



Sabrina da Silva Santos

**Agregação Dinâmica de Reguladores de
Tensão: Modelos 19, 20 e 21 do Anatem**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica pelo Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio.

Orientador: Eduardo J.S. Pires de Souza, D.Sc.

Rio de Janeiro
Março de 2005



Sabrina da Silva Santos

**Agregação Dinâmica de Reguladores de
Tensão: Modelos 19, 20 e 21 do Anatem**

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. Eduardo José Siqueira Pires de Souza
Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

Eng. Nilo José Pereira de Macedo, M.Sc.
FURNAS

Prof. Marcos Azevedo da Silveira
Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

Prof. Eduardo Jorge Pires Pacheco
Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 22 de março de 2005

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

Sabrina da Silva Santos

Graduou-se em Engenharia Elétrica na UERJ (Universidade do Estado do Rio de Janeiro) em 2002. Trabalha na Eletrobrás – Centrais Elétricas Brasileiras S.A, no cargo de Engenheira Eletricista, no Departamento de Gestão do Programa de Universalização.

Ficha Catalográfica

Santos, Sabrina da Silva

Agregação dinâmica de reguladores de tensão: modelos 19, 20 e 21 do Anatem / Sabrina da Silva Santos ; orientador: Eduardo José Siqueira Pires de Souza. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2005.

116 f.: il.; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Estabilidade transitória. 3. Equivalentes dinâmicos. 4. Geradores coerentes. 5. Agregação dinâmica. 6. Reguladores de tensão. I. Pires de Souza, Eduardo José Siqueira. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

A Deus, por ajudar-me a vencer esta importante etapa de minha vida.

Aos meus pais, Pedro Paulo e Lucinéa, pela extrema dedicação e carinho com que sempre me guiaram.

A Renato, meu esposo, pelo apoio incondicional, carinho e paciência.

A minha irmã, Fernanda, por sua amizade em todos os momentos.

As minhas tias, Lucília e Lucinda, pelas palavras de incentivo.

Ao Professor do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio, meu orientador, Eduardo J.S. Pires de Souza, por entender as dificuldades enfrentadas e pelo grande apoio na execução dos trabalhos.

Ao Professor do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio, Ricardo Prada, pelo incentivo e confiança.

Ao amigo David Delgado, pelo companheirismo.

Ao Engenheiro Nilo José Pereira de Macedo, pelos dados fornecidos e pelas sugestões.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pelo apoio financeiro.

Ao Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, CEPEL, pelos programas computacionais utilizados.

Resumo

Santos, Sabrina da Silva; Pires de Souza, Eduardo José Siqueira (Orientador). **Agregação Dinâmica de Reguladores de Tensão: Modelos 19, 20 e 21 do Anatem**. Rio de Janeiro, 2005. 116p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A agregação dinâmica de reguladores de tensão de unidades geradoras coerentes, visando o cálculo de equivalentes dinâmicos para estudos de estabilidade transitória de sistemas de energia elétrica, é o objeto desta dissertação. A metodologia empregada para o cálculo de equivalentes dinâmicos apresenta três etapas: a identificação de geradores coerentes, a redução estática da rede e a agregação dinâmica dos modelos das unidades geradoras coerentes. A agregação dinâmica de um grupo de geradores coerentes consiste em representar este grupo através de uma ou mais unidades geradoras equivalentes. As unidades geradoras coerentes podem ser representadas por diferentes modelos de máquina síncrona, regulador de tensão, estabilizador, turbina e regulador de velocidade. Haverá, então, um modelo equivalente para cada componente da unidade geradora. Os parâmetros lineares de cada modelo equivalente são ajustados numericamente através do método de Levenberg-Marquardt para resolver o problema de otimização multivariável. O objetivo principal é a determinação do melhor modelo equivalente para uma dada composição de modelos de reguladores de tensão num grupo de unidades geradoras coerentes. O sistema teste New England é utilizado para avaliar a metodologia empregada, observando-se os desempenhos dinâmicos dos equivalentes propostos. Serão considerados modelos do banco de dados de estabilidade do sistema elétrico brasileiro.

Palavras-chave

Estabilidade transitória; equivalentes dinâmicos; geradores coerentes; agregação dinâmica; reguladores de tensão.

Abstract

Santos, Sabrina da Silva; Pires de Souza, Eduardo José Siqueira (Advisor). **Dynamic Aggregation of Voltage Regulators: Anatem Models 19, 20 and 21**. Rio de Janeiro, 2005. 116p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This dissertation deals with the problem of dynamic aggregation of voltage regulators of coherent generating units to calculate dynamic equivalents for power system transient stability studies. The methodology used to calculate coherency-based dynamic equivalents has three basic steps: the identification of the coherent groups of generating units, the static reduction of the external network and the dynamic aggregation of coherent generating unit models. The dynamic aggregation of a group of coherent generating units consists of the representation of this group by one or more equivalent generating units. The coherent generating units can be represented by different models of synchronous machine, voltage regulator, stabilizer, turbine and speed governor. There will be an equivalent model for each component of the generating unit. The linear parameters of the equivalent models are numerically adjusted using the Levenberg-Marquardt method in order to solve the multivariable optimization problem. The main objective is the determination of the best equivalent model for a given composition of voltage regulator models in a group of coherent generating units. The New England system is used to evaluate the dynamic performance of the equivalents. The voltage regulator models considered in this work are in the Brazilian electrical system stability database. The swing curves of the internal system generators obtained with the equivalent system are compared with those obtained with the simulation of the complete system.

Keywords

Transient stability; dynamic equivalents; coherent generators; dynamic aggregation; voltage regulators.

Sumário

1	Introdução	16
1.1.	Considerações Gerais	16
1.2.	Desenvolvimento Histórico	18
1.3.	Objetivo e Estrutura da Dissertação	20
2	Agregação Dinâmica de Modelos de Reguladores de Tensão:	
	Apresentação Teórica	21
2.1.	Introdução	21
2.2.	Sistemas de Excitação	24
2.2.1.	Tipos	26
2.2.1.1.	Sistemas de Excitação com Excitatrizes de Corrente Contínua (CC)	27
2.2.1.2.	Sistemas de Excitação com Excitatrizes de Corrente Alternada (CA)	27
2.2.1.3.	Sistemas de Excitação com Excitatrizes Estáticas	27
2.2.2.	Sistema de Regulação de Tensão	27
2.3.	Metodologia de Agregação Dinâmica Aplicada a Reguladores de Tensão	29
2.4.	Implementação de Modelos de Reguladores de Tensão	34
2.4.1.	Modelo 19	34
2.4.2.	Modelo 20	40
2.4.3.	Modelo 21	42
2.5.	Determinação de Ganhos e Estimativas Iniciais	43
3	Agregação Dinâmica de Modelos de Reguladores de Tensão:	
	Resultados	46
3.1.	Introdução	46
3.2.	Análise de Desempenho do Método de Agregação Dinâmica	47
3.3.	Discussão dos Resultados	86

4 Cálculo de Equivalentes Dinâmicos	88
4.1. Introdução	88
4.2. Identificação dos Geradores Coerentes	90
4.2.1. Algoritmo de Agrupamento e Medida de Coerência	91
4.3. Redução Estática da Rede	92
4.4. Desempenho dos Equivalentes Dinâmicos	92
4.5. Conclusões	102
5 Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros	103
6 Referências Bibliográficas	105
Apêndice 1: Dados do Sistema Teste	107
Apêndice 2: Formulação REI	111
Apêndice 3: Método de Levenberg-Marquardt	114

Lista de figuras

Figura 1.1 – Representação do sistema de potência para o cálculo de equivalentes dinâmicos	17
Figura 2.1 – Modelo de unidade geradora	22
Figura 2.2 – Diagrama de blocos funcional do sistema de controle da excitação de um gerador síncrono	25
Figura 2.3 – Diagrama de blocos de um sistema de regulação de tensão	28
Figura 2.4 – Modelo do regulador de tensão 01 do ANATEM (MD01)	29
Figura 2.5 – Diagrama de blocos com a representação da influência do fator de ponderação na formação da tensão de campo do sistema equivalente	31
Figura 2.6 – Modelo da excitatriz do regulador de tensão 01 do ANATEM (MD01)	32
Figura 2.7 – Modelo do regulador de tensão 19 do ANATEM	34
Figura 2.8 – Modelo do regulador de tensão 20 do ANATEM	40
Figura 2.9 – Modelo do regulador de tensão 21 do ANATEM	42
Figura 3.1 – Diagramas de Bode das funções de transferência do modelo 19 de regulador de tensão: grupo (6,7). Equivalente – modelo 19.	48
Figura 3.2 – Diagramas de Bode das funções de transferência do modelo 19 de regulador de tensão: grupo (2,3). Equivalente – modelo 19.	49
Figura 3.3 – Diagramas de Bode das funções de transferência dos reguladores de tensão – modelos 1 e 21: grupo (6,7). Equivalente – modelo 1.	51
Figura 3.4 – Diagramas de Bode das funções de transferência dos reguladores de tensão – modelos 1 e 21: grupo (2,3). Equivalente – modelo 1.	52
Figura 3.5 – Diagramas de Bode das funções de transferência dos reguladores de tensão – modelos 19 e 21: grupo (6,7,4). Equivalente – modelo 19.	54
Figura 3.6 – Diagramas de Bode das funções de transferência dos reguladores de tensão – modelos 19 e 21: grupo (2,3). Equivalente – modelo 19.	55
Figura 3.7 – Diagramas de Bode das funções de transferência dos reguladores de tensão – modelos 19 e 21: grupo (6,7,4). Equivalente – modelo 21.	57
Figura 3.8 – Diagramas de Bode das funções de transferência dos reguladores de tensão – modelos 19 e 21: grupo (2,3). Equivalente – modelo 21.	58

- Figura 3.9 – Diagramas de Bode das funções de transferência dos reguladores de tensão – modelos 19 e 21: grupo (6,7,4). Equivalente – modelo 20. 60
- Figura 3.10 – Diagramas de Bode das funções de transferência dos reguladores de tensão – modelos 19 e 21: grupo (2,3). Equivalente – modelo 20. 61
- Figura 3.11 – Diagramas de Bode das funções de transferência dos reguladores de tensão – modelos 1, 19, 20 e 21: grupo (6,7,4,2,3). Equivalente – modelo 1. 63
- Figura 3.12 – Diagramas de Bode das funções de transferência dos reguladores de tensão – modelos 1, 19, 20 e 21: grupo (6,7,4,2,3). Equivalente – modelo 19. 65
- Figura 3.13 – Diagramas de Bode das funções de transferência dos reguladores de tensão – modelos 1, 19, 20 e 21: grupo (6,7,4,2,3). Equivalente – modelo 20. 67
- Figura 3.14 – Diagramas de Bode das funções de transferência dos reguladores de tensão – modelos 1, 19, 20 e 21: grupo (6,7,4,2,3). Equivalente – modelo 21. 69
- Figura 3.15 – Diagramas de Bode das funções de transferência dos reguladores de tensão – modelos 1 e 19: grupo (6,7,4,2,3). Equivalente – modelo 1. 71
- Figura 3.16 – Diagramas de Bode das funções de transferência dos reguladores de tensão – modelos 1 e 19: grupo (6,7,4,2,3). Equivalente – modelo 19. 73
- Figura 3.17 – Diagramas de Bode das funções de transferência dos reguladores de tensão – modelos 1 e 20: grupo (6,7,4,2,3). Equivalente – modelo 1. 75
- Figura 3.18 – Diagramas de Bode das funções de transferência dos reguladores de tensão – modelos 1 e 20: grupo (6,7,4,2,3). Equivalente – modelo 20. 77
- Figura 3.19 – Diagramas de Bode das funções de transferência dos reguladores de tensão – modelos 19 e 20: grupo (6,7,4,2,3). Equivalente – modelo 19. 79
- Figura 3.20 – Diagramas de Bode das funções de transferência dos reguladores de tensão – modelos 19 e 20: grupo (6,7,4,2,3). Equivalente – modelo 20. 81
- Figura 3.21 – Diagramas de Bode das funções de transferência dos reguladores de tensão – modelos 20 e 21: grupo (6,7,4,2,3). Equivalente – modelo 20. 83
- Figura 3.22 – Diagramas de Bode das funções de transferência dos reguladores de tensão – modelos 20 e 21: grupo (6,7,4,2,3). Equivalente – modelo 21. 85

Figura 4.1 – Etapas da metodologia para cálculo de equivalentes dinâmicos baseados em coerência	89
Figura 4.2 – Curvas de oscilação do gerador 1: grupos (6,7) e (2,3) com reguladores de tensão modelos 19. Equivalente – modelo 19.	94
Figura 4.3 – Curvas de oscilação do gerador 1: grupos (6,7) e (2,3) com reguladores de tensão modelos 1 e 21. Equivalente – modelo 1.	94
Figura 4.4 – Curvas de oscilação do gerador 1: grupos (6,7) e (2,3) com reguladores de tensão modelos 1 e 21. Equivalente – modelo 21.	95
Figura 4.5 – Curvas de oscilação do gerador 1: grupos (6,7,4) e (2,3) com reguladores de tensão modelos 19 e 21. Equivalente – modelo 19.	95
Figura 4.6 – Curvas de oscilação do gerador 8: grupos (6,7,4) e (2,3) com reguladores de tensão modelos 19 e 21. Equivalente – modelo 19.	96
Figura 4.7 – Curvas de oscilação do gerador 9: grupos (6,7,4) e (2,3) com reguladores de tensão modelos 19 e 21. Equivalente – modelo 19.	96
Figura 4.8 – Curvas de oscilação do gerador 1: grupo (6,7,4,2,3) com reguladores de tensão modelos 1, 19, 20 e 21. Equivalente – modelo 20.	97
Figura 4.9 – Curvas de oscilação do gerador 8: grupo (6,7,4,2,3) com reguladores de tensão modelos 1, 19, 20 e 21. Equivalente – modelo 20.	97
Figura 4.10 – Curvas de oscilação do gerador 9: grupo (6,7,4,2,3) com reguladores de tensão modelos 1, 19, 20 e 21. Equivalente – modelo 20.	97
Figura 4.11 – Curvas de oscilação do gerador 1: grupo (6,7,4,2,3) com reguladores de tensão modelos 1 e 19. Equivalente – modelo 1.	98
Figura 4.12 – Curvas de oscilação do gerador 1: grupo (6,7,4,2,3) com reguladores de tensão modelos 1 e 19. Equivalente – modelo 19.	98
Figura 4.13 – Curvas de oscilação do gerador 8: grupo (6,7,4,2,3) com reguladores de tensão modelos 1 e 19. Equivalente – modelo 1.	99
Figura 4.14 – Curvas de oscilação do gerador 8: grupo (6,7,4,2,3) com reguladores de tensão modelos 1 e 19. Equivalente – modelo 19.	99
Figura 4.15 – Curvas de oscilação do gerador 9: grupo (6,7,4,2,3) com reguladores de tensão modelos 1 e 19. Equivalente – modelo 1.	99
Figura 4.16 – Curvas de oscilação do gerador 9: grupo (6,7,4,2,3) com reguladores de tensão modelos 1 e 19. Equivalente – modelo 19.	100

Figura 4.17 – Curvas de oscilação do gerador 1: grupo (6,7,4,2,3) com reguladores de tensão modelos 1 e 20. Equivalente – modelo 20.	100
Figura 4.18 – Curvas de oscilação do gerador 8: grupo (6,7,4,2,3) com reguladores de tensão modelos 1 e 20. Equivalente – modelo 20.	101
Figura 4.19 – Curvas de oscilação do gerador 1: grupo (6,7,4,2,3) com reguladores de tensão modelos 19 e 20. Equivalente – modelo 20.	101
Figura 4.20 – Curvas de oscilação do gerador 8: grupo (6,7,4,2,3) com reguladores de tensão modelos 19 e 20. Equivalente – modelo 20.	102
Figura A.1.1 – Diagrama unifilar do Sistema New England	107
Figura A.2.1 – Injeções de potência complexa de um grupo com unidades geradoras coerentes	111
Figura A.2.2 – Inserção da malha REI no grupo de nós ativos	111
Figura A.2.3 – Representação da ligação interna em estrela da malha REI	112

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Parâmetros dos reguladores de tensão individuais (MD19) e equivalentes (MD19) dos grupos (6,7) e (2,3).	47
Tabela 3.2 – Parâmetros dos reguladores de tensão individuais (MD01, MD21) e equivalentes (MD01) dos grupos (6,7) e (2,3).	50
Tabela 3.3 – Parâmetros dos reguladores de tensão individuais (MD19, MD21) e equivalentes (MD19) dos grupos (6,7,4) e (2,3).	53
Tabela 3.4 – Parâmetros dos reguladores de tensão individuais (MD19, MD21) e equivalentes (MD21) dos grupos (6,7,4) e (2,3).	56
Tabela 3.5 – Parâmetros dos reguladores de tensão individuais (MD19, MD21) e equivalentes (MD20) dos grupos (6,7,4) e (2,3).	59
Tabela 3.6 – Parâmetros dos reguladores de tensão individuais (MD01, MD19, MD20, MD21) e equivalente (MD01) do grupo (6,7,4,2,3).	62
Tabela 3.7 – Parâmetros dos reguladores de tensão individuais (MD01, MD19, MD20, MD21) e equivalente (MD19) do grupo (6,7,4,2,3).	64
Tabela 3.8 – Parâmetros dos reguladores de tensão individuais (MD01, MD19, MD20, MD21) e equivalente (MD20) do grupo (6,7,4,2,3).	66
Tabela 3.9 – Parâmetros dos reguladores de tensão individuais (MD01, MD19, MD20, MD21) e equivalente (MD21) do grupo (6,7,4,2,3).	68
Tabela 3.10 – Parâmetros dos reguladores de tensão individuais (MD01, MD19) e equivalente (MD01) do grupo (6,7,4,2,3).	70
Tabela 3.11 – Parâmetros dos reguladores de tensão individuais (MD01, MD19) e equivalente (MD19) do grupo (6,7,4,2,3).	72
Tabela 3.12 – Parâmetros dos reguladores de tensão individuais (MD01, MD20) e equivalente (MD01) do grupo (6,7,4,2,3).	74
Tabela 3.13 – Parâmetros dos reguladores de tensão individuais (MD01, MD20) e equivalente (MD20) do grupo (6,7,4,2,3).	76
Tabela 3.14 – Parâmetros dos reguladores de tensão individuais (MD19, MD20) e equivalente (MD19) do grupo (6,7,4,2,3).	78
Tabela 3.15 – Parâmetros dos reguladores de tensão individuais (MD19, MD20) e equivalente (MD20) do grupo (6,7,4,2,3).	80

Tabela 3.16 – Parâmetros dos reguladores de tensão individuais (MD20, MD21) e equivalente (MD20) do grupo (6,7,4,2,3).	82
Tabela 3.17 – Parâmetros dos reguladores de tensão individuais (MD20, MD21) e equivalente (MD21) do grupo (6,7,4,2,3).	84
Tabela A.1.1 – Dados de barras	108
Tabela A.1.2 – Dados de linhas e transformadores	109
Tabela A.1.3 – Dados das máquinas (MD02 – Anatem)	110

Lista de Símbolos

V_T :	Tensão terminal do gerador.....	21
ω :	Velocidade angular.....	21
δ :	Ângulo do rotor.....	22
V_{REF} :	Tensão de referência.....	22
P_e :	Potência elétrica.....	22
P_m :	Potência mecânica.....	22
u :	Sinal de entrada do estabilizador.....	22
V_d, I_d :	Componentes de eixo direto de tensão e corrente na máquina síncrona.....	22
V_q, I_q :	Componentes de eixo em quadratura de tensão e corrente na máquina síncrona.....	22
e_{fd} :	Tensão de campo do gerador.....	29
L_{MIN} :	Limite mínimo do regulador de tensão.....	29
j :	Refere-se ao j-ésimo gerador.....	30
G_{Ej} :	Função de transferência do j-ésimo regulador de tensão.....	30
G_E^{eq} :	Função de transferência do regulador de tensão equivalente.....	30
W_j :	Fator de ponderação da j-ésima máquina síncrona.....	30
Y_{dfj} :	Admitância operacional da j-ésima máquina síncrona.....	30
Y_{DF}^{eq} :	Admitância operacional da máquina síncrona equivalente.....	30
ϕ_j :	Ângulo formado pelos eixos q_j e Q	30
θ :	Ângulo de Q em relação à tensão terminal.....	30
e_{FD} :	Tensão de campo equivalente.....	30
L_{MAXj} :	Limite máximo do j-ésimo regulador de tensão.....	32
L_{MAX}^{eq} :	Limite máximo do regulador de tensão equivalente.....	32
C_{ij} :	Medida de coerência.....	91
q :	Índice de qualidade da coerência.....	91