



Javier Ortega Sotomayor

Avaliação da Coerência entre Dispositivos de Controle no Problema de Fluxo de Potência

Dissertação de Mestrado

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

Orientador : Prof. Ricardo Bernardo Prada
Co-Orientador: Prof. João Alberto Passos Filho

Rio de Janeiro
Março de 2012



Javier Ortega Sotomayor

**Avaliação da Coerência entre Dispositivos de
Controle no Problema de Fluxo de Potência**

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 A. Passo Filho

Co-Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica -- UFJF

Prof. Ricardo Mota Henriques

CEPEL

Prof. Tatiana Mariano Lessa de Assis

UFRJ

Prof. José Eugenio Legal

Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico-PUC-Rio

Rio de Janeiro, 29 de março de 2012.

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

Javier Ortega Sotomayor

Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Nacional San Antonio Abad do Cusco – UNSAAC-Cusco (Cusco, Perú) em 2009.

Ficha Catalográfica

Ortega Sotomayor, Javier

Avaliação da coerência entre dispositivos de controle no problema de fluxo de potência / Javier Ortega Sotomayor, ; orientador: Ricardo Bernardo Prada ; co-orientador: João Alberto Passos Filho. – 2012.

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

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2012.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Controle de tensão. 3. Áreas de controle de tensão. 4. Equipamentos controladores de tensão. 5. Autovalores e autovetores. I. Prada, Ricardo Bernardo. II. Passos Filho, João Alberto. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Dedico este trabalho à memória
de meu querido papai:
Abel

Agradecimentos

A Deus, por tudo.

A minha amada família, minha mamãe Lucia, minha tia Nélida, meu irmão Paul, pelo amor, confiança, bons conselhos e apoio constante.

Agradeço especialmente, a meu orientador Ricardo Bernardo Prada pela orientação nos diferentes aspectos relacionados ao tema de pesquisa.

Meu profundo agradecimento ao meu orientador João Alberto Passos Filho pela confiança, permanente apoio, orientação e paciência nas diferentes etapas do desenvolvimento desta dissertação.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios financeiros concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos professores do departamento de Engenharia Elétrica; pelos ensinamentos.

Aos membros da comissão de Pós-graduação do DEE, pela oportunidade proporcionada de estudar meu mestrado na PUC-Rio, no Brasil.

A todos meus amigos do Laboratório de Sistemas de Energia, muito especialmente a Jelitza Ceballos, Erika Telles, Luz Angela Molina, Angela Padilla, Omar Galvéz, Jose Luis Choque, Juan Carlos Vargas e Oscar Cuaresma pelo apoio no desenvolvimento desta dissertação.

A meus amigos Luciana, Tatiana, Lorena, Américo, Juan Carlos, Amilcar, Ronald, Elder, Marco, Giancarlo, Martin, Presvitero, Emerson, Ricardo, Ernesto, Ivan e Wilfredo, pela companhia e amizade ao longo destes anos no Brasil.

Resumo

Sotomayor, Javier Ortega; Prada, Ricardo B. **Avaliação da Coerência entre Dispositivos de Controle no Problema de Fluxo de Potência**. Rio de Janeiro, 2012. 144p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Com o aumento do número de dispositivos de controle representados nos casos práticos, pode ser verificado o aparecimento de interações entre suas ações de controle. Quando estas interações não são coordenadas podem ocasionar a diminuição da eficiência do método de Newton-Raphson no problema de fluxo de potência, resultando em convergências lentas e frequentemente soluções oscilatórias ou até mesmo a divergência do método. Uma adequada identificação destas interações pode contribuir para tomar as medidas corretivas necessárias e assim evitar este tipo de problema. Com esse objetivo, identificam-se as interações entre múltiplos dispositivos de controle (mais de dois equipamentos de controle) a partir da análise dos autovalores e fatores de participação da matriz de sensibilidade de controles denominada [MSC]. Esta matriz, elaborada com base num modelo alternativo para a representação do controle de tensão local das barras PV, é obtida da redução da matriz Jacobiana expandida do problema de fluxo de potência. Dentro deste contexto, se verifica a presença de autovalores que apresentam informações similares sobre os dispositivos de controle com fortes interações entre suas ações de controle, desenvolvendo-se assim, um método baseado no conceito de colinearidade capaz de identificar e agrupar estes autovalores. Os resultados da avaliação do método desenvolvido aplicado em sistemas de pequeno e grande porte mostram a relevância e a viabilidade da utilização prática dos desenvolvimentos propostos neste trabalho.

Palavras-chave

Controle de tensão; áreas de controle de tensão; equipamentos controladores de tensões; autovalores e autovetores.

Abstract

Sotomayor, Javier Ortega; Prada, Ricardo B. (Advisor). **Interdependence of Voltage Control Equipments: Coherency Assessment in the Power Flow Problem**. Rio de Janeiro, 2012. 144p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The increasing number of control devices represented in practical cases, we can see the appearance of interactions between their control actions. When these interactions are not coordinated (conflict), the efficiency of Newton-Raphson method decrease to the power flow problem, the convergence is slow and the solutions are oscillatory. A correct identification of these interactions can help to take corrective actions and thus avoid this problem. With this objective, the identification of interactions between control devices (more than 2 control equipment) is established from the modal analysis of the sensitivity matrix [MSC]. This sensitivity matrix [MSC] is developed in based to alternative model to represent the local voltage control of the PV buses. This [MSC] is obtained from the reduction of the Jacobean matrix expanded of power flow problem. Within this context, it also checks for the presence of eigenvalues that have similar information about the significant interactions between control devices, thus developing a method based on the use index of sensitivity matrix [MSC] and concept of collinearity able to identify and group these eigenvalues. The results of the evaluation method applied to systems designed for small and large show the relevance and feasibility of practical use of proposed developments in this work.

Keywords

Voltage control; voltage control areas; voltage controller equipments; eigenvalues and eigenvectors.

Sumário

Lista de Tabelas	11
Lista de Figuras	14
Abreviaturas e Siglas	16
1 Introdução	18
1.1 Considerações Gerais	18
1.2 Objetivo	20
1.3 Estrutura da Dissertação	21
2 Matriz de Sensibilidade de Controles.....	22
2.1 Considerações Iniciais	22
2.2 Representação Convencional do Controle Local de Tensão das barras PV no Problema de Fluxo de Potência [3].....	22
2.3 Representação do Controle Local e Remoto de Tensão das barras PV no Problema de Fluxo de Potência [7].....	23
2.3.1 Controle Local de Tensão das Barras PV (CLT)	23
2.3.2 Controle Remoto de Tensão das Barras PV (CRT).....	27
2.4 Modelo Utilizado para a Representação das Barras PV no Problema de Fluxo de Potência [6]	29
2.5 Matriz de Sensibilidade de Controles incluindo o Modelo utilizado para a Representação das Barras PV no problema de FP	32
2.5.1 Sistema de Equações Linearizadas.....	32
2.5.2 Aplicação em Sistema-Teste	34
2.6 Identificação de Interações entre Dispositivos de Controle com base na Matriz [MSC].....	38
2.6.1 Autopropriedades: Autovalores e Autovetores	38
2.6.2 Método de Identificação de Interações entre Dispositivos de Controle	41

2.6.3	Algoritmo para a Identificação de interações entre Dispositivos de Controle	44
2.7	Resultados do Método de Identificação de Interações entre Dispositivos de Controle	45
2.7.1	Sistema IEEE 14 Barras.....	46
2.7.2	Sistema de 28 Barras	52
2.7.3	Sistema <i>New England</i> 39 Barras	57
2.7.4	Sistema S/ SE Brasileiro 730 Barras	62
2.7.5	Sistema Duplo de 14 Barras.....	67
3	Identificação e Agrupamento dos Autovalores que possuem Informações Similares sobre as Interações dos Dispositivos de Controle	80
3.1	Considerações Iniciais	80
3.2	Método de Identificação e Agrupamento dos Autovalores por Índices de Sensibilidade e Conceito de Colinearidade	81
3.3	Algoritmo de Identificação e Agrupamento dos Autovalores	89
3.4	Resultado do Método de Identificação e Agrupamento de Autovalores ...	92
3.4.1	Sistema de 28 Barras	92
3.4.2	Sistema <i>New England</i> 39 Barras	99
3.4.3	Sistema S/SE Brasileiro 730 Barras	108
3.4.4	Sistema Duplo de 14 Barras.....	112
4	Conclusões	121
4.1	Considerações Iniciais	121
4.2	Trabalhos Futuros	123
5	Referências Bibliográficas	124
	Apêndice A – Revisão do Método de Newton-Raphson para Solução do Fluxo de Potência	127
A.1	Considerações Iniciais	127
A.2	Método de <i>Newton-Rapshon</i>	128

Apêndice B – Revisão do Método de Identificação e Análise da Interação dos Dispositivos de Controle [2]	133
B.1 Considerações Iniciais	133
B.2 Descrição do Método.....	133
B.2.1 Análise Modal da Matriz de Sensibilidade de Controles.....	135

Apêndice C – Arquivos de Dados de Entrada para o Programa Desenvolvido no Ambiente MATLAB	138
C.1 Sistema-Teste IEEE 14 Barras	138
C.2 Sistema-Teste 28 Barras	139
C.3 Sistema-Teste <i>New England</i> 39 Barras.....	141
C.4 Sistema Duplo 14 Barras	144

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Conjunto de dados e incógnitas do Diagrama Unifilar do Sistema de 3 Barras.....	25
Tabela 2.2 – Ponto de Operação do Sistema-Teste de 5 Barras.....	35
Tabela 2.3 – ΔX Após do Aumento de 0,01 pu na Barra 3.....	37
Tabela 2.4 – Ponto de Operação do Sistema IEEE 14 Barras	46
Tabela 2.5 – Autovalores da Matriz [MSC] do Sistema 14 Barras	48
Tabela 2.6 – Resultados do Menor Autovalor ($\lambda_1 = 0,020$) da Matriz [MSC].....	48
Tabela 2.7 – Resultados do Menor Autovalor ($\lambda_1 = 0,02$) da Matriz [M] em função da Submatriz [A']	51
Tabela 2.8 – Características Principais do Sistema 28 Barras	52
Tabela 2.9 – Acoplamentos entre os Dispositivos de Controle nas duas Áreas do Sistema 28 Barras.....	53
Tabela 2.10 – Autovalores da Matriz [MSC] do Sistema 28 Barras	54
Tabela 2.11 – Fatores de Participação para os Autovalores selecionados	55
Tabela 2.12 – Características Principais do Sistema <i>New England</i> 39.....	57
Tabela 2.13 – Acoplamentos entre os Dispositivos de controle em duas Áreas do Sistema 39 Barras.....	58
Tabela 2.14 – Autovalores da Matriz [MSC] do Sistema 39 Barras	58
Tabela 2.15 – Fatores de Participação para os Autovalores λ_4 até λ_8	61
Tabela 2.16 – Características Principais do Sistema S/SE Brasileiro 730 Barras... ..	62
Tabela 2.17– Autovalores da Matriz [MSC] do Sistema 730 Barras	64
Tabela 2.18 – Acoplamentos entre os Dispositivos de Controle em duas Áreas do Sistema Duplo de 14 Barras - Etapa 1.....	70
Tabela 2.19 – Ponto de Operação do Sistema Duplo de 14 Barras	70
Tabela 2.20 – Autovalores da Matriz [MSC] do Sistema Duplo 14 Barras – Etapa 1	71
Tabela 2.21 – Avaliação da Convergência do Sistema Duplo de 14 Barras –Etapa 1	73

Tabela 2.22 – Potência Reativa dos Geradores analisados - Etapa 1	73
Tabela 2.23 – Acoplamentos entre os Dispositivos de Controle nas duas nas duas Áreas Sistema Duplo de 14 Barras - Etapa 2	74
Tabela 2.24 – Autovalores da Matriz [MSC] do Sistema Duplo 14 Barras – Etapa 2	76
Tabela 2.25 – Avaliação da Convergência do Sistema Duplo de 14 Barras – Etapa 2	78
Tabela 2.26 – Potência Reativa dos Geradores e tapes dos LTCs analisados - Etapa 2	79
Tabela 3.1 – Autovalores da Matriz [MSC] do Sistema Duplo 14 Barras – Etapa 1	84
Tabela 3.2 – Faixas e Cores para os Valores de IC	87
Tabela 3.3 – Menores Autovalores da Matriz [MSC] do Sistema 28 Barras.....	93
Tabela 3.4 – Fatores de Participação para os Autovalores Seleccionados	93
Tabela 3.5 – Índices de Sensibilidade dos Dispositivos de Controle obtidas com a Matriz [MSC ₄].....	94
Tabela 3.6 – Índice de Sensibilidade dos Dispositivos de Controle calculadas a partir das Matrizes [MSC ₄] _{ki} obtidas pela contribuição de cada Autovalor	95
Tabela 3.7 – Índices de Colinearidade entre as Sensibilidades das Tabelas 3.5 Vs.3.6	96
Tabela 3.8 – Índice de Sensibilidade obtidas pela aplicação do Critério a).....	98
Tabela 3.9 – Características Principais do Sistema New England 39 Barras	100
Tabela 3.10 – Menores Autovalores da Matriz [MSC] do Sistema 39 Barras....	101
Tabela 3.11 – Fatores de Participação para os Autovalores Seleccionados	101
Tabela 3.12 – Índices de Sensibilidade dos Dispositivos de Controle obtidas com a Matriz [MSC ₄]	102
Tabela 3.13 – Índice de Sensibilidade dos Dispositivos de Controle calculadas a partir das Matrizes [MSC ₄] _{ki} obtidas pela contribuição de cada Autovalor.....	103
Tabela 3.14 – Índices de Colinearidade entre as Sensibilidades das Tabelas 3.12 Vs.3.13.....	104
Tabela 3.15 – Índice de Sensibilidades obtidas pela aplicação do Critério a)	107
Tabela 3.16 – Características Principais do Sistema S/SE Brasileiro	

730 Barras.....	108
Tabela 3.17 – Índices de Colinearidade entre as Sensibilidades de x_{λ_i} vs. y_{λ_i}	110
Tabela 3.18 – Menores Autovalores da Matriz [MSC] do Sistema de Duplo 14 Barras - Etapa 2.....	113
Tabela 3.19 – Fatores de Participação para os Autovalores Selecionados	113
Tabela 3.20 – Índices de Sensibilidade dos Dispositivos de Controle obtidas com a Matriz [MSC ₄].....	114
Tabela 3.21 – Índice de Sensibilidade dos Dispositivos de Controle calculadas a partir das Matrizes [MSC ₄] _{λ_i} obtidas pela contribuição de cada Autovalor.....	115
Tabela 3.22 – Índices de Colinearidade entre as Sensibilidades das Tabelas 3.20 Vs.3.21	115
Tabela 3.23 – Índice de Sensibilidade dos Dispositivos de Controle utilizando a Matriz [MSC ₄] _{$\lambda_1+\lambda_4$}	118
Tabela 3.24 – Índice de Sensibilidade dos Dispositivos de controle utilizando a matriz [MSC ₄] _{$\lambda_2+\lambda_3$}	119
Tabela 3.25 – Índices de Colinearidade entre as Sensibilidades das Tabelas 3.20 Vs.3.23	119
Tabela 3.26 – Índices de Colinearidade entre as Sensibilidades das Tabelas 3.20 Vs.3.24	120

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Diagrama Unifilar do Sistema de 3 barras e 3 circuitos.....	25
Figura 2.2 – Diagrama Unifilar do Sistema-Teste de 5 Barras	35
Figura 2.3 – Fluxograma do Algoritmo para a Identificação de Interações entre Dispositivos de Controle	45
Figura 2.4 – Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 14 Barras	46
Figura 2.5 – Potência Reativa gerada pelas Máquinas 1, 2 e 3 em função à V_2 ...	51
Figura 2.6 – Diagrama Unifilar do Sistema 28 Barras.....	52
Figura 2.7 – Mode-Shape de λ_1 de [MSC] do Sistema de 28 Barras.....	55
Figura 2.8 – Mode-Shape de λ_3 de [MSC] do Sistema de 28 Barras.....	56
Figura 2.9 – Diagrama Unifilar do Sistema <i>New England</i> 39 Barras.....	57
Figura 2.10 – Fatores de Participação de λ_1 , λ_2 e λ_3 de [MSC] do Sistema New England	59
Figura 2.11 – Mode-Shape de λ_1 de [MSC] do Sistema de <i>New England</i>	60
Figura 2.12 – Mode-Shape de λ_2 de [MSC] do Sistema de <i>New England</i>	60
Figura 2.13 – Mode-Shape de λ_3 de [MSC] do Sistema de <i>New England</i>	60
Figura 2.14 – Topologia da Região do Área 1 que indica os Acoplamentos dos geradores G_{449} , G_{731} , G_{732}	63
Figura 2.15 – Topologia da Região do Área 5 que indica os Acoplamentos dos geradores G_{567} , G_{734} , G_{733}	63
Figura 2.16 – Fatores de Participação de λ_1 e λ_3 de [MSC] do Sistema 730 Barras	65
Figura 2.17 – Mode-Shape de λ_1 e λ_3 de [MSC] do Sistema 730 Barras	65
Figura 2.18 – Fatores de Participação de λ_2 e λ_4 de [MSC] do Sistema de 730 Barras	66
Figura 2.19 – Mode-Shape de λ_2 e λ_4 de [MSC] do Sistema 730 Barras.....	66
Figura 2.20 – Diagrama Unifilar do Sistema Duplo de 14 Barras	67
Figura 2.21 – Diagrama Unifilar do Sistema duplo de 14 Barras - Etapa 1	68
Figura 2.22 – Diagrama Unifilar do Sistema Duplo de 14 Barras – Etapa 2	69
Figura 2.23 – Fatores de Participação de λ_1 e λ_2 de [MSC] do Sistema Duplo	

14 Barras - Etapa 1.....	72
Figura 2.24 – Mode-Shape de λ_1 e λ_2 de [MSC] do Sistema Duplo 14 Barras - Etapa 1.....	72
Figura 2.25 – Fatores de Participação de λ_1 e λ_4 de [MSC] do Sistema Duplo 14 Barras - Etapa 2.....	76
Figura 2.26 – Mode-Shape de λ_1 e λ_4 de [MSC] do Sistema Duplo 14 Barras - Etapa 2.....	77
Figura 2.27 – Fatores de Participação de λ_2 e λ_3 de [MSC] do Sistema Duplo 14 barras - Etapa 2	77
Figura 2.28 – Mode-Shape de λ_2 e λ_3 de [MSC] do Sistema Duplo 14 Barras - Etapa 2.....	78
Figura 3.1 – Diagrama Unifilar do Sistema Duplo de 14 Barras - Etapa 1.....	83
Figura 3.2 – Fluxograma do Algoritmo de Identificação e Agrupamento de Autovalores	91
Figura 3.3 – Diagrama Unifilar do Sistema 28 Barras.....	93
Figura 3.4 – Diagrama Unifilar do Sistema New England 39 Barras.....	100
Figura 3.5 – Diagrama Unifilar Parcial do S/SE Brasileiro 730 de Barras.....	109
Figura 3.6 – Diagrama Unifilar do Sistema Duplo de 14 Barras	112

Abreviaturas e Siglas

ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
ONS	Operador Nacional do Sistema
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SEPs	Sistemas Elétricos de Potência
LTC	Load Tap Changer
CER	Compensador Estático de Reativos
HVDC	Corrente Contínua em Alta Tensão
CLT	Controle Local de tensão
CRT	Controle Remoto de Tensão
AS	Ajuste Simultâneo
<i>FP</i>	Fator de Participação
P	Potência Ativa
Q	Potência Reativa
S/SE	Sul / Sudeste
θ	Ângulo da Tensão
V	Módulo da Tensão
ΔP	Variação incremental de potência ativa
ΔQ	Variação incremental de potência reativa
$\Delta \theta$	Variação incremental do ângulo da tensão
ΔV	Variação incremental do módulo da tensão
ΔQ_G	Variação incremental de potência reativa do gerador
[J]	Matriz Jacobiana
[A]	Submatriz da matriz Jacobiana expandida
[B]	Submatriz da matriz Jacobiana expandida
[C]	Submatriz da matriz Jacobiana expandida
[D]	Submatriz da matriz Jacobiana expandida
$\partial P / \partial \theta$	Derivada parcial da potência ativa em relação ao ângulo da tensão
$\partial P / \partial V$	Derivada parcial da potência ativa em relação ao módulo da tensão

$\partial P/\partial t$	Derivada parcial da potência ativa em relação ao tape de um LTC
$\partial P/\partial Q_G$	Derivada parcial da potência ativa em relação à potência reativa gerada por um gerador ou compensador síncrono
$\partial Q/\partial \theta$	Derivada parcial da potência reativa em relação ao ângulo da tensão
$\partial Q/\partial V$	Derivada parcial da potência reativa em relação ao módulo da tensão
$\partial Q/\partial t$	Derivada parcial da potência reativa em relação ao tape de um LTC
$\partial Q/\partial Q_G$	Derivada parcial da potência reativa em relação à potência reativa gerada por um gerador ou compensador síncrono
IC	Índice de Colinearidade
IS	Índice de Sensibilidade
λ	Autovalor
φ	Autovetor à direita
ψ	Autovetor à esquerda
[MSC]	Matriz de sensibilidade de controles
[MSC ₁]	Submatriz 1 da matriz de sensibilidade de controles inversa
[MSC ₂]	Submatriz 2 da matriz de sensibilidade de controles inversa
[MSC ₃]	Submatriz 3 da matriz de sensibilidade de controles inversa
[MSC ₄]	Submatriz 4 da matriz de sensibilidade de controles inversa