



Maxwell Abrahan Vargas Carbajal

**Avaliação das Condições de Estabilidade de
Tensão Considerando a Atuação da Regulação
Primária e Secundária**

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
Co-Orientador: Prof. João Alberto Passos Filho

Rio de Janeiro
Junho de 2015



Maxwell Abrahan Vargas Carbajal

**Avaliação das Condições de Estabilidade de
Tensão Considerando a Atuação da Regulação
Primária e Secundária**

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. João Alberto Passos Filho

Co-Orientador

UFJF

Prof. Milton Brown Do Coutto Filho

UFF

Prof. Ricardo Mota Henriques

UFJF

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 24 de junho de 2015

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

Maxwell Abrahan Vargas Carbajal

Graduou-se em Engenharia Mecatrônica na Universidad Nacional de Ingeniería, Perú em 2011.

Ficha Catalográfica

Carbajal, Maxwell Abrahan Vargas

Avaliação das Condições de Estabilidade de Tensão Considerando a Atuação da Regulação Primária e Secundária./ Maxwell Abrahan Vargas Carbajal; orientador: Ricardo Bernardo Prada; co-orientador: João Alberto Passos Filho– 2015.

159 f.: il. ;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. Regulação secundária. 4. Regulação primária. 5. Regulação própria. 6. Múltiplas barras *swing*. I. Prada, Ricardo Bernardo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

A minha mãe Máxima
Pela luta incansável por me tornar
em uma melhor pessoa cada dia
A minha família
Pelas alegrias e amor fornecido.

Agradecimentos

Ao meu orientador Ricardo Prada pela paciência, dedicação, e apoio incondicional no desenvolvimento desta dissertação.

À CNPq e à PUC-Rio, pelo apoio financeiro concedido.

Aos membros da Comissão da Pós-Graduação do DEE, pela oportunidade de estudar no Mestrado da PUC-Rio.

A Máxima e Antonino pela educação ensinada, pela formação da minha personalidade e os bons conselhos.

A Nancy, Jimmy, Zulma e Edwin pela ajuda moral e financeira, pelos melhores momentos da minha vida, pelas alegrias e tristezas e porque sempre estaremos juntos.

A Piero e Anibal, por ser minha alegria de todos os dias.

A meus amigos das aulas do mestrado e do Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica, pela ajuda e compreensão ao resolver minhas dúvidas, pela união no momento de aprendizagem.

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

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e que participaram durante esta etapa da minha vida.

Por último, agradeço a Deus por todas as alegrias, pela saúde e pela força que me concedeu, para que conseguisse chegar até aqui.

Resumo

Carbajal, Maxwell Abrahan Vargas; Prada, Ricardo Bernardo; Passos, João Alberto. **Avaliação das Condições de Estabilidade de Tensão Considerando a Atuação da Regulação Primária e Secundária**. Rio de Janeiro, 2015. 159p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Cada dia a operação dos sistemas elétricos de energia é mais complexo. Manter um correto fornecimento da energia de forma empírica é uma tarefa difícil e pouco confiável, este trabalho se realizou para ajudar a atender com maior confiabilidade este fornecimento de energia. Neste trabalho apresentam-se modelagens de fluxo de carga para obter diferentes pontos de operação. Modelou-se a regulação própria da carga e o controle carga-frequência das unidades geradoras, incluindo regulação primária e secundária. As modelagens são estendidas para a avaliação da estabilidade de tensão, inclusive considerando-se a influência da frequência. A avaliação foi feita em pontos de operação antes e após a atuação do controle carga-frequência. Em cada caso, as variações de carga ou geração das barras em análise (infinitesimais) são absorvidas pelos geradores de diferentes formas: de acordo com os fatores de proporcionalidade na regulação secundária, com as energias de regulação na regulação primária ou com a proporcionalidade das gerações das barras *swing* no despacho proporcional. De acordo com o apresentado neste trabalho obtêm-se pontos de operação em regime permanente, nestes pontos de operação foi onde se realizou o cálculo da estabilidade de tensão para todas as barras do sistema. Os sistemas testados tiveram 6 e 39 barras.

Palavras-chave

Estabilidade de tensão; área de controle; regulação secundária; regulação primária; regulação própria; múltiplas barras *swing*.

Abstract

Carbajal, Maxwell Abrahan Vargas; Prada, Ricardo Bernardo (Advisor); Passos, João Alberto. **Evaluation of the Voltage Stability Conditions Considering the Acting of the Primary and Secondary Frequency Control**. Rio de Janeiro, 2015. 159p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Each day the operation of electric power system is more complex. Maintain a correct supply of energy empirically is difficult and unreliable task, this work was realized to comply with more reliably this power supply. This dissertation presents the modeling of power flow to get different steady state. The load response to frequency deviation, the primary and the secondary frequency control were models. The models are extended to the evaluation of voltage stability, even considering the frequency influence. The evaluation is done in the state before and after the response of load-frequency control. In each case, the generators units absorb the variation (infinitesimal) in the load or in the generation (bus in analysis) in different ways: according to the proportionality factor in the secondary control, the speed regulations in the primary control or the proportionality of the *swing* bus generation in the proportional dispatch. According to the presented in this dissertation was obtained a state in permanent regime, in this state was evaluated the voltage stability in all bus of the system. The tested system had 6 and 39 bus.

Keywords

Voltage stability; control area; secondary frequency control; primary frequency control; load response to frequency deviation; multiple swing bus.

Sumário

1. Introdução	20
1.1. Considerações Gerais	20
1.2. Objetivos	21
1.3. Estrutura do Trabalho	23
2. Controle Carga - Frequência	24
2.1. Regulação Própria	24
2.2. Regulação Primária	25
2.2.1. Característica Estática do regulador	25
2.2.2. Operação em Paralelo de Geradores	27
2.2.3. Área de Controle	28
2.2.4. Caso de Mais de uma Área de Controle	29
2.3. Regulação Secundária	31
2.3.1. Regulação Secundária em Áreas de Controle	32
2.3.2. Erro da Área de Controle	32
2.4. Conclusões	33
3. Análise da Estabilidade de Tensão em um Sistema Elétrico de Potência	34
3.1. Caracterização do Fenômeno de Estabilidade de Tensão	34
3.2. Avaliação das Condições de Estabilidade de Tensão	41
3.2.1. Módulo do Determinante da Matriz $[D']$	42
3.2.2. Sinal do Determinante da Matriz $[D']$	47
3.2.3. Interpretação dos Índices	49
3.3. Modelagem da Carga no Cálculo dos Índices de Estabilidade de Tensão	51
3.3.1. Característica da Carga	51
3.3.2. Modelagem da Carga no Cálculo dos Índices	52
3.4. Conclusões	53

4. Problema do Fluxo de Potência Modificado	54
4.1. Fluxo de Potência com Múltiplas Barras <i>Swing</i> (Despacho Proporcional)	55
4.2. Problema de Fluxo de Potência com Regulação Primária	59
4.3. Problema de Fluxo de Potência com Regulação Primária e com Regulação Própria do Sistema	63
4.4. Problema de Fluxo de Potência com Regulação Secundária	66
4.5. Exemplo Ilustrativo	71
4.5.1. Formulação do Fluxo de Potência com Múltiplas Barras <i>Swing</i>	71
4.5.2. Formulação do Fluxo de Potência com Regulação Primária	77
4.5.3. Formulação do Fluxo de Potência com Regulação Primária e com Regulação Própria	80
4.5.4. Formulação do Fluxo de Potência com Regulação Secundária	82
4.5.4.1. Uma Única Área de Controle	82
4.5.4.2. Duas Áreas de Controle	86
4.6. Conclusões	91
5. Índices de Estabilidade de Tensão e o Controle Carga - Frequência	92
5.1. Cálculo dos Índices de Estabilidade de Tensão Antes da Ocorrência de um Impacto Normal	93
5.1.1. Cálculo dos Índices de Estabilidade de Tensão para Barras PQ em um Sistema Modelado com Multiplas Barras <i>Swing</i>	94
5.1.2. Cálculo dos Índices de Estabilidade de Tensão para Barras de Geração em um Sistema Modelado com Múltiplas Barras <i>Swing</i>	95
5.2. Cálculo dos Índices de Estabilidade de Tensão Depois da Ocorrência de um Impacto Normal	97
5.2.1. Cálculo dos Índices de Estabilidade de Tensão Depois da Atuação da Regulação Primária	97

5.2.1.1. Cálculo dos Índices de Estabilidade de Tensão para Barras PQ em um Sistema Modelado com Regulação Primária	98
5.2.1.2. Cálculo dos Índices de Estabilidade de Tensão para Barras de Geração em um Sistema Modelado com Regulação Primária	99
5.2.2. Cálculo dos Índices de Estabilidade de Tensão Depois da Atuação da Regulação Secundária	102
5.2.2.1. Cálculo dos Índices de Estabilidade de Tensão em Barras PQ em um Sistema Modelado com Regulação Secundária	103
5.2.2.2. Cálculo dos Índices de Estabilidade de Tensão em Barras de Geração em um Sistema Modelado com Regulação Secundária	104
5.3. Exemplo Ilustrativo	107
5.3.1. Cálculo dos Índices de Estabilidade Antes de Um Impacto Normal	107
5.3.1.1. Cálculo dos Índices de Estabilidade Antes do Impacto Normal – Tratamento para Barras PQ	108
5.3.1.2. Cálculo dos Índices de Estabilidade Antes do Impacto Normal – Tratamento para Barras de Geração	109
5.3.2. Cálculo dos Índices de Estabilidade Depois da Atuação da Regulação Primária	111
5.3.2.1. Cálculo dos Índices de Estabilidade Depois da Atuação da Regulação Primária – Tratamento para Barras PQ	112
5.3.2.2. Cálculo dos Índices de Estabilidade Depois da Atuação da Regulação Primária – Tratamento para Barras de Geração	113
5.3.3. Cálculo dos Índices de Estabilidade em Uma Única Área de Controle Depois da Atuação da Regulação Secundária	114
5.3.3.1. Cálculo dos Índices de Estabilidade Depois da Atuação da Regulação Secundária – Tratamento para Barras PQ	115
5.3.3.2. Cálculo dos Índices de Estabilidade Apos Atuação da Regulação Secundária – Tratamento para Barras de Geração	116
5.3.4. Cálculo dos Índices de Estabilidade em Duas Áreas de Controle Depois da Atuação da Regulação Secundária	117

5.3.4.1.Cálculo dos Índices de Estabilidade Depois da Atuação da Regulação Secundária – Tratamento para Barras PQ	118
5.3.4.2. Cálculo dos Índices de Estabilidade Depois da Atuação da Regulação Secundária – Tratamento para Barras de Geração	119
5.4. Conclusões	120
6. Resultados	121
6.1. Sistema de 6 barras	122
6.1.1. Fluxo de Potência e Análise de Estabilidade de Tensão- Modelagem com Múltiplas <i>Swing</i>	122
6.1.2. Fluxo de Potência e Análise de Estabilidade de Tensão - Modelagem com Regulação Primária	125
6.1.3. Fluxo de Potência e Análise de Estabilidade de Tensão - Modelagem com Regulação Primária e Própria	127
6.1.4. Fluxo de Potência e Análise de Estabilidade de Tensão - Modelagem com Regulação Secundária	129
6.1.4.1. Uma Única Área de Controle	129
6.1.4.2. Duas Área de Controle	131
6.2. Sistema <i>New England</i> de 39 Barras	134
6.2.1. Fluxo de Potência e Análise de Estabilidade de Tensão - Modelagem com Múltiplas <i>Swing</i>	136
6.2.2. Fluxo de Potência e Análise de Estabilidade de Tensão - Modelagem com Regulação Primária	139
6.2.3. Fluxo de Potência e Análise de Estabilidade de Tensão - Modelagem com Regulação Primária e Própria	142
6.2.4. Fluxo de Potência e Análise de Estabilidade de Tensão - Modelagem com Regulação Secundária	146
6.2.4.1. Uma Única Área de Controle	146
6.2.4.2. Duas Áreas de Controle	150
6.3. Conclusões	155

7. Conclusões e Trabalhos Futuros	156
7.1. Conclusões	156
7.2. Trabalhos Futuros	157
8. Referências Bibliográficas	158

Lista de figuras

Figura 2.1- Variação Linear da Carga com a Frequência pela Regulação Própria	25
Figura 2.2- Curva Característica do Regulador com Queda de Velocidade	26
Figura 2.3- Área de Controle Representada Como uma Unidade Geradora Equivalente Suprindo uma Carga Equivalente	29
Figura 2.4- Representação Simplificada de Duas Áreas de Controle Interconectadas	30
Figura 2.5- Dinâmica Sequencial do Sistema	31
Figura 3.1- Sistema de Duas Barras	34
Figura 3.2- Potência Consumida na Carga vs Defasagem Angular	35
Figura 3.3- Potência Consumida na Carga vs Defasagem Angular em Diferentes Valores de Tensão	36
Figura 3.4- Lugar Geométrico das Soluções de Tensão com Valores de Potência Ativa Constante	37
Figura 3.5- Lugar Geométrico das Soluções de Tensão com P_{10}, Q_{10} Constante.	38
Figura 3.6- Existência de Duas Soluções de Tensão	38
Figura 3.7- Solução Única no Ponto de Máximo Carregamento	39
Figura 3.8- Pontos de Máximo Carregamento para Diferentes Fatores de Potência	40
Figura 3.9- Características Potência Aparente vs Tensão	40
Figura 3.10- Regiões de Operação e o Máximo Carregamento	41
Figura 3.11- Vetores Gradiente no Ponto de Máximo Carregamento	42
Figura 3.12- Ângulo entre os Vetores Gradiente Conforme à Região onde se Encontram	48
Figura 3.13- Limite Estático de Estabilidade de Tensão para Potência e Impedância Constante	53
Figura 4.1- Diagrama Unifilar do Sistema-Exemplo de 6 Barras	71

Figura 4.2- Sistema com Duas Áreas de Controle	86
Figura 5.1- Sequência Temporal da Atuação do Controle Carga-Frequência	92
Figura 6.1- Diagrama Unifilar do Sistema New England de 39 Barras	134
Figura 6.2- Divisão do Sistema New England de 39 Barras em Duas Áreas de Controle	150

Lista de tabelas

Tabela 6.1- Estimativa Inicial do Ponto de Operação	122
Tabela 6.2- Ponto de Operação no Despacho Proporcional	123
Tabela 6.3- Consistência entre a Contribuição em Barras Swing e sua Proporcionalidade de Geração sem Perdas	123
Tabela 6.4- Índices de Estabilidade de Tensão ($f=60\text{Hz}$, Resposta de Acordo com o Despacho Proporcional)	124
Tabela 6.5- Índices de Estabilidade de Tensão ($f=60\text{Hz}$, Resposta de Acordo com as Energias de Regulação)	124
Tabela 6.6- Estatismos das Unidades Geradoras	125
Tabela 6.7- Ponto de Operação Após Atuação da Regulação Primária	126
Tabela 6.8- Índices de Estabilidade de Tensão ($f\neq 60\text{Hz}$, Resposta dos Geradores de Acordo com as Energias de Regulação)	126
Tabela 6.9- Índices de Estabilidade de Tensão ($f\neq 60\text{Hz}$, Resposta dos Geradores de Acordo com a Regulação Secundária)	127
Tabela 6.10- Ponto de Operação Após a Atuação da Regulação Primária e Própria	127
Tabela 6.11- Índices de Estabilidade de Tensão ($f\neq 60\text{Hz}$, Resposta dos Geradores de Acordo com as Regulações Primária e Própria)	128
Tabela 6.12- Índices de Estabilidade de Tensão ($f\neq 60\text{Hz}$, Resposta dos Geradores de Acordo com a Regulação Secundária)	128
Tabela 6.13- Fator de Participação das Máquinas em uma Única Área de Controle	129
Tabela 6.14- Ponto de Operação Após Atuação da Regulação Secundária	130

Tabela 6.15- Índices de Estabilidade de Tensão ($f=60\text{Hz}$. Respostas dos Geradores de Acordo com a Regulação Secundária)	130
Tabela 6.16- Índices de Estabilidade de Tensão ($f=60\text{Hz}$, Respostas dos Geradores de Acordo com o Despacho Proporcional)	131
Tabela 6.17- Fator de Participação dos Geradores nas Duas Áreas de Controle	131
Tabela 6.18- Ponto de Operação Após Atuação da Regulação Secundária em Duas Áreas de Controle	132
Tabela 6.19- Índices de Estabilidade de Tensão ($f=60\text{Hz}$. Respostas dos Geradores de Acordo com a Regulação Secundária)	133
Tabela 6.20- Índices de Estabilidade ($f=60\text{Hz}$, Respostas dos Geradores de Acordo com o Despacho Proporcional)	133
Tabela 6.21- Tensão e Geração de Potência Ativa no Caso Base do Sistema New Englandde 39 Barras	135
Tabela 6.22- Cargas do Sistema New England de 39 Barras	135
Tabela 6.23- Ponto de Operação no Despacho Proporcional	136
Tabela 6.24- Índices de Estabilidade de Tensão ($f=60\text{Hz}$. Resposta de Acordo com o Despacho Proporcional)	137
Tabela 6.25- Índices de Estabilidade de Tensão ($f=60\text{Hz}$ Resposta de Acordo com as Energias de Regulação)	138
Tabela 6.26- Ponto de Operação Após Atuação da Regulação Primária	139
Tabela 6.27- Índices de Estabilidade de Tensão ($f\neq 60\text{Hz}$. Resposta dos Geradores de Acordo com as Energias de Regulação)	140
Tabela 6.28- Índices de Estabilidade de Tensão ($f\neq 60\text{Hz}$. Resposta dos Geradores de Acordo com a Regulação Secundária)	141
Tabela 6.29- Ponto de Operação Após a Atuação da Regulação Primária e Própria	143

Tabela 6.30- Índices de Estabilidade de Tensão ($f \neq 60\text{Hz}$. Resposta dos Geradores de Acordo com as Regulações Primária e Própria)	144
Tabela 6.31- Índices de Estabilidade de Tensão ($f \neq 60\text{Hz}$. Resposta dos Geradores de Acordo com a Regulação Secundária)	145
Tabela 6.32- Ponto de Operação Após Atuação da Regulação Secundária	146
Tabela 6.33- Fator de Participação das Máquinas em uma Única Área de Controle	147
Tabela 6.34- Índices de Estabilidade de Tensão ($f = 60\text{Hz}$. Resposta dos Geradores de Acordo com a Regulação Secundária)	148
Tabela 6.35- Índices de Estabilidade de Tensão ($f = 60\text{Hz}$. Resposta dos Geradores de Acordo com o Despacho Proporcional)	149
Tabela 6.36- Fator de Participação dos Geradores nas Duas Áreas de Controle	151
Tabela 6.37- Ponto de Operação Após Atuação da Regulação Secundária em Duas Áreas de Controle	151
Tabela 6.38- Índices de Estabilidade de Tensão (Resposta dos Geradores de Acordo a Regulação Secundária)	152
Tabela 6.39- Índices de Estabilidade ($f = 60\text{Hz}$. Resposta dos Geradores de Acordo com o Despacho Proporcional)	153

Abreviaturas e Siglas

$\vec{\nabla}P_i$: Vetor gradiente de potência ativa

$\vec{\nabla}Q_i$: Vetor gradiente de potência reativa

Δf : variação da frequência de operação do sistema

ΔP_D : variação da potência ativa demandada

ΔP_G : variação da potência ativa gerada

f : Frequência de operação

P_D : potência ativa demandada

P_{km} : Potência ativa saindo da barra k para m

Q_{km} : Potência reativa saindo da barra k para m

S_{km} : Potência aparente saindo da barra k para m

P_i : Potência ativa injetada na barra i

Q_i : Potência reativa injetada na barra i

S_i : Potência aparente injetada na barra i

V_i : Tensão na barra i

θ_i : Ângulo na barra i

D : coeficiente de amortecimento da carga com a frequência

$1/R$: Energia de regulação da máquina [MW/Hz]

s : Estatismo [Hz/MW]

r.p.: regime permanente

β_i : Característica natural da área i

B_i : Bias da área i

ΔT_{km} : Intercâmbio de potência entre as áreas k e m

A: representa a matriz Jacobiana original do sistema, excluindo as linhas e colunas referentes à barra em análise

B: representa as derivadas das equações de potência ativa e reativa do sistema em relação às variáveis dependentes da barra em estudo

C: representa as derivadas das equações de potência ativa e reativa da barra em análise em relação às outras variáveis dependentes do sistema

D: representa as derivadas das equações de potência ativa e reativa da barra em análise em relação às suas próprias variáveis dependentes

D' : representa as derivadas das equações de potência ativa e reativa da barra em análise em relação às suas próprias variáveis dependentes para um sistema multi-nó

G_{ik} : Elemento ik da matriz de condutância

B_{ik} : Elemento ik da matriz de susceptância

LEEA: Limite de estabilidade estática angular

LET: Limite de estabilidade de tensão

ECA: Erro na área de controle

M : Margem de potência em %

β : Ângulo entre os vetores gradientes ∇P_i e ∇Q_i

S_i : Potência aparente injetada na barra i no ponto de operação em análise

S_m : Estimativa da máxima potência que poderia ser injetada na barra i

Z_c : Impedância de carga

Z_t : Impedância da linha de transmissão

α_t : Ângulo da impedância de linha de transmissão

α : Fator de participação na regulação secundária

ϕ : Ângulo do fator de potência

a, b, c e b : constantes para a modelagem da carga ativa e reativa com a tensão

C_P : Máximo correspondente à modelagem com potência constante

C_Z : Máximo correspondente à modelagem com impedância constante

Δx : variáveis de estado correspondentes às equações de controle

Δy : resíduos das equações de controle

h : variável da iteração