

# Análise Estática de Segurança de Sistemas Elétricos de Potência

A. Simões Costa e R. Salgado

Setembro, 2002

# Sumário

<b>Apresentação</b>	<b>v</b>
<b>1 Introdução à Operação em Tempo Real de Sistemas de Potência</b>	<b>1</b>
1.1 Evoluções na Operação de Sistemas de Potência . . . . .	1
1.2 Restrições de Carga, Operação e Segurança - Estados de Operação . . . . .	2
1.3 Funções Componentes da Operação em Tempo Real de Sistemas de Potência	4
1.4 Configurações Típicas de Sistemas Computacionais para Centros de Operação	7
1.4.1 Requisitos . . . . .	7
1.4.2 Sistemas Não-Redundantes . . . . .	8
1.4.3 Sistemas Redundantes - Configuração Dual . . . . .	9
1.4.4 Sistemas Distribuídos, Redes Locais e Sistemas Abertos . . . . .	12
1.4.5 Sistemas Abertos . . . . .	13
<b>2 Estimação Estática de Estados em Sistemas de Potência</b>	<b>15</b>
2.1 Introdução . . . . .	15
2.2 A Estimação de Estados na Operação em Tempo Real . . . . .	15
2.2.1 Monitoração de Sistemas de Potência . . . . .	16
2.2.2 Subproblemas da EESP . . . . .	16
2.2.3 Classificação dos Estimadores de Estado . . . . .	17
2.3 O Modelo de Medição . . . . .	19
2.4 Método dos Mínimos Quadrados Ponderados . . . . .	20
2.5 Método dos Mínimos Valores Absolutos Ponderados . . . . .	21
2.6 Exercício . . . . .	21
<b>3 Método da Equação Normal</b>	<b>23</b>
3.1 Introdução . . . . .	23
3.2 O Problema de Mínimos Quadrados Ponderados . . . . .	23
3.2.1 Linearização do Modelo de Medição . . . . .	24
3.2.2 Método de Gauss-Newton . . . . .	25
3.2.3 A Equação Normal de Gauss . . . . .	26
3.2.4 Aspectos Computacionais . . . . .	26
3.2.5 Algoritmo . . . . .	27
3.3 Estimadores Desacoplados . . . . .	28
3.3.1 Estimadores Desacoplados no Algoritmo . . . . .	29
3.3.2 Estimadores Desacoplados no Modelo . . . . .	30
3.3.3 Estimador de Estados Linearizado . . . . .	31
3.4 Modelagem das Barras de Injeção Nula . . . . .	33

3.5	Exercícios . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Método Seqüencial-Ortogonal</b>	<b>37</b>
4.1	Introdução . . . . .	37
4.2	Descrição Geral do Método . . . . .	37
4.3	Rotações de Givens . . . . .	38
4.3.1	Forma Convencional . . . . .	40
4.3.2	Rotações Rápidas de Givens (Sem Raízes Quadradas) . . . . .	40
4.4	Aplicação do Método de Givens à EESP . . . . .	43
4.5	Inclusão de Restrições de Igualdade . . . . .	43
4.6	Exercícios . . . . .	45
<b>5</b>	<b>Estimação de Estados via Método da Matriz Aumentada</b>	<b>46</b>
5.1	Introdução . . . . .	46
5.2	Formulação do Método da Matriz Aumentada . . . . .	46
5.3	Inclusão de Restrições de Igualdade . . . . .	48
5.4	Considerações Finais . . . . .	49
5.5	Exercícios . . . . .	49
<b>6</b>	<b>Processamento de Medidas com Erros Grosseiros</b>	<b>50</b>
6.1	Introdução . . . . .	50
6.2	Detecção de Erros Grosseiros . . . . .	51
6.3	Identificação de Erros Grosseiros . . . . .	55
6.4	Recuperação de Medidas Portadoras de Erro Grosseiro . . . . .	59
6.5	O Método $\hat{b}$ . . . . .	62
6.6	Processamento de Erros Grosseiros Múltiplos . . . . .	62
6.6.1	Identificação por Eliminação . . . . .	63
6.6.2	Identificação Baseada em Testes de Hipóteses . . . . .	63
6.7	Processamento de Erros Grosseiros Usando o Método das Rotações de Givens	68
6.7.1	Detecção . . . . .	68
6.7.2	Identificação . . . . .	69
6.7.3	Remoção . . . . .	70
6.8	Exercícios . . . . .	71
<b>7</b>	<b>Observabilidade de Sistemas de Potência</b>	<b>79</b>
7.1	Introdução . . . . .	79
7.2	Observabilidade de Sistemas de Potência: Definições e Teoria . . . . .	80
7.2.1	Definição de Observabilidade . . . . .	80
7.2.2	Modelo de Medição Linearizado . . . . .	80
7.2.3	Observabilidade Algébrica e Observabilidade Numérica . . . . .	81
7.3	Método de Clements-Wollenberg para Análise de Observabilidade . . . . .	82
7.3.1	Introdução . . . . .	82
7.3.2	Definições Preliminares . . . . .	82
7.3.3	Observabilidade para Sistemas com Planos de Medição Formado por Medidas de Fluxos nas Linhas . . . . .	82
7.3.4	Observabilidade para Redes Elétricas em Planos de Medição Formado por Medidas de Injeção . . . . .	83

7.3.5	Observabilidade para Redes Elétricas com Medidas de Fluxo nas Linhas e Injeções nas Barras . . . . .	84
7.3.6	Comentários Finais sobre o Método de Clements e Wollenberg . . . . .	87
7.4	Observabilidade Topológica . . . . .	87
7.4.1	Modelo de Medição Desacoplado e Observabilidade $P - \delta$ e $Q - V$ . . . . .	87
7.4.2	Alguns Conceitos Topológicos Importantes . . . . .	88
7.5	Um Algoritmo para Determinação da Observabilidade Topológica . . . . .	90
7.5.1	Descrição Informal do Método . . . . .	90
7.6	Tratamento das Medidas de Tensão na Análise da Observabilidade Q-V . . . . .	93
7.7	Problemas Correlatos . . . . .	94
7.7.1	Medidas e Pares Críticos . . . . .	95
7.7.2	Estimação de Estados para Sistemas com Planos de Medição Deficientes . . . . .	95
7.8	Conclusões . . . . .	96
7.9	Exercícios . . . . .	96
<b>8</b>	<b>Configurador de Redes</b> . . . . .	<b>100</b>
8.1	Introdução . . . . .	100
8.2	Descrição da Técnica de Processamento para Configuração de Redes . . . . .	102
8.2.1	Configuração de Subestação . . . . .	102
8.2.2	Configuração de Rede . . . . .	102
8.2.3	Tabulação de Resultados . . . . .	102
8.3	Algoritmos para Configuração de Redes . . . . .	102
8.3.1	Terminologia e Convenções . . . . .	102
8.3.2	Algoritmo para Configuração de Subestações . . . . .	102
8.3.3	Exemplo . . . . .	103
8.3.4	Configuração da Rede . . . . .	105
8.4	Essencialidade de Ramos da Rede Elétrica . . . . .	106
<b>9</b>	<b>Representação do Sistema Externo</b> . . . . .	<b>108</b>
9.1	Introdução . . . . .	108
9.2	Equivalentes Externos . . . . .	108
9.2.1	Equivalente Ward Linear . . . . .	109
9.2.2	Equivalente de Ward Através de Eliminação de Gauss . . . . .	111
9.2.3	Cálculo das Injeções Equivalentes em Tempo Real . . . . .	111
9.2.4	Equivalente de Ward na Forma Não-Linear . . . . .	112
9.2.5	Algoritmo Para a Obtenção do Equivalente de Ward . . . . .	112
9.2.6	Equivalente de Ward $\times$ Representação da Potência Reativa . . . . .	113
9.2.7	Equivalente de Ward com retenção de Barras PV . . . . .	113
9.2.8	Equivalente de Ward Estendido . . . . .	114
9.2.9	Mudanças na Topologia do Sistema Externo . . . . .	116
9.2.10	Equivalente REI . . . . .	116
9.3	Representação Explícita do Sistema Externo . . . . .	117
9.3.1	Métodos Baseados no Fluxo de Potência . . . . .	119
9.3.2	Métodos Baseados na Estimação de Estados . . . . .	119

<b>10</b>	<b>Análise de Segurança de Sistemas de Potência</b>	<b>121</b>
10.1	Monitoração da Segurança . . . . .	121
10.2	Métodos para Análise Estática de Contingências . . . . .	121
10.2.1	Fluxo de Potência Linearizado . . . . .	121
10.2.2	Alterações na Matriz Admitância . . . . .	122
10.3	Análise de Sensibilidade Simplificada . . . . .	123
10.3.1	Alterações Simples . . . . .	124
10.3.2	Alterações Múltiplas . . . . .	124
10.3.3	Limitações da Análise de Sensibilidade Simplificada . . . . .	125
10.4	Fatores de Distribuição . . . . .	125
10.5	Análise de Sensibilidade Melhorada . . . . .	126
10.5.1	Alterações Simples . . . . .	126
10.5.2	Análise de Sensibilidade Aproximada como caso Particular da Análise Melhorada . . . . .	127
10.5.3	Alterações Múltiplas . . . . .	128
10.5.4	Detecção de Ilhamentos . . . . .	129
10.6	Método das Injeções Compensadoras . . . . .	130
10.7	Análise de Contingências via Fluxo de Potência Desacoplado Rápido . . . .	131
10.8	Contingências de Geração . . . . .	132

## **Análise de Segurança em Sistemas Elétricos de Potência**

*A. Simões Costa e R. Salgado*

Notas de Aula da disciplina EEL6301 - Análise de Segurança em Sistemas Elétricos de Potência, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA.