



Vanessa Paola González Atencia

**Identificação do Ramo de Transmissão Carregado sob o
Ponto de Vista de Estabilidade 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: Prof. Ricardo Bernardo Prada

Rio de Janeiro
Julho de 2014



Vanessa Paola González Atencia

**Identificação do Ramo de Transmissão Carregado sob o
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. Bernardo Henrique Todt Seelig

Instituto Nacional da Propriedade Industrial - INPI

Prof. Edgardo Guillermo Camacho Palomino

Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF

Prof. José Eugênio Legal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico

Rio de Janeiro, 10 de Julho de 2014

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

Vanessa Paola González Atencia

Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade da Costa – CUC (Barranquilla, Colômbia) em 2009.

Ficha Catalográfica

Atencia, Vanessa Paola González.

Identificação do Ramo de Transmissão Carregado sob o Ponto de Vista de Estabilidade de Tensão / Vanessa Paola González Atencia; orientador: Ricardo Bernardo Prada. – 2014.

v.,149 f.; 30 cm

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

Incluí referências bibliográficas.

1. Engenharia elétrica – Dissertação. 2. Estabilidade de Tensão. 3. Barra de Tensão Controlada. 4. Sub-rede de Transmissão. 5. Caminhos de Transmissão. I. Prada, Ricardo Bernardo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

Para minha irmã Aura e meus pais, René e Luz Mila
pelo amor, apoio e confiança.

Agradecimentos

A Deus por mostrar-me o caminho a seguir, por demonstrar-me mais uma vez que todas as coisas são possível se temos Fé.

A minha irmã Aura González, por me cuidar e me guiar nesta vida, por seus bons conselhos e por estar sempre perto de mim.

A meus pais pelo amor, apoio, compreensão e confiança em todo momento.

A meus irmãos pelo apoio constante, e seus inestimáveis conselhos.

A meu namorado Junior, pelo apoio nos momentos de fraqueza, ajuda e parceria durante a realização deste trabalho.

Agradeço especialmente a meu amigo John Noya, pelo constante apoio, a escuta e sua amizade.

Especialmente, agradeço ao meu orientador Ricardo Bernardo Prada pelo permanente apoio nas diferentes etapas de desenvolvimento nesta dissertação, por sua atenção e paciência.

À Capes e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos.

A todos os amigos do curso de Pós – Graduação em Engenharia Elétrica, muito especialmente a Jennifer Mendez, Mauricio Nava, Oscar Cuaresma, Laura Paniagua.

Resumo

Atencia, Vanessa Paola González. **Identificação do Ramo de Transmissão Carregado sob o Ponto de Vista de Estabilidade de Tensão**. Rio de Janeiro, 2014. 149p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O fenômeno de estabilidade de tensão é um problema associado ao fluxo de potência ativa e reativa nas linhas de transmissão. A manifestação mais conhecida do fenômeno é a existência de uma máxima carga que pode ser alimentada pela rede, mas, atualmente também se sabe da existência de uma máxima injeção de potência ativa e reativa na rede por geradores e compensadores. É apresentado um método para avaliar as condições de carregamento da rede e detectar barras críticas. Identifica-se a sub-rede utilizada para transmitir potência ativa de ou para a barra crítica, determinam-se os caminhos de transmissão que a compõem e identifica-se o ramo crítico do caminho mais carregado. É o ramo a ter seu fluxo de potência diminuído. Nesta dissertação foi proposta a determinação da sub-rede quando a barra em análise é de tensão controlada por compensador. Além disso, foram propostas modificações no método existente: injeção de potência ao invés de admitância equivalente no isolamento da sub-rede e dos caminhos de transmissão, e índices de estabilidade ao invés de fórmulas analíticas na determinação do caminho mais carregado e do ramo crítico.

Palavras-Chave

Estabilidade de tensão, segurança de tensão, colapso de tensão, barra de tensão controlada, sub-rede de transmissão, caminhos de transmissão.

Abstract

Atencia, Vanessa Paola González. **Identification of the Loaded Transmission Branch Considering the Voltage Stability Point of View.** Rio de Janeiro, 2014. 149p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The voltage stability phenomenon is a problem related with the flow of active and reactive power in transmission lines. The main characteristic of this phenomenon is the existence of a maximum load that can be supplied by the network, but actually it is also known the existence of a maximum active and reactive power injection at the network supplied by generators and compensators. In this dissertation, a method is presented to evaluate the conditions of the network loadability and the critical buses identification. The network used to transmit the active power from or to a critical bus and its transmissions lines are identified, and identify the critical branch of the most loaded transmission path. This critical branch will have its power flow reduced. In this dissertation, is proposed the determination of the sub-transmission network when the bus under analysis has its voltage controlled by compensator. Furthermore, were proposed modifications to the current method: power injection rather than equivalent admittance in isolation of the sub-transmission network and the transmission paths and also, using voltage stability indexes rather than using analytical formulas to determine the most loaded path and critical branch.

Keywords

Voltage stability, voltage security, voltage collapse, voltage-controlled bus, sub-transmission network, transmission paths.

Sumário

1 Introdução	18
1.1. Considerações Gerais	18
1.2. Objetivos	20
1.3. Estrutura do Trabalho	20
2 Caracterização do Fenômeno de Estabilidade de Tensão e Índices de Avaliação das Condições de Estabilidade de Tensão	22
2.1. Introdução	22
2.2. O Problema de Estabilidade de Tensão	22
2.3. Equações de Fluxo de Potência Ativa e Reativa Injetada na Barra de Carga	23
2.4. Curvas P, Q e ϕ Constantes.	25
2.4.1. ϕ Constante	28
2.5. O Limite de Estabilidade de Tensão (LET)	29
2.6. A Existência da Potência Transmitida “ <i>Maximum Maximorum</i> ”	34
2.7. Índices e Margens para Avaliação	35
2.7.1. Desenvolvimento do Método	35
2.7.2. Módulo do Determinante da Matriz [D']	37
2.7.3. Sinal do Determinante da Matriz [D']	41
2.7.4. Margem de Potência	42
2.8. Conclusões	44
3 Método para Cálculo dos Caminhos de Transmissão e Escolha do Ramo Crítico	45
3.1. Barra Crítica de Carga	45
3.1.1. Determinação da Sub-Rede	45
3.1.2. Determinação dos Caminhos de Transmissão	47
3.1.3. Identificação do Caminho de Transmissão Mais Carregado	50
3.1.4. Identificação do Ramo Crítico	50
3.1.5. Exemplo Numérico	51

3.2. Barra de Geração Crítica	60
3.2.1. Determinação da Sub-Rede	60
3.2.2. Determinação dos Caminhos de Transmissão	61
3.2.3. Identificação do Caminho de Transmissão mais Carregado	63
3.2.4. Identificação do Ramo Crítico	63
3.2.5. Exemplo Numérico	64
3.3. Análises dos Índices de Estabilidade de Tensão	73
3.4. Conclusões	75
 4 Determinação da Sub-Rede, Avaliação do Caminho e do Ramo de Transmissão mais Carregado: Novas Ideias	 76
4.1. Determinação da Sub-Rede	76
4.1.1. Barra Crítica de Tensão Controlada	76
4.1.2. Barra Crítica de Carga	84
4.1.3. Barra Crítica de Geração	89
4.2. Uso dos Índices para Determinação do Caminho mais Carregado	92
4.2.1. Não-Uso de Equivalentes	92
4.2.2. Uso de Injeção de Potência Equivalente	105
4.2.3. Comparação dos Resultados do Capítulo 3 com o Uso de Injeções e sem Reduzir a Duas Barras	125
4.3. Uso dos Índices para Determinação do Ramo Crítico	130
4.3.1. Não-Uso de Equivalentes	130
4.3.2. Uso de Injeção de Potência Equivalente	136
4.4. Conclusões	144
 5 Conclusões e Trabalhos Futuros	 146
5.1. Conclusões	146
5.2. Trabalhos Futuros	147
 6 Referências Bibliográficas	 148

Lista de figuras

Figura 2.1	Sistema Série de Duas Barras	23
Figura 2.2	Potência Ativa Consumida na Carga vs Defasagem Angular	25
Figura 2.3	Potência Ativa e Reativa Consumida na Carga vs Defasagem Angular	26
Figura 2.4	Três Possibilidades de Solução para a Tensão na Carga com Mesmo Fator de Potência	27
Figura 2.5	Tensão na Carga vs Defasagem Angular com ϕ Constante	28
Figura 2.6	Circuito com as Impedâncias da Transmissão e da Carga	29
Figura 2.7	Limite de Estabilidade de Tensão no Plano SV	33
Figura 2.8	Lugar Geométrico da Tensão na Carga para Diferentes Níveis de Potência Ativa e Reativa Constante	34
Figura 2.9.	Regiões na Curva ϕ Constante no Plano SV	35
Figura 2.10	Localização do Vetor Gradiente de P_i e Q_i no Plano θV	42
Figura 2.11	Sinal da Margem na Curva SV	43
Figura 3.1	Parte da Rede no Entorno da Barra i	46
Figura 3.2	Isolamento da Sub-rede	46
Figura 3.3	Caminhos Radiais de Transmissão Isolados do Resto da Sub-rede	48
Figura 3.4	Circuitos Π Equivalente de Transmissão	49
Figura 3.5	Sistema – Teste de 34 Barras Modificado	51
Figura 3.6	Caraterística Tensão x Potência para a Barra 29	52
Figura 3.7	Fluxo de Potência Ativa no Sistema de 34 Barras	54
Figura 3.8	Parte da Rede no Entorno da Barra Crítica de Geração	60
Figura 3.9	Isolamento da Sub-Rede para Barra Crítica de Geração	61
Figura 3.10	Identificação da Sub-Rede do Sistema de 34 Barras	65
Figura 3.11	Sistema de Três Barras com Dois Geradores	73
Figura 4.1	Sistema de Três Barras	76

Figura 4.2	Sistema de Três Barras com Carga na Barra de Tensão Controlada	77
Figura 4.3	Fluxo de Potência Ativa no Sistema de 34 Barras	81
Figura 4.4	Sub-rede Determinada para Barra Crítica de Carga	82
Figura 4.5	Sub-rede Determinada para Barra Crítica de Geração	82
Figura 4.6	Sistema de Três Barras	84
Figura 4.7	Sistema de Duas Barras	84
Figura 4.8	Sistema de Três Barras com Variação de Carga na Barra de Tensão Controlada	87
Figura 4.9	Sistema de Três Barras com Barra Fictícia Adicionada	89
Figura 4.10	Sistema de Duas Barras com a Barra Fictícia Adicionada	90
Figura 4.11	Sub-rede Determinada e Isolada com o Uso de Injeções para a Barra Crítica 29	106
Figura 4.12	Sub-rede Determinada e Isolada com o Uso de Injeções para a Barra Crítica 34	107

Lista de tabelas

Tabela 3.1	Relatório de Segurança de Tensão no Ponto de Operação S34_A06	53
Tabela 3.2	Relatório de Segurança de Tensão no Ponto de Operação S34_A06	55
Tabela 3.3	Análise dos Subcaminhos do Caminho de Transmissão Mais Carregado	57
Tabela 3.4	Índices de Estabilidade de Tensão para o Sistema de 34 Barras	64
Tabela 3.5	Determinação dos Caminhos de Transmissão e Margens de Potência a partir do Gerador 34	66
Tabela 3.6	Determinação dos Subcaminhos do Caminho de Transmissão Mais Carregado e Margens de Potência a partir do Gerador 34	70
Tabela 3.7	Dados de Barra e Linha do Sistema da Figura 3.11	73
Tabela 3.8	Valores de Tensão, Potência Líquida nas Barras e Fluxos de Potência nas Linhas do Sistema da Figura 3.11	74
Tabela 4.1	Dados de Barra e Linha do Sistema da Figura 4.1	77
Tabela 4.2	Dados de Barra e Linha do Sistema da Figura 4.2	78
Tabela 4.3	Valores de Tensão e Potência Líquida do Sistema da Figura 4.1	78
Tabela 4.4	Índices de Estabilidade de Tensão do Sistema da Figura 4.1	78
Tabela 4.5	Valores de Tensão e Potência Líquida do Sistema da Figura 4.2	79
Tabela 4.6	Índices de Estabilidade de Tensão do Sistema da Figura 4.2	79
Tabela 4.7	Índices de Estabilidade de Tensão das Sub-redes Determinadas para a Barra 16	83
Tabela 4.8	Dados de Barra e Linha do Sistema da Figura 4.6	85
Tabela 4.9	Dados de Barra e Linha do Sistema da Figura 4.7	85

Tabela 4.10	Avaliação do Sistema da Figura 4.6	86
Tabela 4.11	Avaliação do Sistema da Figura 4.7	86
Tabela 4.12	Valores de Tensão, Potência Líquida nas Barras e Fluxos de Potência nas Linhas do Sistema da Figura 4.6	87
Tabela 4.13	Valores de Tensão, Potência Líquida nas Barras e Fluxos de Potência nas Linhas do Sistema da Figura 4.8	88
Tabela 4.14	Índices na Barra Três para os Sistemas das Figuras 4.6 e 4.8	88
Tabela 4.15	Dados de Barra e Linha do Sistema da Figura 4.9	90
Tabela 4.16	Dados de Barra e Linha do Sistema da Figura 4.10	91
Tabela 4.17	Índices do Sistema da Figura 4.9	91
Tabela 4.18	Índices do Sistema da Figura 4.10	91
Tabela 4.19	Determinação dos Caminhos de Transmissão da Barra 16 Avaliada como Barra Crítica de Carga	93
Tabela 4.20	Determinação dos Caminhos de Transmissão da Barra 16 Avaliada como Barra Crítica de Geração	94
Tabela 4.21	Determinação dos Caminhos de Transmissão da Barra 29	96
Tabela 4.22	Determinação e Avaliação dos Caminhos de Transmissão da Barra 34	98
Tabela 4.23	Comparação dos Resultados dos Caminhos de Transmissão da Barra 29	101
Tabela 4.24	Comparação dos Resultados dos Caminhos de Transmissão da Barra 34	103
Tabela 4.25	Determinação dos Caminhos de Transmissão com o Uso de Injeção de Potência para a Barra 16 Avaliada como Barra Crítica de Geração	108
Tabela 4.26	Determinação dos Caminhos de Transmissão com o Uso de Injeção de Potência para a Barra 16 Avaliada como Barra Crítica de Carga	109
Tabela 4.27	Determinação dos Caminhos de Transmissão com o Uso de Injeção de Potência para a Barra 29	110
Tabela 4.28	Determinação dos Caminhos de Transmissão com o Uso de Injeção de Potência para a Barra 34	113

Tabela 4.29	Comparação dos Resultados Com o Uso de Admitâncias e de Injeções para a Barra 16 como Barra de Carga	115
Tabela 4.30	Comparação dos Resultados Com o Uso Admitâncias e de Injeções para a Barra 16 Como Barra de Geração	116
Tabela 4.31	Comparação dos Resultados Com o Uso de Admitâncias e de Injeções para Barra 29	118
Tabela 4.32	Comparação dos Resultados com o Uso de Admitâncias e de Injeções para a Barra 34	122
Tabela 4.33	Comparação dos Resultados dos Caminhos mais Carregado da Barra 29	126
Tabela 4.34	Comparação dos Resultados dos Caminhos mais Carregados da Barra 34	128
Tabela 4.35	Determinação e Avaliação dos Sub-Caminhos de Transmissão da Barra 16	131
Tabela 4.36	Determinação e Avaliação dos Subcaminhos de Transmissão da Barra 29	132
Tabela 4.37	Determinação e Avaliação dos Subcaminhos de Transmissão da Barra 34	133
Tabela 4.38	Comparação dos Resultados do Ramo Crítico do Caminho mais Carregado da Barra 29	134
Tabela 4.39	Comparação dos Resultados do Ramo Crítico do Caminho mais Carregado da Barra 34	135
Tabela 4.40	Determinação e Avaliação dos Subcaminhos de Transmissão com o Uso de Injeção de Potência para a Barra 16	136
Tabela 4.41	Determinação e Avaliação dos Subcaminhos de Transmissão com o Uso de Injeção de Potência para a Barra 29	137
Tabela 4.42	Determinação e Avaliação dos Subcaminhos de Transmissão com o Uso de Injeção de Potência para a Barra 34	138
Tabela 4.43	Comparação dos Resultados do Ramo Crítico do Caminho mais Carregado da Barra 16	139

Tabela 4.44	Comparação dos Resultados do Ramo Crítico do Caminho mais Carregado da Barra 29	140
Tabela 4.45	Comparação dos Resultados do Ramo Crítico do Caminho mais Carregado da Barra 34	141
Tabela 4.46	Comparação dos Resultados do Ramo Crítico do Caminho mais Carregado da Barra 29	142
Tabela 4.47	Comparação dos Resultados do Ramo Crítico do Caminho mais Carregado da Barra 34	143

Lista de Abreviaturas e Siglas

CS	Compensador Síncrono
II	Índice de Influência da ação de controle sobre a margem de potência.
LTC	Transformador com variação automática de taps em carga
LEA	Limite de Estabilidade Estática Angular
LET	Limite de Estabilidade de Tensão
SVC	Compensador Estático de Potência Reativa
M	Margem de Potência em % ou em pu
M_{oi}	Margem de potência na barra i no ponto de operação referência
M_{1i}	Margem de Potência Após o Evento em Análise
P	Potência Ativa
Q	Potência Reativa
S	Potência Aparente
θ	Ângulo da Tensão
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
β	Ângulo entre os Gradientes dos Fluxos de Potência Ativa e Reativa
Z_t	Impedância da linha de transmissão
α_t	Ângulo da impedância da linha de transmissão
Z_c	Impedância de Carga
ϕ	Ângulo do Fator de Potência na Carga