



Daniel Armando Arias Gómez

**Identificação das Barras Críticas do Ponto de
Vista de Estabilidade de Tensão**

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

Rio de Janeiro
Julho 2015



Daniel Armando Arias Gómez

Identificação das Barras Críticas do Ponto de Vista de Estabilidade de Tensão

Dissertação 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.

Prof. Ricardo Bernardo Prada

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Luiz Claudio de Araujo Ferreira

ONS

Prof. Jorge Luiz de Araujo Jardim

HPPA

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 16 de Julho de 2015

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

Daniel Armando Arias Gómez

Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidad Nacional da Colombia - Manizales - Colombia em 2013.

Ficha Catalográfica

Arias Gómez, Daniel

Identificação das Barras Críticas do Ponto de Vista de Estabilidade de Tensão / Daniel Armando Arias Gómez; orientador: Ricardo Bernardo Prada – 2015.

v., 188 f.: il. (color.); 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2015.

Inclui referências bibliográficas

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Estabilidade de Tensão. 3. Colapso de Tensão. 4. Índices de Avaliação de Estabilidade de Tensão. 5. Ponto de Máximo Carregamento.

I. Prada, Ricardo Bernardo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título

CDD: 621.3

Para Armando e Fernanda, meus pais, pelo amor, apoio e confiança.

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela vida e pelas oportunidades oferecidas.

Agradeço a minha família, por todo amor, dedicação, paciência, apoio e confiança que estiveram presentes desde sempre.

Ao meu orientador Ricardo Bernardo Prada pela dedicação, paciência e orientação nas diferentes etapas do desenvolvimento nesta dissertação.

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

A meus amigos e colegas do laboratório de sistemas de energia da PUC-Rio, em especial a Fernando de Assis, José Filho e Maxwell Vargas.

Aos professores e funcionários Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio, pela qualidade do ensino e excelente infraestrutura, essenciais para a execução do curso de mestrado.

A meus grandes amigos Juan Simon Obando e Cesar Lopez, por terem sido meus parceiros nesta aventura.

Resumo

Arias Gómez, Daniel Armando; Prada, Ricardo Bernardo. **Identificação das Barras Críticas do Ponto de Vista de Estabilidade de Tensão**. Rio de Janeiro, 2015. 188p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O surgimento do fenômeno de estabilidade de tensão na operação dos sistemas elétricos motivou centenas de pesquisadores a desenvolverem métodos que permitam detectar a proximidade à instabilidade de tensão, com eficiência computacional, e tomar medidas acertadas para garantir a operação confiável e segura. Neste trabalho são utilizados e comparados diferentes métodos associados à análise de estabilidade de tensão. Para testes, foram utilizados vários sistemas sob diferentes níveis de carregamento, desde carga leve até o máximo carregamento, este obtido a partir do algoritmo de fluxo de potência continuado. O objetivo é localizar as barras críticas, isto é, aquelas onde não se pode aumentar a injeção de potência e que impedem o crescimento da carga do resto do sistema.

Palavras-chave

Estabilidade de tensão; margem de potência; colapso de tensão; ponto de máximo carregamento; carga leve; fluxo de potência continuado.

Abstract

Arias Gómez, Daniel Armando; Prada, Ricardo Bernardo (Advisor). **Identification of Critical Buses from the Voltage Stability Viewpoint**. Rio de Janeiro, 2015. 188p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The rise of voltage stability phenomenon in the operation of the electrical systems motivated hundreds of researchers to develop methods that allow them to detect the proximity to voltage instability, with computational efficiency, and take the right steps to ensure reliable and safe operation. This work used and compared different methods associated with the voltage stability analysis. For the tests were used various systems under different levels of loading, from light load to maximum load, this point obtained from the continuous power flow algorithm. The goal is to find the critical buses, that is, those at which the power injection cannot be increased and that avoid the growth of load in the rest of the system.

Keywords

Voltage stability; power range; voltage collapse; maximum loading point; light load; continuous power flow.

Sumário

1. Introdução	18
1.1. Considerações Gerais	18
1.2. Objetivos	19
1.3. Estrutura da Dissertação	19
2. Diretrizes e Critérios de Segurança Relativos à Estabilidade de Tensão	21
2.1. Modelagens de Carga nas Análises Estática e Dinâmica	23
2.2. Método e Critérios Estabelecidos para Estudos de Estabilidade de Tensão no Sistema Interligado Brasileiro [2].	29
2.2.1. Estabelecimento do Método para Estudos de Estabilidade de Tensão.	29
3. Fluxo de Potência e Fluxo de Potência Continuado	33
3.1. Fluxo de Potência [3] [4]	33
3.1.1. Introdução	33
3.1.2. Modelagem de Linhas e Transformadores	34
3.1.3. O problema dos Fluxos de Potência	40
3.1.4. Expressões Gerais dos Fluxos	43
3.1.5. Formulação Matricial	43
3.1.6. Método de Newton-Raphson para Solução dos Fluxos de Potência	46
3.1.7. Sumário da Seção	50
3.2. Fluxo de Potência Continuado	51
3.1.1. Princípio Básico [1]	51
3.1.2. Formulação Matemática	52
3.1.3. Passo Preditor	53
3.1.4. Passo Corretor	55
3.1.5. Seleção do Parâmetro de Continuação	56

4. O Fenômeno da Estabilidade de Tensão [6]	57
4.1. Introdução	57
4.2. Caracterização do Fenômeno de Estabilidade de Tensão	57
4.3. Impedância de Carga no Máximo Carregamento	65
4.4. Limite de Estabilidade de Tensão	67
4.5. Capacitor em Paralelo na Barra de Carga	70
4.6. Sumário do Capítulo	75
5. Índices de Avaliação da Estabilidade de Tensão	77
5.1. Introdução	77
5.2. Método da Matriz D'	77
5.2.1. Módulo do Determinante da Matriz D'	79
5.2.2. Sinal do Determinante da Matriz D'	83
5.2.3. Interpretação dos Índices	85
5.2.4. Índices de Avaliação de Estabilidade de Tensão em Barras Controladoras e de Tensão Controlada	87
5.3. Vetor Tangente [9]	96
5.4. Índice L [12]	98
5.4.1. Índice L para Sistemas Multi-nó	101
5.5. Análise de Autovalores e Autovetores	103
6. Procedimentos e Resultados	107
6.1. Sistema de 6 Barras	108
6.2. Sistema de 14 Barras	115
6.3. Sistema de 30 Barras	122
6.4. Sistema de 39 Barras	127
6.5. Sistema de 57 Barras	134
6.6. Sistema de 118 Barras	143

6.7. Testes com Limites de Geração no Sistema de 118 Barras	150
6.8. Resumo dos Testes	153
7. Conclusões e Trabalhos Futuros	158
7.1. Conclusões	158
7.2. Trabalhos Futuros	160
8. Referências Bibliográficas	162
A Dados de Circuitos, Barras e Fluxos de Potência dos Sistemas Testados	164
A1 Sistema de 30 Barras	164
A2 Sistema de 39 Barras	167
A3 Sistema de 57 Barras	171
A4 Sistema de 118 Barras	176

Lista de Figuras

Figura 3.1 Modelo Equivalente π de Linha de Transmissão	34
Figura 3.2: Representação Geral dos Transformadores	35
Figura 3.3: Circuito Equivalente π de Transformador em Fase	37
Figura 3.4: Defasador Puro ($t=e^{j\phi}$)	39
Figura 3.5: Convenção do Sentido de Fluxo de Potência	42
Figura 3.6: Sequência de Passos FPC	52
Figura 4.1: Circuito de Duas Barras	58
Figura 4.2: Curvas no R3 de P1 como Função m	60
Figura 4.3: Curvas de V1 Constante no Plano $\theta_1 P_1$	61
Figura 4.4: P1 e Q1 Constantes no Plano $\theta_1 V_1$ para Diferentes Valores de P1 e Q1	62
Figura 4.5: Soluções de Tensão na Carga com o Mesmo Fator de Potência	64
Figura 4.6: Curva para ϕ Constante no Plano S1V1	65
Figura 4.7: Circuito com as Impedâncias da Transmissão e da Carga	66
Figura 4.8: LET sobre as Curvas ϕ Constante no Plano SV	70
Figura 4.9: Sistema de Duas Barras com Capacitor na Barra Terminal	70
Figura 4.10: Aumento e Diminuição da Tensão Devido à Introdução de um Capacitor	73
Figura 4.11: ϕ e Z_c Constantes no Plano SV com e sem Capacitor	74
Figura 4.12: Ângulo de Tensão Barra 1 (graus)	75
Figura 5.1: Localização dos Vetores Gradientes de P_i e Q_i no Plano θV	85
Figura 5.2: Índices de Influência Positivo e Negativo	87
Figura 5.3: Barra de Tensão Controlada Operando nas Regiões Superior e Inferior da Curva para ϕ Constante no Plano SV	88
Figura 5.4: Variação da Tensão no Tempo em Barras de Tensão Controlada	89
Figura 5.5: Matriz Jacobiano Modificada para Análise de Barras de Tensão Controlada	90
Figura 5.6: Matriz Jacobiano Modificada para Análise de Barras de Controle de Tensão Remoto	91

Figura 5.7: Matriz Jacobiano Modificada para Análise de Barras θV	92
Figura 5.8: Matriz Jacobiano Modificada para Análise de Barras de Tensão Controlada por Controle Coordenado de Tensão	94
Figura 5.9: Matriz Jacobiano Modificada para Análise de Barras de Controle Pertencentes ao Controle Coordenado de Tensão	95
Figura 5.10: Sistema de um Gerador e uma Carga Simples.	98
Figura 6.1: FPC de Todos os Sistemas Testados	107
Figura 6.2: Diagrama Unifilar do Sistema de 6 Barras	109
Figura 6.3: FPC Aplicado ao Sistema de 6 Barras	111
Figura 6.4: Diagrama Unifilar do Sistema de 14 Barras	116
Figura 6.5: FPC Aplicado ao Sistema de 14 Barras	119
Figura 6.6: Diagrama unifilar do Sistema de 30 Barras	123
Figura 6.7: FPC Aplicado ao Sistema de 30 Barras	124
Figura 6.8: Diagrama Unifilar do Sistema de 39 Barras	128
Figura 6.9: FPC Aplicado ao Sistema de 39 Barras	129
Figura 6.10: Diagrama Unifilar do Sistema de 57 Barras	135
Figura 6.11: FPC Aplicado ao Sistema de 57 Barras	136
Figura 6.12: Diagrama Unifilar do Sistema de 118 Barras	144
Figura 6.13: FPC Aplicado ao Sistema de 118 Barras	145

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Tensões entre Fases Admissíveis a 60 Hz.	28
Tabela 6.1: Dados de Rede do Sistema de 6 Barras	109
Tabela 6.2: Caso-Base do Sistema de 6 Barras	110
Tabela 6.3: Fluxos de Potência nos Ramos da Rede	110
Tabela 6.4: IETs do Caso-Base do Sistema de 6 Barras	111
Tabela 6.5: IETs do Sistema de 6 Barras a 60% do Carregamento Máximo	112
Tabela 6.6: IETs do Sistema de 6 Barras a 80% do Carregamento Máximo	112
Tabela 6.7: IETs do Sistema de 6 Barras a 90% do Carregamento Máximo	113
Tabela 6.8: IETs do Sistema de 6 Barras a 95% do Carregamento Máximo	113
Tabela 6.9: IETs do Sistema de 6 Barras a 97% do Carregamento Máximo	113
Tabela 6.10: IETs do Sistema de 6 Barras a 98% do Carregamento Máximo	113
Tabela 6.11: IETs do Sistema de 6 Barras a 100% do Carregamento Máximo	114
Tabela 6.12: Dados de Rede do Sistema 14 Barras	117
Tabela 6.13: Caso-Base do Sistema de 14 Barras	117
Tabela 6.14: Fluxos de Potência nos Ramos da Rede	118
Tabela 6.15: IETs do Caso-Base do Sistema de 14 Barras	119
Tabela 6.16: IETs do Sistema de 14 Barras a 60% do Carregamento Máximo	120
Tabela 6.17: IETs do Sistema de 14 Barras a 80% do Carregamento Máximo	120
Tabela 6.18: IETs do Sistema de 14 Barras a 90% do Carregamento Máximo	121
Tabela 6.19: IETs do Sistema de 14 Barras a 95% do Carregamento Máximo	121

Tabela 6.20: IETs do Sistema de 14 Barras a 97% do Carregamento Máximo	121
Tabela 6.21: IETs do Sistema de 14 Barras a 98% do Carregamento Máximo	121
Tabela 6.22: IETs do Sistema de 14 Barras a 100% do Carregamento Máximo	122
Tabela 6.23: IETs do Caso-Base do Sistema de 30 Barras	124
Tabela 6.24: IETs do Sistema de 30 Barras a 60% do Carregamento Máximo	125
Tabela 6.25: IETs do Sistema de 30 Barras a 80% do Carregamento Máximo	125
Tabela 6.26: IETs do Sistema de 30 Barras a 90% do Carregamento Máximo	125
Tabela 6.27: IETs do Sistema de 30 Barras a 95% do Carregamento Máximo	125
Tabela 6.28: IETs do Sistema de 30 Barras a 97% do Carregamento Máximo	126
Tabela 6.29: IETs do Sistema de 30 Barras a 98% do Carregamento Máximo	126
Tabela 6.30: IETs do Sistema de 30 Barras a 100% do Carregamento Máximo	126
Tabela 6.31: IETs do Caso-Base do Sistema de 39 Barras	129
Tabela 6.32: IETs do Sistema de 39 Barras a 60% do Carregamento Máximo	130
Tabela 6.33: IETs do Sistema de 39 Barras a 80% do Carregamento Máximo	130
Tabela 6.34: IETs do Sistema de 39 Barras a 90% do Carregamento Máximo	131
Tabela 6.35: IETs do Sistema de 39 Barras a 95% do Carregamento Máximo	131
Tabela 6.36: IETs do Sistema de 39 Barras a 97% do Carregamento Máximo	132
Tabela 6.37: IETs do Sistema de 39 Barras a 98% do Carregamento Máximo	132
Tabela 6.38: IETs do Sistema de 39 Barras a 99% do Carregamento Máximo	133

Tabela 6.39: IETs do Sistema de 39 Barras a 100% do Carregamento Máximo	133
Tabela 6.40: IETs do Caso-Base do Sistema de 57 Barras	136
Tabela 6.41: IETs do Sistema de 57 Barras a 60 % do Carregamento Máximo	137
Tabela 6.42: IETs do Sistema de 57 Barras a 80 % do Carregamento Máximo	137
Tabela 6.43: IETs do Sistema de 57 Barras a 90 % do Carregamento Máximo	138
Tabela 6.44: IETs do Sistema de 57 Barras a 95 % do Carregamento Máximo	138
Tabela 6.45: IETs do Sistema de 57 Barras a 97 % do Carregamento Máximo	139
Tabela 6.46: IETs do Sistema de 57 Barras a 98 % do Carregamento Máximo	139
Tabela 6.47: IETs do Sistema de 57 Barras a 99% do Carregamento Máximo	140
Tabela 6.48: IETs do Sistema de 57 Barras a 100% do Carregamento Máximo	140
Tabela 6.49: IETs do Caso-Base do Sistema de 118 Barras	145
Tabela 6.50: IETs do Sistema de 118 Barras a 60% do Carregamento Máximo	146
Tabela 6.51: IETs do Sistema de 118 Barras a 80% do Carregamento Máximo	146
Tabela 6.52: IETs do Sistema de 118 Barras a 90% do Carregamento Máximo	147
Tabela 6.53: IETs do Sistema de 118 Barras a 95% do Carregamento Máximo	147
Tabela 6.54: IETs do Sistema de 118 Barras a 97% do Carregamento Máximo	148
Tabela 6.55: IETs do Sistema de 118 Barras a 98% do Carregamento Máximo	148
Tabela 6.56: IETs do Sistema de 118 Barras a 99% do Carregamento Máximo	149
Tabela 6.57: IETs do Sistema de 118 Barras a 100% do Carregamento Máximo	149

Tabela 6.58: IETs com Limites de Geração no Caso-Base do Sistema de 118 Barras	151
Tabela 6.59: IETs com Limites de Geração a 60% do Máximo Carregamento do Sistema de 118 Barras	151
Tabela 6.60: IETs com Limites de Geração a 65% do Máximo Carregamento do Sistema de 118 Barras	152
Tabela 6.61: IETs com Limites de Geração a 66% do Máximo Carregamento do Sistema de 118 Barras	152
Tabela 7.1: Comparação Métodos de Avaliação de Estabilidade de Tensão	159
Tabela A1: Dados de Rede do Sistema de 30 barras	164
Tabela A2: Caso-Base do Sistema de 30 Barras	165
Tabela A3: Fluxos de Potência nos Ramos da Rede	166
Tabela A4: Dados de Rede do Sistema de 39 Barras	167
Tabela A5: Caso-Base do Sistema de 39 Barras	168
Tabela A6: Fluxos de Potência nos Ramos da Rede	169
Tabela A7: Dados de Rede do Sistema de 57 Barras	171
Tabela A8: Caso-Base do Sistema de 57 Barras	173
Tabela A9: Fluxos de Potência nos Ramos da Rede	174
Tabela A10: Dados de Rede do Sistema de 118 Barras	176
Tabela A11: Caso-Base do Sistema de 118 Barras	181
Tabela A12: Fluxos de Potência nos Ramos da Rede	184

Lista de Abreviaturas e Siglas

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

CC: Corrente Contínua

ERAC: Esquema Regional de Alívio de Carga

FACTS: Flexible AC Transmission System

FPC: Fluxo de Potência Continuado

I: Corrente

II: Índice de Influência

IL: Índice L

LEEA: Limite de Estabilidade Estática Angular

LET: Limite de Estabilidad de Tensao

MST: Margem de Segurança de Tensão

ONS: Operador Nacional do Sistema

P: Potência Ativa

PMC: Ponto de Máximo Carregamento

Q: Potência Reativa

SEP: Sistema Elétrico de Potência

SIN: Sistema Interligado Nacional

V: Módulo da Tensão

VT: Vetor Tangente

Y: Admitância

Z: Impedância

Zc: Impedância de Carga no Máximo Carregamento

Zt: Impedância na Linha de Transmissao

θ : Referência Angular

λ : Fator de Carregamento

ϕ : Fator de Potência