

Igor Ferreira Visconti

**Modelos de Cargas Baseados em Medições
para Simulações Dinâmicas em Sistemas Elétricos de
Potência**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Marco Aurélio Cavalcanti Pacheco

Co-orientadora: Karla Tereza Figueiredo Leite

Rio de Janeiro
12 de Abril de 2010

Igor Ferreira Visconti

**Modelos de Cargas Baseados em Medições
para Simulações Dinâmicas em Sistemas Elétricos de
Potência**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Eng^a Elétrica do Departamento de Eng^a
Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio.
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Marco Aurélio Cavalcanti Pacheco

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Profa. Karla Tereza Figueiredo Leite

Co-Orientadora

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Ricardo Bernardo Prada

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Luiz Felipe Willcox de Souza

Eletrobras CEPEL – UFRJ

Prof. Paulo Gomes

ONS

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 12 de abril de 2010

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

Igor Ferreira Visconti

Engenheiro Eletricista formado pela PUC-Rio em 2001, pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) desde 2002, com pós-graduação em Análise e Gerência de Projetos de Software em 2004, pelo CCE da PUC-Rio.

Ficha Catalográfica

Visconti, Igor Ferreira

Modelos de cargas baseados em medições para simulações dinâmicas em Sistemas Elétricos de Potência / Igor Ferreira Visconti; orientador: Marco Aurélio C. Pacheco; co-orientadora: Karla Tereza Figueiredo Leite. – 2010.

125 f.: il. (color.); 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Modelagem de carga. 3. Algoritmo genético. 4. Simulações dinâmicas. 5. Identificação de sistemas. 6. Estabilidade de tensão. 7. Transitórios eletromecânicos. 8. Qualidade de energia. I. Pacheco, Marco Aurélio C. II. Leite, Karla Tereza Figueiredo. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título..

CDD: 621.3

Dedicado aos meus pais, Jorge e Angela, à minha grande família e à Flora, que
torna minha vida mais colorida e calorosa.

Agradecimentos

À minha co-orientadora Karla Figueiredo, pelas aulas, pelo tempo dedicado a este trabalho e pela sua perspicácia nas questões do dia-a-dia.

Ao meu colega de trabalho e co-orientador, Luiz Felipe Willcox pela Amizade e pelo suporte técnico imprescindível no desenvolvimento e concepção deste projeto.

Aos meus amigos do Laboratório de Qualidade de Energia do CEPEL: Alex, Cesar e Leonardo, pelo inestimável apoio, amizade e profissionalismo.

Ao Engº Ricardo Ross por incentivar a realização deste mestrado, concomitante ao horário de trabalho no CEPEL.

Aos meus colegas de trabalho da CHESF, Janaina e Nóbyle, fundamentais ao bom andamento deste projeto de pesquisa.

Ao CEPEL por acreditar que o conhecimento é o maior investimento do nosso tempo.

Ao meu orientador Marco Aurelio Pacheco pelas aulas de Algoritmos Genéticos, que abriram as portas para um novo mundo.

Resumo

Visconti, Igor Ferreira; Pacheco, Marco Aurélio Cavalcanti. **Modelos de Carga Baseados em Medições para Simulações Dinâmicas em Sistemas Elétricos de Potência**. Rio de Janeiro, 2010. 125p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho descreve uma metodologia para modelagem de cargas elétricas, utilizando dados de tensão e corrente registrados durante distúrbios no sistema de potência. Estes modelos são utilizados na representação de subsistemas da rede elétrica em simulações computacionais que preveem o comportamento dinâmico do sistema de potência após perturbações em suas condições normais de operação. São apresentados resultados práticos da metodologia proposta, onde a carga é definida como um sistema cuja saída é a variação da potência consumida e a entrada é a variação da tensão, ambas medidas em barramentos de 69 kV da Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF), ponto de entrega de energia para concessionárias distribuidoras de energia do nordeste brasileiro. Estas distribuidoras são modeladas como cargas, supridas pelo sistema de transmissão da CHESF e todos os elementos consumidores de energia são agregados nestes modelos equivalentes, parametrizados para simular o maior número de contingências típicas medidas em cada um destes “barramentos de carga”. A técnica de estimação de parâmetros dos modelos de cargas é o Algoritmo Genético (AG) cujos resultados apresentaram precisão para a simulação de contingências de características bem distintas, caracterizando a abrangência alcançada no processo de identificação de sistemas. Ao final do trabalho são apresentadas curvas de desvios de potência ativa e reativa causadas por afundamentos de tensão, ambos registrados nos barramentos das subestações da CHESF. Estas curvas foram utilizadas para estimar os parâmetros dos modelos, obtidos individualmente para cada uma das subestações estudadas.

Palavras-chave

Modelagem de Carga; Algoritmo Genético; Simulações Dinâmicas; Identificação de sistemas; Transitórios Eletromecânicos; Qualidade de Energia.

Abstract

Visconti, Igor Ferreira; Pacheco, Marco Aurélio Cavalcanti (Advisor). **Measurement-based Load Modeling for Dynamic Simulations on Electric Power Systems**. Rio de Janeiro, 2010. 125p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work describes a measurement-based load modeling methodology, using voltage and current data registered during power system disturbances. These load models are used on computational simulations for predicting power system stability after disturbances of system operational points. Practical results are presented of the proposed methodology, defining load as a system whose output is power deviation from its operational state and input is voltage sags, both measured at 69 kV bus bars of São Francisco Hydroelectric Company (CHESF), points of common coupling (PCC) between CHESF and local distribution utilities. Therefore, distribution utilities are seen as loads supplied by CHESF's transmission system. All devices consuming power from the PCC are aggregated into an equivalent model, parameterized to simulate most typical contingencies measured by these 69kV load bars. Optimization technique used for load model parameter estimation is Genetic Algorithm (GA), showing his flexibility on implementation and good coverage and accuracy in the final results. At the end, it will be presented a set of active and reactive power curves during and after voltages sags, measured on CHESF's substations. These curves were used as estimation data to parameterize load models for each substation chosen.

Keywords

Measurement-based Load Modeling; Genetic Algorithms; Dynamic Simulations; System Identification; Electromechanical Effects; Power Quality.

Sumário

1 Introdução	16
1.1. Descrição do Problema	16
1.2. Motivação do Trabalho	17
1.3. Objetivos do Trabalho	20
1.4. Organização do Trabalho	21
2 Modelos de Carga	22
2.1. Definição: o que é carga?	22
2.2. Modelos Estáticos	24
2.2.1. Modelo Impedância Constante (Z)	24
2.2.2. Modelo Corrente Constante (I)	25
2.2.3. Modelo Potência Constante (P)	26
2.2.4. Modelo polinomial (ZIP)	26
2.2.5. Modelo exponencial	27
2.3. Modelos Dinâmicos	28
2.3.1. Motor de Indução	28
2.3.2. Modelo Autorregressivo MISO	31
2.3.3. Modelo Autorregressivo SISO	32
2.4. Modelos Híbridos	32
2.4.1. ZIP + Equações a diferenças	32
2.4.2. Exponencial + Motor de Indução	33
2.4.3. Exponencial + Equações a diferenças	34
2.4.4. ZIP + Motor de Indução	34
2.5. Modelos MISO (<i>Multiple-Input Single-Output</i>)	35
2.5.1. Modelo Polinomial em Função de Desvios de Frequência	35
2.5.2. Modelo Exponencial em Função de Desvios de Frequência	36
2.6. Sumário do Capítulo	36

3 Metodologia para Modelagem de Carga	37
3.1. Resumo do procedimento	38
3.2. Seleção de dados	39
3.2.1. Critérios de seleção de dados para modelagem de carga	42
3.3. Processamento de dados	43
3.3.1. Características dos Sinais de Tensão e Corrente	43
3.3.2. Transformada Discreta de Fourier	45
3.3.3. Componentes Simétricas de Tensão e Corrente	46
3.4. Escolha <i>a priori</i> : Modelo Dinâmico Híbrido	48
3.5. Estimação de Parâmetros: Representação do Problema com AG	49
3.5.1. Obtenção de um modelo híbrido de potência ativa	52
3.5.2. Obtenção de um modelo híbrido de potência reativa	54
3.6. Escolha <i>a priori</i> : Modelo Autorregressivo Linear	55
3.6.1. Obtenção de modelo autorregressivo para potência ativa	55
3.7. Sumário do Capítulo	58
4 Estudo de Casos	59
4.1. Visão geral dos dados	60
4.2. Estudo numa das subestações de 69 kV	61
4.2.1. Seleção dos dados	61
4.2.2. Obtendo um modelo da Potência Ativa	65
4.2.3. Obtendo um Modelo de Potência Reativa	66
4.3. Comparação com os modelos ZIP	67
4.4. Sumário do capítulo	71
5 Simulações de Transitórios Eletromecânicos	73
5.1. Estabilidade de Sistemas de Potência	73
5.2. Implementação do modelo autorregressivo no ANATEM	74
5.3. Resultados de uma simulação no ANATEM	75
5.4. Sumário do Capítulo	80
6 Conclusões e Trabalhos Futuros	81

7 Referências Bibliográficas	83
APÊNDICE I – Identificação de Sistemas	86
Conceitos Gerais	86
Sinais: Contínuos e Discretos	86
Sistemas Dinâmicos e Modelos Matemáticos	87
Discussão Filosófica: Realidade x Modelagem	88
Sistemas Lineares Discretos Invariantes no Tempo	89
Processo de Identificação de Sistemas	90
Escolha dos dados e variáveis de interesse	90
Escolha de uma estrutura de modelo	91
Validação do modelo	93
APÊNDICE II – Algoritmos Genéticos	94
Conceitos Básicos	94
Representação Binária e Real e Espaço de Busca	96
Função de Avaliação e Seleção	97
Operadores Genéticos	99
Crossover	99
Mutação	100
Parâmetros	101
Exemplo	102
APÊNDICE III – Resultados gráficos	105

Lista de figuras

Figura 1 – Diagrama esquemático dos sistemas de transmissão e subtransmissão	23
Figura 2 – Circuito equivalente estático do motor de indução	28
Figura 3 - Modelo Híbrido ZIP + motor de indução	34
Figura 4 - Diagrama esquemático da modelagem de cargas baseada em medição	39
Figura 5 - Diagrama da área de atuação da CHESF	40
Figura 6 - Esquema de envio de dados dos medidores para o servidor CHESF	41
Figura 7 - As 3 principais classes de VTCD: (a) monofásicas, (b) bifásicas e (c) trifásicas	41
Figura 8 - Exemplo de Formas de Ondas de Tensões entre Fase e Neutro	44
Figura 9 - Exemplo de Formas de Ondas de Correntes de linha	44
Figura 10 – TDF das tensões em 2 ciclos: antes (azul) e durante (vermelho) a VTCD	45
Figura 11 – TDF das correntes, nos mesmos 2 ciclos da figura anterior	46
Figura 12 - Curva de Potência Ativa em função da VTCD	47
Figura 13 - Curva da Potência Reativa em função da VTCD,	47
Figura 14 - Dados de validação com o modelo híbrido (azul) e a medição (vermelho)	53
Figura 15 – Modelo Híbrido predominantemente autorregressivo	54
Figura 16 - Modelo Híbrido para $Q(k)$ predominantemente autorregressivo	55
Figura 17 - Curvas medida e calculada de Potência Ativa em uma subestação	56
Figura 18 - Curvas medidas (vermelhas) e calculadas (azuis) de potência ativa	57
Figura 19 - Fragmento do sistema CHESF (áreas Leste e Centro)	59
Figura 20 - Função Objetivo em função das gerações	65
Figura 21 - Resultados modelo autorregressivo para potência ativa	66
Figura 22 - Resultados para o modelo Q autorregressivo	67
Figura 23 - P_{med} é a potência ativa medida, P_{arx} é o modelo autorregressivo no alto do gráfico e P_{zip} o modelo do ONS (30/12/08)	68
Figura 24 - Q_{med} é a potência reativa medida, Q_{arx} é o modelo autorregressivo no alto do gráfico e Q_{zip} o modelo do ONS (30/12/08)	68
Figura 25 - P_{med} é a potência ativa medida, P_{arx} é o modelo autorregressivo no	

alto do gráfico e Pzip o modelo do ONS (10/11/08)	69
Figura 26 - Qmed é a potência reativa medida, Qarx é o modelo autorregressivo no alto do gráfico e Qzip o modelo do ONS (10/11/08)	70
Figura 27 - Pmed é a potência ativa medida, Parx é o modelo autorregressivo no alto do gráfico e Pzip o modelo do ONS (03/02/09)	70
Figura 28 - Qmed é a potência reativa medida, Qarx é o modelo autorregressivo no alto do gráfico e Qzip o modelo do ONS (03/02/09)	71
Figura 29 - Curva da Tensão de Sequência Positiva medida em AGL 69kV	76
Figura 30 - Curvas de tensão de Sequência Positiva simuladas pelo ANATEM (curva vermelha com o modelo da Tabela 6 e curva azul com o modelo ZIP)	77
Figura 31 - Curva de Potência de Sequência Positiva medida em AGL 69kV	78
Figura 32 - Curvas de Potência Ativa de Sequência Positiva simuladas pelo ANATEM (curva vermelha com o modelo da Tabela 6 e curva azul com o modelo ZIP)	78
Figura 33 - Curva de Potência Reativa de Sequência Positiva medida em AGL 69kV	79
Figura 34 - Curvas de Potência Reativa de Sequência Positiva simuladas pelo ANATEM (curva vermelha com o modelo da Tabela 6 e curva azul com o modelo ZIP)	79
Figura 35 - Taxa de amostragem do sinal de uma fase de tensão no 69kV	87
Figura 36 – Exemplo de representação de um sistema SISO (<i>Single-Input Single-Output</i>)	88
Figura 37 – Diagrama esquemático das variáveis de interesse no modelo de carga	91
Figura 38 - Pseudo-código do Algoritmo Genético	94
Figura 39 - Exemplo de indivíduo (cromossoma)	95
Figura 40 - Exemplo de uma população, onde são mostrados 5 indivíduos	95
Figura 41 - Representação de um número real em um código binário	97
Figura 42 - Exemplo de crossover de um ponto	100
Figura 43 - Exemplo de mutação	101
Figura 44 - Função F6(x,y)	102
Figura 45 - Diagrama Fasorial da SE7	105
Figura 46 - Diagrama fasorial da SE3	106

Figura 47 - Estimação de parâmetros para o modelo de $P(k)$ da SE7	108
Figura 48 - Estimação de parâmetros para o modelo de $Q(k)$ de SE7	109
Figura 49 - Estimação de parâmetros do modelo de $P(k)$ da SE21	110
Figura 50 - Estimação de parâmetros do modelo de $Q(k)$ da SE21	111
Figura 51 - Estimação de parâmetros do modelo de $P(k)$ da SE4	112
Figura 52 - Estimação de Parâmetros de $Q(k)$ da SE4	113
Figura 53 - Estimação de parâmetros do modelo de $P(k)$ da SE12	114
Figura 54 - Estimação de parâmetros do modelo de $Q(k)$ da SE12	115
Figura 55 - Estimação de parâmetros do modelo de $P(k)$ da SE3	116
Figura 56 - Estimação de parâmetros do modelo de $Q(k)$ da SE3	117
Figura 57 - Estimação de parâmetros do modelo de $P(k)$ da SE18	118
Figura 58 - Estimação de parâmetros do modelo de $Q(k)$ da SE18	119
Figura 59 - Estimação de parâmetros do modelo de $P(k)$ da SE13	120
Figura 60 - Estimação de parâmetros do modelo de $Q(k)$ da SE13	121
Figura 61 - Estimação de parâmetros do modelo de $P(k)$ da SE2	122
Figura 62- Estimação de parâmetros do modelo de $Q(k)$ da SE2	123
Figura 63 - Estimação de parâmetros do modelo de $P(k)$ da SE9	124
Figura 64 - Estimação de parâmetros do modelo de $Q(k)$ da SE9	125

Lista de tabelas

Tabela 1 - Sumário de dados de subestações de Set/2008 a Set/2009	60
Tabela 2 - Dados do período Set/08 a Set/09 de MCO69	61
Tabela 3 - Dados reordenados pela severidade (Vz) da VTCD	62
Tabela 4 - Dados de Treinamento	64
Tabela 5 - Dados de validação	64
Tabela 6 - Modelos de cargas de subestações de 69 kV da CHESF	75
Tabela 7 - Sumário de resultados para a modelagem de cargas para as subestações selecionadas	107

Imagination is more important than knowledge...

Albert Einstein