

ANTONIO CARLOS ZAMBRONI DE SOUZA

UMA AVALIAÇÃO DO FENÔMENO DO COLAPSO DE TENSÃO

Dissertação apresentada ao Departamento
de Engenharia Elétrica da PUC / RJ como
parte dos requisitos para a obtenção do
título de Mestre em Ciências de Engenharia
Elétrica - Sistemas de Potência.

Orientador: Ricardo Bernardo Prada

Departamento de Engenharia Elétrica

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro, setembro de 1990

a meus pais

AGRADECIMENTOS

- A meus pais, pela educação e pelo sacrifício, que tornaram possível minha chegada até aqui.

- A Marli Areias Ferreira, pelo carinho, compreensão e colaboração, presentes em todas as fases deste trabalho.

- A Ricardo Bernardo Prada, pela orientação fornecida durante todo o trabalho.

- A Roberto Legei Leoni, pelo incentivo dado à realização do curso.

- Aos colegas mestrandos, pela solidariedade e contribuição fornecidas.

- Aos professores, que se dispuseram a colaborar durante a elaboração do trabalho.

- Aos profissionais José Silvano Leite e Paulo Tibúrcio, pela colaboração técnica e boa vontade oferecidas.

- A meus irmãos, pelo carinho de uma vida inteira.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	xix
LISTA DE SÍMBOLOS	xii
1 - INTRODUÇÃO	01
1.1 - Evolução Histórica do Problema	01
2 - A ANÁLISE PELA REGIÃO DE OPERAÇÃO	04
2.1 - Introdução	04
2.2 - Regiões de Operação	05
2.3 - O Gráfico $V \times \theta$	07
2.3.1 - Curva para Potência Ativa Constante	07
2.3.2 - Curva para Potência Reativa Constante	08
2.3.3 - Curva para Arc Tg (Q/P) Constante	09
2.3.4 - Curva para P, Q e Arc Tg (Q/P) Constantes	10

2.4 -	Efeitos de Controle de Tensão	12
2.5 -	Determinação Matemática da Fronteira	15
2.6 -	Queda Excessiva de Tensão e Colapso de Tensão	19
3 -	ANALISE DO COLAPSO DE TENSÃO PELO SINAL DO DETERMINANTE DO JACOBIANO	34
3.1 -	Introdução	35
3.2 -	Análise de Estabilidade de Tensão	41
3.3 -	Testes e Resultados	45
4 -	ANALISE DO COLAPSO DE TENSÃO PELA ESTABILIDADE E CONTROLABILIDADE PQ E PV	55
4.1 -	Introdução	55
4.1.1 -	Montagem das Matrizes de Sensibilidade	58
4.2 -	Estabilidade PQ	61
4.3 -	Controlabilidade PQ	62

4.4 -	Condições de Estabilidade e Controlabilidade PQ	63
4.5 -	Estabilidade PV	66
4.6 -	Controlabilidade PV	67
4.7 -	Condições de Estabilidade e Controlabilidade PV	69
4.8 -	Testes e Resultados	73
4.9 -	Prevenção do Colapso de Tensão	78
4.9.1 -	Algumas Considerações	78
4.9.2 -	Testes e Resultados de Prevenção	80
4.10 -	Considerações Finais sobre os Testes	83
5 -	ESTABILIDADE DE TENSÃO x ESTABILIDADE ANGULAR	97
5.1 -	A Estabilidade Estática Angular	97
5.2 -	Modelo Matemático do Sistema	98
5.3 -	Análise do Modelo do Sistema	103

5.4 -	Influência da Inércia	109
5.5 -	Testes e Resultados	111
6 -	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	120

APÊNDICES

- 129 -

BIBLIOGRAFIA

141

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Sistema de duas barras	23
Figura 2.2 - Curva $V \times \theta$ para Potência Ativa Constante	24
Figura 2.3 - Curva $V \times \theta$ para Potência Reativa Constante	25
Figura 2.4 - Curva $V \times \theta$ para $\text{Arc tg} (Q/P)$ Constante	26
Figura 2.5 - Gráfico $V \times \theta$ com o Lugar Geométrico da Tensão na Carga para P Constante, Q Constante, P e Q para θ Constante	27
Figura 2.6 - A Vista em Três Dimensões das Variáveis da Barra de Carga	28
Figura 2.7 - Curvas $V \times \theta$ Mostrando Três Possibilidades de Solução de Tensão	29
Figura 2.8 - Efeitos sobre a Tensão na Carga com Instalação de um Capacitor em Paralelo	30

Figura 2.9 - Efeitos sobre a Tensão na Carga com a Troca de Tapes do Transformador entre Gerador e Carga.	31
Figura 2.10 - Efeitos sobre a Tensão na Carga com a Variação da Tensão nos Terminais do Gerador	32
Figura 2.11 - Efeitos sobre a Tensão na Carga com o Aumento da Capacidade de Transmissão através da Instalação de um Capacitor em Paralelo	33
Figura 2.12 - Efeito sobre a Tensão na Carga de Três Cortes de Carga Parciais Correspondendo a Cargas Remanescentes com três Fatores de Potência Diferentes	34
Figura 2.13 - Curva $V \times \theta$ para Valores de Máximo Carregamento	35
Figura 3.1 - Sistema de Três Barras	49
Figura 5.1 - Curva $V \times \theta$ Mostrando Estabilidade e Instabilidade das Regiões A e B	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Análise do Determinante e dos Autovalores.	50
Teste 3.1 - Fator de Potência : 30° indutivo	
Tabela 3.2 - Análise do Determinante e dos Autovalores.	51
Teste 3.2 - Fator de Potência : 20° indutivo	
Tabela 3.3 - Análise do Determinante e dos Autovalores.	53
Teste 3.3 - Fator de Potência : 30° capacitivo	
Tabela 4.1 - Análise das Matrizes de Sensibilidade	85
Teste 4.1 - Fator de Potência : 2° indutivo	
Barra 2 Gera $\Rightarrow$ 1.5 pu Tensão Barra 2 $\Rightarrow$ 1.0 pu	
Tabela 4.2 - Análise das Matrizes de Sensibilidade	86
Teste 4.2 - Fator de Potência : 30° capacitivo	
Barra 2 Gera $\Rightarrow$ 1.5 pu Tensão Barra 2 $\Rightarrow$ 1.0 pu	
Tabela 4.3 - Aferição das Matrizes de Sensibilidade	87
Teste 4.3	

Tabela 4.4 - Análise das Matrizes de Sensibilidade 91

Teste 4.4 - Fator de Potência : 30° capacitivo
Barra 2 Gera $\Rightarrow$ 1.5 pu Tensão Barra 2 $\Rightarrow$ 1.03 pu

Tabela 4.5 - Análise das Matrizes de Sensibilidade 91

Teste 4.5 - Fator de Potência : 30° capacitivo
Barra 2 Gera $\Rightarrow$ 1.5 pu Tensão Barra 2 $\Rightarrow$ 1.05 pu

Tabela 4.6 - Análise das Matrizes de Sensibilidade 92

Teste 4.6 - Fator de Potência : 30° capacitivo
Barra 2 Gera $\Rightarrow$ 2.0 pu Tensão Barra 2 $\Rightarrow$ 1.0 pu

Tabela 4.7 - Análise das Matrizes de Sensibilidade 93

Teste 4.7 - Fator de Potência : 30° capacitivo
Barra 2 Gera $\Rightarrow$ 2.0 pu Tensão Barra 2 $\Rightarrow$ 1.03 pu

Tabela 4.8 - Análise das Matrizes de Sensibilidade 93

Teste 4.8 - Fator de Potência : 30° capacitivo
Barra 2 Gera $\Rightarrow$ 2.5 pu Tensão Barra 2 $\Rightarrow$ 1.0 pu

Tabela 4.9 - Análise das Matrizes de Sensibilidade 94

Teste 4.9 - Fator de Potência : 30° capacitivo
Barra 2 Gera $\Rightarrow$ 2.5 pu Tensão Barra 2 $\Rightarrow$ 1.03 pu

Tabela 4.10 - Análise das Matrizes de Sensibilidade 95

Teste 4.10 - Fator de Potência : 30° capacitivo

Barra 2 Gera $\rightarrow$ 2.5 pu Tensão Barra 2 $\rightarrow$ 1.04 pu

Tabela 4.11 - Análise das Matrizes de Sensibilidade 96

Teste 4.11 - Fator de Potência : 30° capacitivo

Barra 2 Gera $\rightarrow$ 3.0 pu Tensão Barra 2 $\rightarrow$ 1.04 pu

Tabela 5.1 - Análise da Estabilidade Angular por Autovalores

Teste 5.1 - Fator de Potência : 30° indutivo 115

Tabela 5.2 - Análise da Estabilidade Angular por Autovalores

Teste 5.2 - Fator de Potência : 20° indutivo 116

Tabela 5.3 - Análise da Estabilidade Angular por Autovalores

Teste 5.3 - Fator de Potência : 30° capacitivo 118

LISTA DE SIMBOLOS

- A - matriz genérica similar a uma matriz simétrica.
- A_1 - derivada parcial da potência reativa em relação ao ângulo de tensão em todas as barras, exceto a *swing*.
- A_2 - derivada parcial da potência ativa em relação ao ângulo de tensão em todas as barras, exceto a *swing*.
- b - susceptância nas barras de carga.
- C_1 - derivada parcial da potência reativa em relação à tensão em todas as barras de geração, exceto a *swing*, com o sinal trocado.
- C_2 - derivada parcial da potência ativa em relação à tensão em todas as barras de geração, exceto a *swing*, com o sinal trocado.
- D_1 - derivada parcial da potência reativa em relação a susceptância das barras de geração, com o sinal trocado.

- D_1 - constante de amortecimento da máquina i.
- E - tensão nas barras de geração (no Capítulo 4, representa a tensão em todas as barras).
- F_1 - derivada parcial da potência reativa em relação a tensão nas barras de carga.
- F_2 - derivada parcial da potência ativa em relação a tensão nas barras de carga.
- F_4 - potência ativa injetada nas barras de geração.
- F_5 - potência ativa injetada nas barras sem fontes geradoras.
- F_6 - potência reativa injetada em todas as barras.
- f_1 - potência ativa em todas as barras.
- f_p - potência ativa injetada em todas as barras, exceto a swing.
- f_Q - potência reativa injetada nas barras de carga.
- G - Jacobiano reduzido do fluxo de carga usado no capítulo 3.

- D_1 - constante de amortecimento da máquina i.
- E - tensão nas barras de geração (no Capítulo 4, representa a tensão em todas as barras).
- F_1 - derivada parcial da potência reativa em relação a tensão nas barras de carga.
- F_2 - derivada parcial da potência ativa em relação a tensão nas barras de carga.
- F_4 - potência ativa injetada nas barras de geração.
- F_5 - potência ativa injetada nas barras sem fontes geradoras.
- F_6 - potência reativa injetada em todas as barras.
- f_1 - potência ativa em todas as barras.
- f_p - potência ativa injetada em todas as barras, exceto a *swing*.
- f_Q - potência reativa injetada nas barras de carga.
- G - Jacobiano reduzido do fluxo de carga usado no capítulo 3.

- H_3 - derivada parcial da potência reativa nas barras de geração em relação ao ângulo da tensão nas barras de carga.
- H_4 - derivada parcial da potência reativa nas barras de carga em relação ao ângulo da tensão nas barras de carga.
- I_1 - derivada parcial da potência ativa nas barras de geração em relação à tensão nas barras de geração.
- I_2 - derivada parcial da potência ativa nas barras de carga em relação à tensão nas barras de geração.
- I_3 - derivada parcial da potência reativa nas barras de geração em relação à tensão nas barras de geração.
- I_4 - derivada parcial da potência reativa nas barras de carga em relação à tensão nas barras de geração.
- J - Jacobiano utilizado para o fluxo de carga.
- J_r - Jacobiano reduzido usado no capítulo 5.
- J_1 - derivada parcial da potência ativa nas barras de geração em relação à tensão nas barras de carga.

- H_3 - derivada parcial da potência reativa nas barras de geração em relação ao ângulo da tensão nas barras de carga.
- H_4 - derivada parcial da potência reativa nas barras de carga em relação ao ângulo da tensão nas barras de carga.
- I_1 - derivada parcial da potência ativa nas barras de geração em relação à tensão nas barras de geração.
- I_2 - derivada parcial da potência ativa nas barras de carga em relação à tensão nas barras de geração.
- I_3 - derivada parcial da potência reativa nas barras de geração em relação à tensão nas barras de geração.
- I_4 - derivada parcial da potência reativa nas barras de carga em relação à tensão nas barras de geração.
- J - Jacobiano utilizado para o fluxo de carga.
- J_r - Jacobiano reduzido usado no capítulo 5.
- J_1 - derivada parcial da potência ativa nas barras de geração em relação à tensão nas barras de carga.

Letras Gregas

- α_m - ângulo de estabilidade.
- α_T - ângulo de impedância série da linha.
- α_S - ângulo da impedância *shunt*.
- δ_c - ângulo de estabilidade com influência da inércia.
- δ_{m1} - ângulo de estabilidade visto pela barra 1.
- δ_{m2} - ângulo de estabilidade visto pela barra 2.
- ΔP_G - variação de geração de potência ativa.
- ΔP_L - variação de carga ativa.
- ΔQ_G - variação de geração de potência reativa.
- ΔQ_L - variação de carga reativa.
- θ - $\arctg (Q/P)$
- λ_1 - autovalores de uma matriz A qualquer.

μ - autovetores associados aos autovalores de uma matriz genérica.

θ - ângulo da tensão em todas as barras (no Capítulo 3, θ representa a tensão em todas as barras, exceto a *swing*)

θ_G - ângulo da tensão nas barras de geração.

θ_L - ângulo da tensão nas barras de carga.

Outros:

Barra PV - Tipo de barra para a qual se especifica a potência ativa gerada e a tensão.

Barra PQ - Tipo de barra para a qual se especifica as potências ativa e reativa geradas, que são iguais a zero.

Barra *Swing* - Tipo de barra para a qual se especifica a tensão e seu ângulo. É a barra responsável pelo balanço de potência ativa do sistema.

RESUMO

Restrições econômicas e ecológicas têm limitado o investimento em novas usinas e linhas de transmissão de energia elétrica. Com os sistemas de potência trabalhando bastante carregados, o risco da ocorrência da instabilidade de tensão se acentua.

Neste trabalho estabeleceram-se as características operacionais do fenômeno do colapso de tensão, e sua similaridade e diferença em relação ao problema da estabilidade angular.

Foram desenvolvidos métodos para avaliar um ponto de operação do sistema quanto à proximidade da ocorrência do fenômeno. Os resultados foram comparados.

Finalmente, foi abordado o problema da prevenção do colapso.

ABSTRACT

Investments on new generators and transmission lines for electrical power systems have been limited due to economical and environmental constraints.

This dissertation established the operational characteristics of the voltage collapse phenomenon, as well as pointed out similarities and differences in relation to the angular stability problem.

Voltage collapse assessment methods were developed and the results compared.

Finally, the collapse prevention problem was mentioned.