva, Maria da Guia da. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Este trabalho é dedicado à minha família.

Agradecimentos

A Deus, por ter me iluminado durante todos os momentos difíceis ao longo desta jornada.

A minha mãe Graça Maria Barbosa Rodrigues, pela educação e pelo sacrifício, que tornaram possível a minha chegada até aqui.

Ao professor Ricardo Prada pela orientação segura e precisa no desenvolvimento deste trabalho e pelo interesse que revelou para com as minhas descobertas.

A professora Maria da Guia, pela orientação, incentivo, paciência, disposição em ajudar sempre que foi necessário, pelos inestimáveis ensinamentos transmitidos nestes anos de trabalho conjunto, pela dedicação formidável e valioso estímulo que tem me dispensado e, sobretudo pela amizade.

Ao professor Marcus Theodor Schilling da UFF e a Waschington Fernandes Alves da ELETROBRÁS pela ajuda durante os estudos com os sistemas-teste brasileiros.

Ao CEPEL pela cessão de uso dos programas ANAREDE e FLUPOT para fins de ensino e pesquisa.

Ao CNPq e CAPES pelo apoio financeiro para a realização deste projeto de pesquisa.

Aos companheiros do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio, pelo estímulo e pela saudável convivência.

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

Resumo

Rodrigues, Anselmo Barbosa; Prada, Ricardo Bernardo (Orientador); da Silva, Maria da Guia da Silva (Co-orientadora). **Análise Probabilística da Estabilidade de Tensão em Sistemas Compostos de Geração e Transmissão**. Rio de Janeiro, 2009. 203p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do rio de Janeiro

Em alguns países, os sistemas de energia elétrica estão operando próximos aos seus limites devido à falta de investimentos para expansão da transmissão e crescimento natural da demanda de energia elétrica. Esta condição de operação também pode ocorrer em sistemas de potência nos quais a expansão da transmissão é realizada de forma adequada. Neste caso, o carregamento excessivo da rede de transmissão é geralmente originado pela perda de interligações que transportam grandes blocos de energia. Os dois cenários de operação descritos acima têm causado problemas de Estabilidade de Tensão em sistemas de energia elétrica. Os estados de instabilidade de tensão são caracterizados principalmente pela presença de dois mecanismos: a insolubilidade das equações de fluxo de potência e a perda de controlabilidade. Os distúrbios que originam estes dois mecanismos são de natureza aleatória. Conseqüentemente, os índices de estabilidade de tensão, usados para analisar a perda de controlabilidade e a insolubilidade, são variáveis aleatórias. Desta forma, a análise de estabilidade de tensão deveria reconhecer incertezas associadas com parâmetros da rede elétrica, tais como: flutuações de carga e disponibilidade dos equipamentos. Geralmente, a modelagem de incertezas na análise de estabilidade de tensão é realizada usando os seguintes métodos probabilísticos: a Simulação Monte Carlo e a Enumeração de Estados. O principal índice estimado por estes métodos é o risco de instabilidade de tensão. Entretanto, o cálculo do risco de instabilidade de tensão é geralmente realizado contabilizando apenas um dos mecanismos causadores dos cenários de instabilidade de tensão. Além disso, a severidade dos estados de instabilidade de tensão não tem sido devidamente investigada. O objetivo desta tese é desenvolver um método para realizar uma análise probabilística da estabilidade de tensão que contabilize os dois mecanismos causadores da instabilidade de tensão no cálculo do seu risco. Serão também propostos índices probabilísticos, baseados na Análise de Robustez, para expressar a severidade dos estados de instabilidade de tensão. O método proposto se baseia na combinação das seguintes técnicas: Enumeração de Estados, Simulação Monte Carlo, Método da Matriz D' e Fluxo de Potência Ótimo Não-Linear. Os métodos de Enumeração de Estados e Simulação Monte Carlo são usados para selecionar os estados do sistema resultantes de falhas nos equipamentos e erros de previsão de carga. A identificação da perda de controlabilidade e a restauração da solubilidade dos estados selecionados são realizadas pelo Método da Matriz D' e pelo Fluxo de Potência Ótimo, respectivamente. A combinação dos métodos citados acima foi usada para obter os seguintes índices probabilísticos: risco de instabilidade de tensão, valores esperados da margem de estabilidade de tensão para as barras, e probabilidades dos estados de robustez. Os resultados dos testes com o método proposto revelaram que as probabilidades de estados instáveis, associados aos dois mecanismos causadores da instabilidade de tensão, são bastante significativas. Adicionalmente, a Análise de Robustez permitiu identificar a causa raiz e a severidade dos problemas de instabilidade de tensão.

Palavras-chave

Enumeração de Estados, estabilidade de tensão, fluxo de potência ótimo, método da matriz D', método dos pontos-interiores, métodos probabilísticos, modelagem de incertezas, simulação Monte Carlo.

Abstract

Rodrigues, Anselmo Barbosa Rodrigues; Prada, Ricardo Bernardo (Advisor); da Silva, Maria da Guia da Silva (Co-advisor). **Voltage Stability Probabilistic Assessment in Composite Generation and Transmission Systems**. Rio de Janeiro, 2009. 203p. Doctorate Thesis – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In some countries, the electric power systems are operating near to their limits due to the absence of investments in the transmission network expansion and natural growth of the electricity demand. This operation condition can also occur in electric power systems in which the transmission expansion is carried out in appropriate way. In this case, the excessive loading of the transmission network is usually originated by the loss of interconnections that transport large energy blocks. The two operation scenarios described above have caused Voltage Stability problems in the electric power systems. The voltage instability states are mainly characterized by the presence of two mechanisms: the unsolvability of the power flow equations and the controllability loss. The disturbances that originate these two mechanisms are of stochastic nature. Consequently, the voltage instability indices, used to analyze the unsolvability and controllability loss, are random variables. In this way, the voltage stability assessment would recognize the uncertainties associated with the parameters of the electric network, for example: load fluctuations and equipment availability. Generally, the uncertainties modeling in the voltage stability is carried out using the following probabilistic methods: the Monte Carlo Simulation and the State Enumeration. The main index estimated by these methods is the voltage instability risk. However, the voltage instability risk evaluation is usually carried out considering only one of the mechanisms that cause voltage instability scenarios. Furthermore, the severity of the unstable states has not been properly investigated. The aim of this thesis is to develop a method to carry out a probabilistic assessment of the voltage stability that take into account the two mechanisms that cause the voltage instability in the evaluation of its risk. Probabilistic indices, based on Well-Being Analysis, are also proposed to express the severity of the voltage instability states. The proposed method is based on the combination of the following techniques: State Enumeration Method, Monte Carlo Simulation, D' Matrix Method and Nonlinear Optimal Power Flow. The State Enumeration and Monte Carlo Simulation Methods are used to select the system states resulting of equipment failures and load forecast errors. The identification of the controllability loss and the solvability restoration of the power flow equations for the selected states are carried out by the D' Matrix Method and by the Nonlinear Optimal Power Flow, respectively. The combination of the methods cited above was used to obtain the following probabilistic indices: voltage instability risk, expected value of the voltage instability margin for the buses, and Well-Being states probabilities. The results of the tests with the proposed method revealed that the probabilities of unstable states, associated with the two voltage instability mechanism, are very significant. Additionally, the Well-Being Analysis was able to identify the root cause and the severity of the voltage instability problems.

Keywords

D' matrix method, interior-point method, Monte Carlo simulation, optimal power flow, probabilistic methods, state enumeration, uncertainties modeling, voltage stability.

Sumário

1	Introdução	19
1.1	Considerações Gerais	19
1.2	Estabilidade de Tensão	20
1.2.1	Definição.	20
1.2.2	Análise da Estabilidade de Tensão em Sistemas de Grande Porte	22
1.3	Avaliação da Confiabilidade de Sistemas de Energia Elétrica (ACSEE) ..	29
1.3.1	Definição	29
1.3.2	Níveis Hierárquicos	30
1.3.3	Modelagem de Incertezas na ACSEE	31
1.3.4	Análise de Confiabilidade no NH2	37
1.4	Análise Probabilística da Estabilidade de Tensão	41
1.5	Motivação	52
1.6	Objetivos da tese	52
1.7	Estrutura da tese	55
2	Demonstração e Visualização dos Mecanismos Causadores da Instabilidade de Tensão	58
2.1	Introdução	58
2.2	Instabilidade de Tensão Causada pela Ausência de Solubilidade	58
2.3	Instabilidade de Tensão Causada pela Perda de Controlabilidade	68
2.4	Visualização dos Mecanismos Causadores da Instabilidade de Tensão através da Curva PV	75
2.5	Ocorrência de Problemas de Instabilidade de Tensão na Faixa de Operação Normal das Tensões	78
2.6	Comentários Finais	81
3	Restauração da Solubilidade das Equações de Fluxo de Potência	82
3.1	Introdução	82
3.2	FPO Ideal para a RESFLUP	84
3.3	FPO Prático para a RESFLUP	89
3.4	Algoritmo de Otimização Usado na RESFLUP	92
3.4.1	Introdução	92
3.4.2	Formulação Geral do Problema de Otimização Não-Linear Associado com a RESFLUP	93
3.4.3	Eliminação das Restrições de Desigualdade através de Métodos de Barreira Logarítmica	95
3.4.4	Função Lagrangeana	98
3.4.5	Solução das Condições de Optimalidade através do Método de Newton	100
3.4.6	Inicialização das Variáveis	104
3.4.7	Regra de Parada	105
3.4.8	Cálculo do Comprimento de Passo	106

3.4.9 Atualização do Parâmetro de Barreira	107
3.4.10 Técnicas de Operação de Matrizes Esparsas e Solução do Sistema Aumentado.....	108
3.4.11 Modelagem de Variáveis Fixas	111
3.4.12 Algoritmo Conceitual	112
3.4.13 Comentários Finais.....	113
4 Método da Matriz D'	116
4.1 Cálculo da Matriz D'	116
4.2 Índices Derivados do $\det[D']$	118
4.2.1 Margem de Estabilidade de Tensão.....	118
4.2.2 Ângulo β 125	
4.2.3 Índice de Influência	128
4.3 Algoritmo Teórico para a Análise de Estabilidade de Tensão via MMD ..	130
4.4 Algoritmo Prático para a Análise de Estabilidade de Tensão via MMD ..	131
4.5 Vantagens da Análise de Estabilidade de Tensão via MMD	138
4.6 Comentários Finais	139
5 Técnicas de Seleção de Estados Usadas na APET	141
5.1 Simulação Monte Carlo	141
5.1.1 Modelagem da Indisponibilidade dos Equipamentos	141
5.1.2 Modelagem dos Erros de Previsão de Carga.....	145
5.1.3 Avaliação da Precisão dos Índices Obtidos pela SMC.....	146
5.2 Enumeração de Estados	148
5.2.1 Aspectos Gerais	148
5.2.2 Modelagem do Erro de Previsão de Carga	151
5.2.3 Características Atrativas e Desvantagens da Enumeração.....	152
5.3 Funções-Teste dos Índices Propostos para a APET.....	154
5.3.1 Risco de Instabilidade de Tensão	155
5.3.2 Índices de Robustez.....	156
5.3.3 Valor Esperado do Índice de Influência.....	159
5.3.4 Comentários Finais	161
6 Resultados dos Testes.....	163
6.1 Características dos Sistemas-Teste.....	164
6.2 Análise Comparativa das Técnicas de Seleção de Estados Usadas na APET.....	168
6.3 APET nos Sistemas EQV-65 e EQV-107	172
6.3.1 Avaliação da Precisão e do Esforço Computacional da SMC	172
6.3.2 APET Baseada em Índices do Sistema.....	175
6.3.3 Identificação de Barras e Áreas Críticas Usando o Valor Esperado do Índice de Influência	178
6.4 Estimação dos Parâmetros do Sistema Equivalente de Duas Barras.....	180
6.5 Comentários Finais	183

7	Conclusões	184
7.1	Problema Investigado.....	184
7.2	Principais Realizações e Contribuições	184
7.3	Aplicações Práticas	186
7.4	Sugestões para Trabalhos Futuros	188
8	Referências Bibliográficas.....	193

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Ilustração do esquema previsor-corretor usado no FPC	25
Figura 1.2 – Definição dos Níveis Hierárquicos usados na ACSEE	31
Figura 1.3 – Diferenças entre as simulações seqüencial e não-seqüencial ...	36
Figura 1.4 – Algoritmo de avaliação da confiabilidade composta usando o modelo AC da rede elétrica, onde NI é o número de ilhas para o estado selecionado	38
Figura 1.5 – Curvas de limite de operação de estabilidade de tensão	44
Figura 1.6 – Restrições lineares ajustadas para modelar a curva de limites de operação	45
Figura 1.7 – Fluxograma do método proposto para realizar a APET	54
Figura 2.1 – Diagrama unifilar do sistema de duas barras	59
Figura 2.2 – Fronteira de solubilidade para o sistema de duas barras	63
Figura 2.3 – Contornos de Pd_2 e Qd_2 no ponto A.....	66
Figura 2.4 – Contornos de Pd_2 e Qd_2 no ponto B.....	66
Figura 2.5 – Contornos de Pd_2 e Qd_2 no ponto C	67
Figura 2.6 – Contornos de Pd_2 e Qd_2 no ponto D	67
Figura 2.7 – Sistema de duas barras com transformador em fase.....	69
Figura 2.8 – Efeito sobre o módulo da tensão na carga devido ao chaveamento de um banco de capacitores em paralelo, com susceptância de 1,0 pu na barra 2	70
Figura 2.9 – Efeito sobre o modulo da tensão na carga devido à troca de <i>taps</i> entre o gerador e a carga	70

Figura 2.10 – Efeito sobre o modulo da tensão na carga devido a variação da tensão nos terminais do gerador	71
Figura 2.11 – Efeito sobre o modulo da tensão na carga devido ao corte de carga com fator de potência constante	71
Figura 2.12 – Curva PV para o sistema de duas barras.....	76
Figura 2.13 – Lugar geométrico da tensão na carga com valores dentro da faixa de operação.....	80
Figura 3.1 – Diagrama unifilar do sistema IEEE-RTS com os circuitos 115/116 e 116/117 fora de serviço	88
Figura 3.2 – Trecho de um dos relatórios de saída do programa FLUPOT, usando o modelo ideal, para uma contingência dupla nos circuitos 115/116 e 116/117 do sistema IEEE-RTS.....	88
Figura 3.3 – Trecho de um dos relatórios de saída do programa FLUPOT, usando o modelo prático, para uma contingência dupla nos circuitos 115/116 e 116/117 do sistema IEEE-RTS.....	91
Figura 3.4 – Armazenamento de uma matriz 6 x 6 no formato Zollenkopf ...	110
Figura 3.5 – Estratégia de construção do sistema aumentado.....	110
Figura 4.1 – Variação do ângulo β para diferentes pontos de operação	127
Figura 4.2 – Variação do índice de influência.....	130
Figura 5.1 – Modelo de dois estados para um componente.....	143
Figura 5.2 – Modelo de três estados para um componente	144
Figura 5.3 – Diagrama espiróide convencional para contingências de até 3ª ordem em um sistema de 6 componentes	150
Figura 5.4 – Probabilidades e pontos médios dos intervalos resultantes da discretização da distribuição normal associada com o erro de previsão de carga	151
Figura 5.5 - Estados de Robustez usados na APET	159

Figura 6.1 – Diagrama unifilar do sistema IEEE-MRTS	165
Figura 6.2 – Diagrama unifilar do sistema EQV-65 [Alves, 2007].....	166
Figura 6.3 – Diagrama unifilar do sistema EQV-107 [Alves, 2007].....	167

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Valores de Pd_2 e Qd_2 para $tg\varphi = 0,5$	63
Tabela 2.2 – Solução do fluxo de potência para as cargas da Tabela 2.1	65
Tabela 2.3 – Valores de Pd_2 e Qd_2 para a análise de estabilidade de tensão com valores de tensão na faixa de operação, onde $Pd_{2,i}$ ($Qd_{2,i}$) é o i-ésimo valor de Pd_2 (Qd_2)	79
Tabela 3.1 – Tensões obtidas pelos programas ANAREDE e FLUPOT para o caso-base do sistema IEEE-RTS	87
Tabela 6.1 – Características dos sistemas-teste	164
Tabela 6.2 – Tipos de eventos de falha considerados no método de enumeração de estados	169
Tabela 6.3 – Comparação dos índices de robustez e do RIT estimados pelos métodos de enumeração e SMC	170
Tabela 6.4 – Comparação dos valores esperados das MET nodais calculadas via enumeração e SMC	171
Tabela 6.5 – Esforço computacional para realizar uma APET nos sistemas-teste	173
Tabela 6.6 – Coeficiente de variação para os índices probabilísticos (em porcentagem)	174
Tabela 6.7 – Análise de causa raiz do RIT com relação aos distúrbios do sistema	175
Tabela 6.8 – Probabilidades dos estados de robustez	176
Tabela 6.9 – Fatores de participação dos estados de robustez instáveis no RIT	176
Tabela 6.10 – Eficiência das ações de controle usadas na RESFLUP	177

Tabela 6.11 – Índice de influência esperado para o sistema EQV-107.....	180
Tabela 6.12 – Estatísticas associadas com as soluções obtidas pelo algoritmo de estimação do equivalente	182

Lista de Abreviaturas e Siglas

ACSEE	Análise de Confiabilidade de Sistemas de Energia Elétrica
ANAREDE	Programa de Análise de Redes
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APET	Análise Probabilística da Estabilidade de Tensão
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPNS	Expected Power Not Supplied (Potência Não-Fornecida Esperada)
EQV-65	Sistema equivalente de 65 barras obtido do sistema interligado nacional
EQV-107	Sistema equivalente de 107 barras obtido do sistema interligado nacional
FLUPOT	Programa de Fluxo de Potência Ótimo
FPC	Fluxo de Potência Continuado
FPO	Fluxo de Potência Ótimo
HSL	Harwell Subroutine Library
HVDC	High Voltage Direct Current

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEEE-RTS	IEEE Reliability Test System
IEEE-MRTS	Versão Modificada do Sistema IEEE-RTS
LOLD	Loss of Load Duration (Duração Média da Perda de Carga)
LOLF	Loss of Load Frequency (Frequência de Perda de Carga)
LOLP	Loss of Load Probability (Probabilidade de Perda de Carga)
MET	Margem de Estabilidade de Tensão
MME	Ministério das Minas e Energia
MPI	Método dos Pontos Interiores
MMD	Método da Matriz D'
MVT	Método de Vetor Tangente
NH0	Nível Hierárquico 0
NH1	Nível Hierárquico 1
NH2	Nível Hierárquico 2
NH3	Nível Hierárquico 3
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
P(Saudável)	Probabilidade do Estado Saudável

P(Marginal)	Probabilidade do Estado Marginal
P(Emergência)	Probabilidade do Estado de Emergência
P(Colapso)	Probabilidade do Estado de Colapso
PLS	Programação Linear Sucessiva
PQS	Programação Quadrática Sucessiva
RESFLUP	Restauração da Solubilidade das Equações de Fluxo de Potência
RIT	Risco de Instabilidade de Tensão
SMC	Simulação Monte Carlo
TDE	Técnica do Diagrama Espiróide