



Jhon Hansel Noya Vergara

**Determinação 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
Março de 2015



Jhon Hansel Noya Vergara

**Determinação 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. Glauco Nery Taranto

Programa de Engenharia Elétrica - COPPE/URFJ

Flávio Rodrigo de Miranda Alves

CEPEL

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico

Rio de Janeiro, 26 de Março de 2015

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

Jhon Hansel Noya Vergara

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

Ficha Catalográfica

Vergara, Jhon Hansel Noya

Determinação do Ramo de transmissão Carregado sob o ponto de vista de estabilidade de tensão / Jhon Hansel Noya Vergara ; orientador: Ricardo Bernardo Prada – 2015.
126 f. : il. (color.) ; 30 cm

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

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Estabilidade de tensão. 3. Índice de estabilidade de tensão. 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.

CDD: 621.3

Para minha família, pelo amor, apoio e confiança.

Agradecimentos

A Deus por sua fidelidade.

Aos meus pais e minhas irmãs pelo apoio constante, amor, conselhos e orações.

Ao meu orientador, Ricardo Prada, pela orientação brindada, por compartilhar seu conhecimento, por sua atenção e paciência.

A todos meus amigos do curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, especialmente a Vanessa González, pelo constante apoio, escuta e amizade.

Ao Cnpq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos.

Resumo

Vergara, Jhon Hansel Noya; Prada, Ricardo Bernardo. **Determinação do Ramo de Transmissão Carregado sob o Ponto de Vista de Estabilidade de Tensão.** Rio de Janeiro, 2015. 126p. Dissertação de Mestrado – Departamento de 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. Assim, é importante conhecer a proximidade ao ponto de máximo carregamento da rede de transmissão. Nesta dissertação foram estudados métodos existentes na literatura para determinar o ramo de transmissão mais carregado, foi avaliada a veracidade dos resultados obtidos quando são estudados os ramos de transmissão individualmente e, finalmente, foi apresentada uma alternativa para identificar o ramo de transmissão mais carregado observando as variações dos índices de estabilidade de tensão em cada ramo. Mostrou-se que é inadequada a avaliação de cada linha individualmente em um sistema multi-nó.

Palavras-chave

Estabilidade de tensão; segurança de tensão; índice de estabilidade de tensão; sub-rede de transmissão; caminhos de transmissão.

Abstract

Vergara, John Hansel Noya; Prada, Ricardo Bernardo (Advisor). **Determination of the Loaded of Transmission Branches from the Point of View of Voltage Stability**. Rio de Janeiro, 2015. 126p. 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. Therefore, did the importance of knowing the proximity to the point of maximum loading of the transmission network. In this dissertation, the existing methods in the literature for determining the most heavily loaded transmission branch were studied, was assessed the accuracy of the results obtained when the transmission branches are studying individually, and finally was displayed an alternative to identify the most heavily loaded transmission branch observing variations in voltage stability indices in each branch. It has been shown that it is inappropriate to evaluate each line individually in a multi-node system.

Keywords

Voltage stability; voltage security; voltage collapse index; sub-transmission network; transmission paths.

Sumário

1 Introdução	18
1.1. Considerações Gerais	18
1.2. Objetivos	19
1.3. Estrutura do Trabalho.....	20
2 Caracterização do Fenômeno de Estabilidade de Tensão e Índices de Avaliação das Condições de Estabilidade de Tensão.....	21
2.1. Introdução	21
2.2. O Problema de Estabilidade de Tensão.....	21
2.3. Equações de Fluxo de Potência Ativa e Reativa na Barra de Carga	22
2.4. Curvas P, Q e ϕ Constantes	24
2.4.1. Fator de Potência (ϕ) Constante.....	26
2.5. O Limite de Estabilidade de Tensão (LET).....	27
2.6. A Existência da Potência Transmitida “Maximum Maximorum”	32
2.7. Índices e Margens para Avaliação da Segurança de Tensão.....	33
2.7.1. Desenvolvimento do Método	34
2.7.2. Módulo do Determinante da Matriz [D']	36
2.7.2.1. Sistema Duas Barras	36
2.7.2.2. Sistema Multi-Nó	37
2.7.3. Sinal do Determinante da Matriz [D']	40
2.7.4. Margem de Potência	41
2.8. Método para a Determinação da Sub-Rede.....	43
2.8.1. Barra Crítica de Carga.....	43
2.8.2. Barra Crítica de Geração.....	44
2.9. Uso de Injeção de Potência Equivalente [19].....	44
2.9.1. Determinação dos Caminhos de Transmissão.....	45
2.10. Conclusões.....	46

3 Métodos Propostos por Diferentes Autores para	
Determinar o Ramo de Transmissão mais Carregado	47
3.1. Índice de Estabilidade de Linha (LMN)	48
3.1.1. Modelo Matemático	48
3.1.2. Observações	50
3.2. Índice de Proximidade de Estabilidade de Tensão	
Baseado nos Ramos (Lq'')	53
3.2.1. Modelo Matemático	54
3.2.2. Observações	58
3.3. Índice de Estabilidade de Tensão Rápido (FVS)	61
3.3.1. Modelo Matemático	62
3.3.2. Observações	64
3.4. Novo Índice de Estabilidade de Tensão ($VSI-P$)	66
3.4.1. Modelo Matemático	67
3.4.2. Observações	68
3.5. Índice de Proximidade de Colapso de Tensão (VCP)	70
3.5.1. Modelo Matemático	71
3.5.2. Observações	75
3.6. Índice de Proximidade de Colapso da Linha para	
Predição de Colapso de Tensão em Sistemas de	
Potência (LCP)	77
3.6.1. Modelo Matemático	77
3.6.2. Observações	79
3.7. Fator de Estabilidade de Linha (LQP)	82
3.7.1. Modelo Matemático	82
3.7.2. Observações	84
3.8. Identificação de Ramos Críticos para Estabilidade de	
Tensão Baseada na Análise Modal do Sistema	85
3.8.1. Matriz de Sensibilidade	85
3.8.2. Fatores de Participação dos Ramos	89
3.8.3. Observações	91
3.9. Avaliação das Condições de Estabilidade de Tensão	
em um Sistema com Duas Linhas	93

3.10. Conclusões.....	95
4 Determinação do Ramo de Transmissão Mais Carregado Através da Observação dos Índices de Estabilidade de Tensão nas Extremidades do Ramo	99
4.1. Observação dos Índices de Estabilidade de Tensão.....	99
4.1.1. Observação da Margem de Potência	99
4.1.2. Observação do Índice β	100
4.1.3. Observação do Índice S_m	100
4.1.4. Observação do Índice S_m e S_i	100
4.2. Exemplos Numéricos	101
4.2.1. Sistema de 4 Barras	101
4.2.2. Sistema de 34 Barras	102
4.2.3. Conclusões dos Exemplos Numéricos	115
4.3. Comparação dos Resultados Obtidos com o Uso de Injeções de Potência para Determinar o Ramo mais Carregado	116
4.4. Conclusões.....	121
5 Conclusões e Trabalhos Futuros.....	122
5.1. Conclusões.....	122
5.2. Trabalhos Futuros	122
6 Referências Bibliográficas	124
Apêndice A – Sistema-Teste de 34 Barras Desenvolvido pelo CEPEL	126

Lista de Figuras

Figura 2.1 Sistema Série de Duas Barras	22
Figura 2.2 Potência Ativa Consumida na Carga vs Defasagem Angular.....	23
Figura 2.3 Potência Ativa e Reativa na Carga vs Defasagem Angular.....	25
Figura 2.4 Três Possibilidades de Solução para a Tensão na Carga com Mesmo Fator de Potência	26
Figura 2.5 Tensão na Carga vs Defasagem Angular com ϕ Constante.....	27
Figura 2.6 Circuito com as Impedâncias da Linha e da Carga	28
Figura 2.7 Limite de Estabilidade de Tensão no Plano SV	32
Figura 2.8 Lugar Geométrico da Tensão na Carga para Diferentes Níveis de Potência Ativa e Reativa Constante.....	33
Figura 2.9 Regiões de Operação na Curva SV	34
Figura 2.10 Localização do Vetor Gradiente de PR e QR no Plano δV	41
Figura 2.11 Sinal da Margem na Curva ϕ Constante.....	42
Figura 2.12 Parte da Rede no Entorno da Barra i.....	43
Figura 3.1 Curvas P e Q Constantes no Plano δV -Única Solução de Tensão.....	47
Figura 3.2 Diagrama Típico de Uma Linha de Transmissão	48
Figura 3.3. Sistema -Teste de Duas Barras	50
Figura 3.4 Curvas P e Q Constantes no Plano δV -Ponto de Operação (1).....	51
Figura 3.5 Curvas P e Q Constantes no Plano δV -Ponto de Operação (2).....	52
Figura 3.6 Curvas P e Q Constantes no Plano δV -Ponto de Operação (3).....	52

Figura 3.7 Inclusão de Elementos <i>Shunt</i> para o Índice Proposto	57
Figura 3.8 Curvas P e Q Constantes no Plano δV -Ponto de Operação (1)	59
Figura 3.9 Curvas P e Q Constantes no Plano δV -Ponto de Operação (2)	59
Figura 3.10 Curvas P e Q Constantes no Plano δV -Ponto de Operação (3)	60
Figura 3.11 Curvas P e Q Constantes no Plano δV -Ponto de Operação (1)	64
Figura 3.12 Curvas P e Q Constantes no Plano δV -Ponto de Operação (2)	65
Figura 3.13 Curvas P e Q Constantes no Plano δV -Ponto de Operação (3)	65
Figura 3.14 Curvas P e Q Constantes no Plano δV -Ponto de Operação (1)	68
Figura 3.15 Curvas P e Q Constantes no Plano δV -Ponto de Operação (2)	69
Figura 3.16 Curvas P e Q Constantes no Plano δV -Ponto de Operação (3)	69
Figura 3.17 Sistema de Potência de Duas Barras	71
Figura 3.18 Comportamento dos Índices <i>VCPI (P)</i> e <i>VCPI (PL)</i> com Variação de <i>PR</i>	74
Figura 3.19 Curvas P e Q Constantes no Plano δV	75
Figura 3.20 Diagrama Típico de uma Linha de Transmissão com Admitâncias <i>Shunt</i>	77
Figura 3.21 Curvas P e Q Constantes no Plano δV -Ponto de Operação (1)	80
Figura 3.22 Curvas P e Q Constantes no Plano δV -Ponto de Operação (2)	80
Figura 3.23 Curvas P e Q Constantes no plano δV -Ponto de Operação (3)	81

Figura 3.24 Modelo π da Linha de Transmissão Ligada às Barras por Transformadores em Fase.....	86
Figura 3.25 Sistema-Teste de Três Barras	94
Figura 4.1 Sistema de 4 Barras-Teste 1	101
Figura 4.2 Sistema de 4 Barras-Teste 2	102
Figura 4.3 Sistema-Teste de 34 Barras Modificado.....	103
Figura 4.4 Ramos Críticos da Sub-Rede - Ponto de Operação (1)	106
Figura 4.5 Ramos Críticos da Sub-Rede - Ponto de Operação (2)	109
Figura 4.6 Ramos Críticos da Sub-Rede - Ponto de Operação (3)	112
Figura 4.7 Ramos Críticos da Sub-Rede - Ponto de Operação (4)	114
Figura A.1 Sistema-Teste de 34 Barras.....	126

Lista de Tabelas

Tabela 3.1. Pontos de Operação Testados.....	51
Tabela 3.2. Resultados do Índice <i>LMN</i> para os Três Pontos de Operação	53
Tabela 3.3 Resultados dos Índices para os Três Pontos de Operação	61
Tabela 3.4 Resultados do Índice <i>FVSI</i> para os Três Pontos de Operação	66
Tabela 3.5 Resultados do Índice <i>VSI-P</i> para os Três Pontos de Operação	70
Tabela 3.6 Perdas nos Três Pontos de Operação	76
Tabela 3.7. Resultados dos Índices <i>VCPI</i> para os Três Pontos de Operação	76
Tabela 3.8. Resultados do Índice <i>LCPI</i> para os Três Pontos de Operação	82
Tabela 3.9. Tensão para os Três Pontos de Operação Calculados por (3.76) e no Ponto de Máximo Carregamento	84
Tabela 3.10. Resultados do Índice <i>LQP</i> para os Três Pontos de Operação	85
Tabela 3.11. Pontos de Operação Testados	94
Tabela 3.12. Resultados do Método da Matriz <i>D'</i>	94
Tabela 3.13. Resultados do Índice <i>VCPI</i> em cada Linha para os Três Pontos de Operação.....	95
Tabela 4.1 Variações dos Índices - Teste 1	101
Tabela 4.2 Variações dos Índices - Teste 2	102
Tabela 4.3 Ponto de Operação 1 - Sistema 34 Barras.....	104
Tabela 4.4 Resultados das Variações dos Índices - Ponto de Operação (1).....	105
Tabela 4.5 Ponto de Operação 2 - Sistema 34 Barras.....	107

Tabela 4.6 Resultados das Variações dos Índices - Ponto de Operação (2).....	108
Tabela 4.7 Ponto de Operação 3 - Sistema 34 Barras.....	110
Tabela 4.8 Resultados das Variações dos Índices - Ponto de Operação (3).....	111
Tabela 4.9 Ponto de Operação 4 - Sistema 34 Barras.....	113
Tabela 4.10 Resultados das Variações dos Índices - Ponto de Operação (4).....	114
Tabela 4.11 Caminhos de Transmissão Críticos - Ponto de Operação (1).....	116
Tabela 4.12 Caminhos de Transmissão Críticos - Ponto de Operação (2).....	119
Tabela 4.13 Caminhos de Transmissão Críticos - Ponto de Operação (3).....	120
Tabela 4.14 Caminhos de Transmissão Críticos - Ponto de Operação (4).....	120

Lista de Abreviaturas e Siglas

LEA	Limite de Estabilidade Estática Angular
LET	Limite de Estabilidade de Tensão
M	Margem de Potência em % ou em pu
M_{oR}	Margem de potência na barra R no ponto de operação referência
M_{1R}	Margem de Potência Após o Evento em Análise
P	Potência Ativa
Q	Potência Reativa
S	Potência Aparente
δ	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_R	Potência Aparente Injetada na Barra R no Ponto de Operação em Análise.
S_m	Estimativa da Máxima Potência Aparente que Pode Ser Injetada na Barra R 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	Impedância da linha de transmissão
θ	Ângulo da impedância da linha de transmissão
Z_c	Impedância de Carga
ϕ	Ângulo do Fator de Potência na Carga
LMN	Índice de Estabilidade de Linha
Lq''	Índice de Proximidade de Estabilidade de Tensão Baseado nos Ramos
$FVSI$	Índice de Estabilidade de Tensão Rápido
$VSI - P$	Novo Índice de Estabilidade de Tensão
$VCPI$	Índice de Proximidade de Colapso de Tensão
$LCPI$	Índice de Proximidade de Colapso da Linha para Predição de Colapso de Tensão em Sistemas de Potência
LQP	Fator de Estabilidade de Linha