



Laura Cristina Paniagua Palacio

**Utilização de Circuitos Elétricos
Equivalentes na Avaliação das Condições
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 de 2014



Laura Cristina Paniagua Palacio

**Utilização de Circuitos Elétricos Equivalentes na
Avaliação das Condições 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. Glauco Nery Taranto

COPPE / UFRJ

Prof. Jorgeson Oliveira Rodrigues dos Santos

UFSJ

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 25 julho de 2014

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

Laura Cristina Paniagua Palacio

Graduou-se em Engenharia Elétrica na Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín em 2010. Sua área de pesquisa envolve sistemas elétricos de potência na área de estabilidade de tensão.

Ficha Catalográfica

Palacio, Laura Cristina Paniagua

Utilização de circuitos elétricos equivalentes na avaliação das condições de estabilidade de tensão / Laura Cristina Paniagua Palacio ; orientador: Ricardo Bernardo Prada.– 2014.
129 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2014.
Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Estabilidade de tensão. 3. Circuitos equivalentes. 4. Redução de rede. 5. Teorema de Thévenin. 6. Colapso de tensão. I. Prada, Ricardo Bernardo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Para minha família, 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.

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

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.

Resumo

Palacio, Laura Cristina Paniagua; Prada, Ricardo Bernardo. **Utilização de Circuitos Elétricos Equivalentes na Avaliação das Condições de Estabilidade de Tensão**. Rio de Janeiro, 2014. 129p. 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 analisados diferentes métodos que permitem transformar sistemas de grande porte em circuitos simples: o circuito equivalente entre geradores e cargas, baseado no cálculo de correntes de curto-circuito, na técnica de redução de rede pela eliminação de barras intermediárias e no equivalente de Thévenin. É analisada a utilização destes equivalentes na avaliação das condições de estabilidade de tensão com sistemas-testes de 3 e 4 barras. Através de diferentes testes verificou-se que o circuito equivalente entre geradores e cargas e a técnica de redução de rede não podem ser usados para o cálculo de índices de avaliação das condições de estabilidade de tensão, enquanto que, usando circuito equivalente de Thévenin encontrou-se um método que funciona corretamente para barra de carga terminal, barra não-terminal e barra de tensão controlada por gerador.

Palavras-chave

Estabilidade de tensão; circuitos equivalentes; redução de rede; teorema de Thévenin; colapso de tensão.

Abstract

Palacio, Laura Cristina Paniagua; Prada, Ricardo Bernardo (Advisor). **Using Electric Circuit Equivalents for Voltage Stability Assessment**. Rio de Janeiro, 2014. 129p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The emergence of voltage stability phenomenon in the operation of power systems has motivated hundreds of researchers to develop methods to detect the proximity to voltage instability, with computational efficiency and to take all necessary and appropriate measures to ensure reliable and safe operation. In this work, different methods that allow transforming large systems into simple circuits were analyzed, such as the equivalent circuit between generators and loads, based on the calculation of short-circuit currents; the network reduction technique for eliminating intermediate buses; and the Thévenin equivalent. The application of these equivalents on voltage stability assessment of 3 and 4 bus testing systems were extensively tested. At the end, it was verified that the equivalent circuit between the generator and load, and the network reduction technique, cannot be used for calculating the voltage stability conditions evaluation indexes. However, using Thévenin equivalent circuit, it was found a proper method, which works correctly for terminal buses, transit buses and voltage-controlled buses.

Keywords

Voltage stability; equivalent circuits; network reduction; Thévenin theorem; voltage collapse.

Sumário

1 Introdução	18
1.1. Considerações Gerais	18
1.2. Objetivos	19
1.3. Estrutura da Dissertação	19
2 Caracterização do Fenômeno da Estabilidade de Tensão	22
2.1. Introdução	22
2.2. Equações do Fluxo de Potência em Barra de Carga	22
2.3. Existência da Máxima Potência	24
2.4. Curvas P, Q e ϕ Constante	26
2.4.1. Curva P Constante	26
2.4.2. Curva Q Constante	27
2.4.3. Curva ϕ Constante	28
2.5. Impedância da Carga no Máximo Carregamento	30
2.6. O Limite de Estabilidade de Tensão (LET)	32
3 Avaliação das Condições de Estabilidade de Tensão [2] [3]	34
3.1. Introdução	34
3.2. Ferramenta Analítica	34
3.3. Módulo do Determinante da Matriz [D']	36
3.3.1. Sistema de 2 Barras	36
3.3.2. Sistema Multi – Nó	37
3.4. Sinal do Determinante da Matriz [D']	39
3.5. Margem de Potência	41
3.6. Índice de Influência	43
3.7. Exemplo de Aplicação	44
3.7.1. Análise e Resultados das Barras Tipo PQ	45
3.7.2. Análise e Resultados das Barras Tipo PV	46
3.7.3. Análise e Resultados da Barra <i>Slack</i>	47

4 Impedância de Transferência entre Geradores e Carga	50
4.1. Circuito Equivalente entre Geradores e Cargas	50
4.2. Aplicação do Circuito Equivalente entre Geradores e Cargas para Avaliação da Estabilidade de Tensão	54
4.2.1. Caso-Base	56
4.2.2. Teste 1	56
4.2.3. Teste 2	58
4.3. Conclusões	61
5 Aplicação de Equivalentes na Avaliação da Estabilidade de Tensão para Todos os Tipos de Barras	62
5.1. Cálculo de Índices de Estabilidade de Tensão usando os Modelos Impedância e Potência Constante	62
5.1.1. Sistema–Teste de 3 Barras: Admitância Constante	62
5.1.2. Sistema–Teste de 3 Barras: Potência Constante	63
5.1.3. Comparação de Resultados	64
5.2. Redução da Rede	65
5.3. A Redução de Rede na Avaliação da Estabilidade de Tensão	67
5.3.1. Aplicação 1	68
5.3.2. Aplicação 2	73
5.4. Conclusões	78
6 Circuito Equivalente de Thévenin em Estabilidade de Tensão	80
6.1. Métodos para o Cálculo do Equivalente de Thévenin	81
6.1.1. Métodos Usando o Ponto de Operação em Estudo	81
6.1.2. Métodos Usando Medições dos Fasores de Tensão e Corrente	83
6.2. Validação dos Métodos de Estimação dos Parâmetros do Equivalente de Thévenin	90
6.3. Circuito Equivalente de Thévenin na Avaliação da Estabilidade de Tensão	92
6.3.1. Avaliação da Barra Terminal do Sistema–Teste de 3 Barras	95
6.3.2. Avaliação de Barra Não-Terminal do Sistema-Teste 3 Barras	100

6.3.3. Avaliação de Barras de Tensão Controlada	103
6.4. Conclusões	111
7 Conclusões e Trabalhos Futuros	113
7.1. Conclusões	113
7.2. Trabalhos Futuros	114
8 Referências Bibliográficas	116
A. Procedimento de Obtenção dos Circuitos Equivalentes de Thévenin	
Sistema–Teste de 3 Barras	118
A.1 Método 1	118
A.2 Método 2	118
A.3 Método 3	119
A.4 Método 4	120
A.5 Método 5	122
B. Procedimento de Obtenção dos Circuitos Equivalentes de Thévenin	
Sistema – Barra de Geração	126
B.1. Modelagem Considerando a Barra de Geração como Barra PQ	126
B.2 Modelagem Considerando a Barra de Geração como Barra PV	128

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Sistema de 2 Barras	23
Figura 2.2 – Curvas V_1 Constante no Plano $\theta_1 P_{D1}$	24
Figura 2.3 – Curvas P_{D1} Constante no Plano $\theta_1 V_1$	26
Figura 2.4 – Curvas Q_{D1} Constante no Plano $\theta_1 V_1$	27
Figura 2.5 – Curvas ϕ Constante no Plano $\theta_1 V_1$	28
Figura 2.6 – Curvas ϕ Constante no Plano $S_{D1} V_1$	29
Figura 2.7 – Circuito de 2 Barras com Impedância como Carga	30
Figura 3.1 – Localização Vetores Gradientes de P_i e Q_i no Plano $V\theta$	40
Figura 3.2 – Sinal da Margem na Curva ϕ Constante no Plano SV	42
Figura 3.3 – Sistema-Teste de 5 Barras	44
Figura 4.1 - Representação do Sistema	50
Figura 4.2 - Circuito Equivalente entre Geradores e Carga	53
Figura 4.3 - Circuito Equivalente entre Geradores e Carga com Única Linha	53
Figura 4.4 - Sistema-Teste de 3 Barras	54
Figura 4.5 - Sistemas Modificados Teste 1–Linha 2 Modificada	57
Figura 4.6 - Sistemas Modificados Teste 1 – Linha 1 Modificada	58
Figura 4.7 - Sistemas Modificados-Teste 2	60
Figura 5.1 – Sistema-Teste de 3 Barras	62
Figura 5.2 – Sistema-Teste de 3 Barras	68
Figura 5.3 – Procedimento para Determinação do Sistema Equivalente entre Gerador da Barra 1 e Carga da Barra 3	70
Figura 5.4 – Sistema-Teste de 4 Barras	74
Figura 5.5 – Equivalente entre Gerador da Barra 1 e a Barra n do Sistema	75
Figura 5.6 – Equivalente entre Gerador da Barra 2 e a Barra n do Sistema	77
Figura 6.1 – Circuito Equivalente de Thévenin	80
Figura 6.2 – Circuito Equivalente de Thévenin – Barra k Monitorada	83

Figura 6.3 – Diagrama Fasorial do Circuito Equivalente de Thévenin	86
Figura 6.4 – Representação da Carga Equivalente em Barras Intermediárias	93
Figura 6.5 – Margem de Estabilidade de Tensão - Barra de Carga Terminal	99
Figura 6.7 – Margem M_{Zl} de Estabilidade de Tensão - Barra de Carga Não Terminal	102
Figura 6.8 - Representação Equivalente Barra de Tensão Controlada	103
Figura 6.9 – Impedância de Carga e Impedâncias de Thévenin Estimadas - Modelagem 1 – Barra de Geração 2	106
Figura 6.10 – Margens de Estabilidade de Tensão - Modelagem 1 – Barra de Geração 2	106
Figura 6.11 – Impedância de Carga e Impedâncias de Thévenin Estimadas - Modelagem 2 – Barra de Geração 2	107
Figura 6.12 – Margens de Estabilidade de Tensão - Modelagem 2 – Barra de Geração 2	108
Figura 6.13 – Tensão na Barra de Geração 2	110
Figura A.1 Sistema–Teste 3 Barras Ponto de Operação Linearizado	119
Figura A.2 Impedância de Thévenin Estimada Carga Pesada Barra de Carga 3	125
Figura A.3 Tensão de Thévenin Estimada Carga Pesada Barra de Carga 3	125
Figura A.4 Ângulo da Tensão Thévenin Estimado Carga Pesada Barra de Carga 3	125

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Dados de Barra do Sistema-Teste de 5 Barras	44
Tabela 3.2 - Dados de Linha do Sistema-Teste de 5 Barras	45
Tabela 3.3 - Resultado do Fluxo de Potência do Sistema-Teste de 5 Barras	45
Tabela 3.4 - Índices de Avaliação de Estabilidade de Tensão	48
Tabela 4.1 - Dados de Barra dos Sistemas-Teste de 3 Barras	55
Tabela 4.2 - Dados de Linha dos Sistemas-Teste de 3 Barras	55
Tabela 4.3 - Resultados do Fluxo de Potência dos Sistemas-Teste de 3 Barras	55
Tabela 4.4 - Índices de Avaliação de Estabilidade de Tensão	56
Tabela 4.5 - Índices de Avaliação de Estabilidade de Tensão – Linha 2 Modificada	57
Tabela 4.6 - Índices de Avaliação de Estabilidade de Tensão – Linha 1 Modificada	58
Tabela 4.7 - Dados de Barra do Sistema-Teste 2	59
Tabela 4.8 - Dados de Linha do Sistema-Teste 2	59
Tabela 4.9 - Resultado do Fluxo de Potência-Teste 2	59
Tabela 4.10 - Índices de Avaliação de Estabilidade de Tensão-Teste 2	60
Tabela 5.4 - Dados de Barra do Sistema-Teste de 3 Barras: Modelo Potência Constante	64
Tabela 5.5 - Dados de Linha do Sistema-Teste de 3 Barras: Modelo Potência Constante	64
Tabela 5.6 - Resultado do Fluxo de Potência do Sistema-Teste de 3 Barras: Modelo Potência Constante	64
Tabela 5.7 - Índices de Avaliação de Estabilidade de Tensão do Sistema Teste de 3 Barras	64
Tabela 5.8 - Dados de Barra do Sistema - Teste de 3 Barras - Carga Leve	69
Tabela 5.9 - Dados de Linha do Sistema-Teste de 3 Barras - Carga Leve	69

Tabela 5.13 - Índices de Avaliação de Estabilidade de Tensão do Sistema-Teste de 3 Barras	71
Tabela 5.14 - Dados de Barra do Sistema-Teste de 3 Barras Carga Pesada	71
Tabela 5.15 - Resultado do Fluxo de Potência do Sistema-Teste de 3 Barras Pesada	72
Tabela 5.16 - Dados de Barra do Sistema Equivalente–Carga Pesada	72
Tabela 5.17 - Dados de Linha do Sistema Equivalente–Carga Pesada	72
Tabela 5.18 - Índices de Avaliação de Estabilidade de Tensão do Sistema-Teste de 3 Barras	72
Tabela 5.19 - Dados de Barra do Sistema–Teste de 4 Barras	74
Tabela 5.20 - Dados de Linha do Sistema–Teste de 4 Barras	74
Tabela 5.21 - Resultado do Fluxo de Potência do Sistema–Teste de 4 Barras	74
Tabela 5.22 - Dados de Barra do Sistema Equivalente 1	75
Tabela 5.23 - Índices de Avaliação de Estabilidade de Tensão – Equivalente 1 e Sistema Completo	76
Tabela 5.25 - Índices de Avaliação de Estabilidade de Tensão – Equivalente 2	77
Tabela 6.1 –Dados do Circuito Equivalente de Thévenin-Carga Leve	90
Tabela 6.2 –Dados do Circuito Equivalente de Thévenin-Carga Pesada	91
Tabela 6.4 – Validação do Circuito Equivalente de Thévenin - Carga Pesada	91
Tabela 6.5 - Avaliação de Estabilidade de Tensão – Barra Terminal – Carga Leve	96
Tabela 6.6 - Avaliação de Estabilidade de Tensão – Barra Terminal – Carga Pesada	96
Tabela 6.7 - Dados de Barra do Sistema-Teste 3 de Barras	97
Tabela 6.8 - Dados de Linha do Sistema-Teste 3 de Barras	97
Tabela 6.9 – Casos Estudados no Sistema-Teste 3 de Barras	98
Tabela 6.10 - Dados de Barra do Sistema-Teste de 4 Barras	104
Tabela 6.11 - Dados de Linha do Sistema-Teste de 4 Barras	104
Tabela 6.12 – Potência Aparente vs. Margem – Barra de Geração 2	109

Tabela A.1 – Dados do Circuito Equivalente de Thévenin Usando o Método 1 Sistema–Teste de 3 Barras	118
Tabela A.2 – Dados do Circuito Equivalente de Thévenin usando o Método 2 Sistema–Teste de 3 Barras	119
Tabela A.3 – Dados do Circuito Equivalente de Thévenin usando o Método 3 Sistema–Teste de 3 Barras	120
Tabela A.4 – Dados do Circuito Equivalente de Thévenin usando o Método 4 Sistema–Teste de 3 Barras	122
Tabela A.5 – Dados do Circuito Equivalente de Thévenin usando o Método 5 Sistema–Teste de 3 Barras	122
Tabela B.1 - Dados de Barra do Sistema–Teste de 4 Barras	126
Tabela B.2 – Resultado do Fluxo de Potência - Sistema–Teste de 4 Barras	126
Tabela B.3 – Dados do Circuito Equivalente de Thévenin usando o Método 5 – Barra de Geração como PQ -Sistema-Teste de 4 Barras	128
Tabela B.4 – Dados do Circuito Equivalente de Thévenin usando o Método 5 – Barra de Geração PV - Sistema-Teste de 4 Barras	129

Lista de Abreviaturas e Siglas

LET	Limite de Estabilidade de Tensão
PMU	<i>Phasor Measurement Unit</i>
EAT	Extra Alta Tensão
LTC	Transformador com Variação Automática de <i>Taps</i> em Carga
Z_t	Impedância da Linha de Transmissão
α_t	Ângulo da Impedância da Linha de Transmissão
Z_c	Impedância da Carga
φ_c	Ângulo do Fator de Potência na Carga
P	Potência Ativa
Q	Potência Reativa
S	Potência Aparente
θ	Referência Angular
V	Módulo da Tensão
ΔP	Variação Incremental de Potência Ativa
ΔQ	Variação Incremental de Potência Reativa
$\Delta \theta$	Variação Incremental do Ângulo da Tensão
ΔV	Variação Incremental do Módulo da Tensão
[J]	Matriz Jacobiana
[A]	Submatriz da Matriz Jacobiana Particionada
[B]	Submatriz da Matriz Jacobiana Particionada
[C]	Submatriz da Matriz Jacobiana Particionada
[D]	Submatriz da Matriz Jacobiana Particionada
[D']	Matriz Obtida de uma Redução da Matriz Jacobiana Particionada
S_i	Potência Aparente Injetada na Barra i no Ponto de Operação em Análise.
S_m	Estimativa da Máxima Potência Aparente que pode ser Injetada na Barra i no Ponto de Operação em Análise para um Sistema Multi-nó

∇P	Gradiente do Fluxo de Potência Ativa
∇Q	Gradiente do Fluxo de Potência Reativa
M_S	Margem de Potência
M_Z	Margem de Impedância
M_{S0}	Margem de Potência no Caso-Base
M_{S1}	Margem de Potência Após o Evento em Análise
β	Ângulo entre os Gradientes dos Fluxos de Potência Ativa e Reativa
II	Índice de Influência
Z_k	Impedância Instantânea da Barra k
Z_N	Matriz de Impedâncias do Sistema
I_k	Corrente na Barra k
V_j^0	Tensão na Barra j com Barra k em Circuito Aberto
Z_{jk}	Impedância de Transferência entre as Barras j e k
Z_{kk}	Impedância Mútua vista desde a Barra k
I	Vetor de Correntes Injetadas nas Barras de Geração e nas Barras de Carga
I_p	Vetor de Correntes Injetadas nas Barras de Passagem
\dot{E}	Vetor das Tensões Nodais nas Barras de Geração e nas Barras de Carga
\dot{E}_p	Vetor das Tensões Nodais nas Barras de Passagem
Y_1	Submatriz da Matriz de Admitância de Barra Particionada
Y_2	Submatriz da Matriz de Admitância de Barra Particionada
Y_3	Submatriz da Matriz de Admitância de Barra Particionada
Y_4	Submatriz da Matriz de Admitância de Barra Particionada
E_{Thev}	Tensão do Circuito Equivalente de Thévenin
Z_{Thev}	Impedância do Equivalente de Thévenin
R_{Thev}	Resistencia do Equivalente de Thévenin
X_{Thev}	Reatância do Equivalente de Thévenin