



Marcelo de Melo Araújo

**Método de Alocação de Custos de Suporte de
Potência Reativa Baseado
em Leis de Circuitos**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Ricardo Bernardo Prada
Co-orientador: Osvaldo Ronald Saavedra Mendez

Rio de Janeiro, março de 2007



Marcelo de Melo Araújo

**Método de Alocação de Custos de Suporte
de Potência Reativa Baseado em Leis de
Circuitos**

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.

Dr. Ricardo Bernardo Prada

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

Dr. Osvaldo R. Saavedra Mendez

Co-Orientador

UFMA

Dr. Jose Antonio Jardini

USP

Dra. Katia Campos de Almeida

UFSC

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico

Rio de Janeiro, 23 de março de 2007

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

Marcelo de Melo Araújo

Graduou-se em Engenharia Elétrica na PUC-Rio em 2004. Dedicado a tempo parcial à pesquisa em Sistemas de Energia Elétrica na PUC-Rio, Brasil.

Ficha catalográfica

Araújo, Marcelo de Melo

Método de alocação de custos de suporte de potência reativa baseado em leis de circuitos / Marcelo de Melo Araújo ; orientador: Ricardo Bernardo Prada ; co-orientador: Osvaldo Ronald Saavedra Mendez. – 2007.

130 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Serviços auxiliares. 3. Alocação de custos. 4. Suporte de potência reativa. 5. Teoria de circuitos. I. Prada, Ricardo Bernardo Prada. II. Saavedra Mendez, Osvaldo Ronald. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

A meus pais, Euclides e Francisca
pelo amor, apoio e confiança.

Agradecimentos

A Deus.

À minha mãe Francisca Monteiro de Melo Araújo, que me permitiu em todos os sentidos a conclusão do mestrado.

Ao meu pai Euclides Cabral Araújo, por sempre acreditar em meu sucesso e administrar minha ausência.

A toda minha família pelo amor e pelo exemplo de superação.

À Sabrina pelo amor, incentivo e amizade.

Muito especialmente, agradeço ao meu orientador Ricardo Bernardo Prada por me depositar confiança permitindo a realização da pesquisa na UFMA, e pelo apoio decisivo nos seminários de acompanhamento.

Ao meu co-orientador Osvaldo Saavedra (UFMA), pela amizade, confiança e pelas colaborações para o desenvolvimento da dissertação.

Aos professores José Eduardo Pessanha e Maria da Guia da Silva por colaborarem para o desenvolvimento de uma boa pesquisa.

Ao CNPQ e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ser realizado.

A todos os amigos do curso de Pós - Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio, muito especialmente a Jorge Lafitte e Marcel René, e aos amigos da UFMA: Yuri Molina, Carlos Portugal, Alex Paz, Aniceto Pereira Neto, Bartolomeu Ferreira Júnior, Fernando Henrique Pinheiro, Agnelo Coelho, Fábio Mendes, Carlos Henrique Vieira e Júlio César Nascimento.

Resumo

Araújo, Marcelo de Melo. **Método de Alocação de Custos de Suporte de Potência Reativa Baseado em Leis de Circuitos**. Rio de Janeiro, 2007. 130p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Com a implantação do novo modelo econômico nos sistemas de potência, a justa remuneração das empresas provedoras de serviços ancilares tem se tornado um assunto grande importância. O suporte de potência reativa, por se tratar também de um serviço ancilar, está inserido neste contexto. Desta forma, a factível identificação dos agentes beneficiários pelo suporte, bem como as proporções deste beneficiamento podem implicar em um mecanismo viável de remuneração para os custos de cada fonte provedora. Este trabalho apresenta um método de alocação de custos pelo suporte de potência reativa baseado nos princípios fundamentais da teoria de circuitos elétricos, buscando determinar a contribuição de potência reativa de cada fonte para cada barra de carga. Para isto, é sugerida uma modelagem de fontes de tensão, que permite levar em conta a natureza local da relação Q-V, proporcionando uma abordagem simples e clara do problema. Complementarmente é apresentado um método de alocação das perdas reativas em cada ramo de transmissão entre as fontes provedoras de potência reativa. Para validar o método proposto, são realizados testes em sistemas de potência de pequeno e médio porte, apresentado as parcelas de contribuição de cada fonte de potência reativa para cada carga, e adicionalmente para as perdas reativas em cada ramo de transmissão. Comparações são estabelecidas com um método existente, onde é constatado que o método proposto apresenta maior coerência com as propriedades elétricas dos sistemas de potência, destacando-se a verificação clara da natureza local do consumo de potência reativa. Em relação aos resultados da alocação de perdas reativas, verifica-se que o método serve como indicativo sobre o uso da rede de transmissão por parte de cada fonte de potência reativa.

Palavras - chave

Serviços ancilares; alocação de custos; suporte de potência reativa; teoria de circuitos.

Abstract

Araújo, Marcelo de Melo. **Reactive Power Support Cost Allocation Method Based on Circuit Laws**. Rio de Janeiro, 2007. 130p. Master Dissertation - Electrical Engineering Department, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

After implantation of power systems' new economic model, a fair remuneration strategy of ancillary services suppliers had become an important issue. Reactive power support is also an ancillary service, thus, it belongs to this context. Then, identification of service beneficiaries as well as the benefit proportions may take a feasible remuneration mechanism for each source. This work presents a reactive power support cost allocation method based on fundamental principles of circuit theory, where reactive power contribution from each source to each load is calculated. This method suggests a modeling of voltage sources, which takes into account the Q-V relationship, providing a simple and clear treatment of the problem. Additionally, a reactive loss allocation method to each branch is presented. To validate the proposed method, tests with small and medium size systems are realized. So, there are presented results of reactive power demand and transmission losses allocation into systems' sources. Comparisons with an existent method are established, when we can verify that the proposed method brings more coherence with the electrical properties of power systems and the local nature of reactive power consumption. In the other hand, results of reactive losses allocation can indicate the transmission network usage by each reactive power source.

Key-Words

Ancillary services; cost allocation; reactive power support; circuit theory.

Sumário

Lista de Tabelas	11
Lista de Figuras	13
1 Introdução.....	15
1.1 Generalidades	15
1.2 Suporte de Potência Reativa como Serviço Ancilar.....	17
1.3 Objetivo do Trabalho	18
1.4 Estado da Arte	19
1.5 Organização da Dissertação.....	21
2 O Problema da Alocação de Custos do Suporte de Potência Reativa	23
2.1 Introdução.....	23
2.2 Descrição do Problema	23
2.3 Custo pelo Fornecimento de Suporte de Potência Reativa	25
2.3.1 Capacidade de Geração de Potência Reativa em Geradores Síncronos	25
2.3.2 Custo da Produção de Potência Reativa (Jin Zhong; Bhattacharya, 2002a).....	28
2.4 Estratégias de Remuneração – Exemplos.....	30
2.4.1 Estados Unidos (Jin Zhong; Bhattacharya, 2002b)	30
2.4.2 Reino Unido (Jin Zhong; Bhattacharya, 2002b)	31
2.4.3 Austrália (Jin Zhong; Bhattacharya, 2002b)	31
2.4.4 Brasil (ONS, 2003)	32
2.5 Conclusões do Capítulo.....	32

3	Métodos de Alocação de Perdas e Demandas de Potência Baseados em Leis de Circuitos	34
3.1	Introdução.....	34
3.2	Alocação de Perdas Ativas Baseada em Injeções de Correntes (Unsihuay; Saavedra, 2006)	34
3.3	Alocação de Demandas pelo Princípio da Divisão Proporcional (Bialek, 1996).....	36
3.3.1	Algoritmo <i>downstream-looking</i>	37
3.3.2	Extensão para alocação de potência reativa.....	40
3.4	Método da Matriz Ybarra Modificada (When-Chen Chu et al., 2004)	41
3.5	Discussão Acerca dos Métodos e Conclusões	44
4	Método Proposto	46
4.1	Introdução.....	46
4.2	Aplicação do Teorema da Superposição – Separação do Ponto de Operação por Fontes de Tensão Equivalentes.....	47
4.3	Alocação de Demandas de Potência Reativa.....	51
4.4	Alocação de Perdas Reativas.....	55
4.5	Áreas de Influência de Geradores / Compensadores	60
4.6	Comentários do Capítulo	61
5	Simulações e Resultados	63
5.2	Introdução.....	63
5.3	Exemplo I: Sistema de cinco Barras – Análises e Comparações	63
5.3.1	Análise de Desempenho do Método Frente a Alterações no Ponto de Operação	70
5.3.1.1	Caso 1: Alterações no carregamento	71
5.3.1.2	Caso II: Alterações no Perfil de Tensão	78
5.4	Exemplo II: Sistema IEEE - 30 – Análises e Comparações.....	82
5.4.1	Análise de Desempenho do Método – Inserção de Novas Fontes.....	89

5.5 Exemplo III: Sistema IEEE-118 – Determinação das Áreas de Influência.....	94
5.5.1 Estabelecimento dos Limites das Áreas de Influência	95
6 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	100
7 Referências Bibliográficas	103
Apêndice A – Desenvolvimentos Matemáticos para Alocação de Perdas Ativas (Unsihuay; Saavedra, 2006)	107
Apêndice B – Demonstração da Equação (4.11)	111
Apêndice C – Distâncias Elétricas Nodais	112
Apêndice D - Dados para o Caso Base do Sistema de 5 Barras	115
Apêndice E - Dados para o Caso Base do Sistema IEEE - 30.....	117
Apêndice F – Dados para o Caso-base do Sistema IEEE-118	123

Lista de Tabelas

Tabela 5.1 - Estado da Rede Para o Caso-Base	64
Tabela 5.2 - Fluxos de Potência e Perdas Nas Linhas de Transmissão Para o Caso-Base	65
Tabela 5.3 - Alocações de Demandas de Potência Reativa Para o Caso- Base	65
Tabela 5.4 - Distâncias Elétricas Nodais Para o Caso-Base.....	66
Tabela 5.5 – Alocação de Perdas Reativas e Correntes na Rede de Transmissão Para o Caso - Base	69
Tabela 5.6 – Dados de Barra com Acréscimo de 50% na Demanda da Barra 5.....	71
Tabela 5.7 – Fluxos e Perdas Nos Ramos com Acréscimo de 50% na Demanda da Barra 5	71
Tabela 5.8 – Dados de Barra com Decréscimo de 50% na Demanda da Barra 5.....	72
Tabela 5.9 – Fluxos e Perdas Nos Ramos com Decréscimo de 50% na Demanda da Barra 5	72
Tabela 5.10 – Comparações das Alocações de Demandas para Aumento de 50% na Demanda da Barra 5	72
Tabela 5.11 – Comparações das Alocações de Demandas para Diminuição de 50% na Demanda da Barra 5	73
Tabela 5.12 – Distâncias Elétricas Nodais para Acréscimo e Redução de 50% na Demanda da Barra 5	73
Tabela 5.13 – Alocação de Perdas Reativas para um Aumento de 50% na Demanda da Barra 5	75
Tabela 5.14 – Alocação de Perdas Reativas para Uma Diminuição de 50% na Demanda da barra 5.....	76
Tabela 5.15 – Estado da Rede para $V_3 = 1,050$ p.u.....	79
Tabela 5.16 – Fluxos de Potência para $V_3 = 1,050$ p.u.	79
Tabela 5.17 – Estado da Rede para $V_3 = 1,0$ p.u.....	79

Tabela 5.18 – Fluxos de Potência para $V_3 = 1,0$ p.u.	80
Tabela 5.19 – Comparações de Alocações de Demanda para $V_3 = 1,05$ p.u.	80
Tabela 5.20 – Comparações de Alocações de Demanda para $V_3 = 1,00$ p.u.	80
Tabela 5.21 – Alocação de Perdas Reativas para $V_3 = 1,05$ p.u.....	81
Tabela 5.22 – Alocação de Perdas Reativas para $V_3 = 1,00$ p.u.....	82
Tabela 5.23 - Alocação de Demandas pelo Método MAFT (IEEE-30)	84
Tabela 5.24 – Alocação de Demandas pelo Método MYMM (IEEE-30).....	84
Tabela 5.25 – Distâncias Elétricas Nodais (IEEE-30)	85
Tabela 5.26 – Alocação de Demandas com Inserção de Capacitor de 10 MVar pelo Método MAFT	90
Tabela 5.27 – Alocação de Demandas com Inserção de Capacitor de 10 MVar pelo Método MYMM.....	90
Tabela 5.28 – Distâncias Elétricas com a Inserção do Capacitor.....	91
Tabela 5.29 - Limites das Áreas de Influência das Fontes.....	95
Tabela 5.30 – Áreas de Influência de Algumas Fontes pelo Método MAFT.....	96
Tabela 5.31 – Áreas de Influência de Algumas Fontes pelo Método MYMM	96
Tabela D.1 – Dados de Barra Para o Sistema 5 Barras.....	115
Tabela D.2 – Dados de Ramos Para o Sistema 5 Barras	116
Tabela E.1 – Dados de Barras IEEE-30.....	117
Tabela E.2 – Dados de Ramos IEEE-30	118
Tabela E.3 – Fluxos e perdas nos ramos.....	119
Tabela E.4 – Alocações de Perdas Reativas para o caso-base.....	121
Tabela E.5 – Alocações de Perdas Reativas com a Inserção do Capacitor.....	122
Tabela F.1 – Dados de Barras IEEE-118	124
Tabela F.2 – Dados de Ramos IEEE-118	126

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Exemplo de Contribuição de Potência Reativa de Geradores para Cargas.....	24
Figura 2.2 – Curva de Capabilidade de um Gerador Síncrono.....	27
Figura 2.3 – Produção de potência reativa versus custos incorridos para um gerador síncrono.....	29
Figura 3.1 – Princípio da Divisão Proporcional do Fluxo de Potência Ativa.....	36
Figura 3.2 – Adequações dos Ramos de Transmissão Como Receptores / Fornecedores de Potência Reativa (valores em p.u.).....	40
Figura 4.1 – Separação do Circuito em Cenários.....	48
Figura 4.2 – Representação da Barra de Carga L	51
Figura 4.3 – Ramo de Transmissão $i-j$	55
Figura 5.1 – Digrama Unifilar do Sistema de 5 Barras.....	64
Figura 5.2 – Contribuições das Fontes Para a Barra 2 no Caso-Base.....	68
Figura 5.3 – Contribuições das Fontes Para a Barra 5 no Caso-Base.....	68
Figura 5.4 - Evolução das Contribuições dos Geradores pelo Método MAFT Frente à Variação no Carregamento.....	73
Figura 5.5 - Evolução das Contribuições dos Geradores pelo Método MYMM Frente à Variação no Carregamento.....	74
Figura 5.6 – Evolução das Alocações de Perdas Reativas.....	77
Figura 5.7 – Evolução da Alocação de Perdas Reativas Globais por Gerador. ...	78
Figura 5.8 - Diagrama Unifilar IEEE 30 Barras.....	83
Figura 5.9 – Contribuições das Fontes para Demanda Reativa Global Pelo Método MAFT.....	87
Figura 5.10 – Contribuições das Fontes para Demanda Reativa Global Pelo Método MYMM.	87
Figura 5.11 – Contribuições das Fontes para Demanda Reativa Global para o Caso-Base.....	88
Figura 5.12 - Contribuições dos Geradores para as Perdas Reativas Totais.....	89

Figura 5.13 - Comparações das Alocações de Demandas com Inserção de Capacitor.	93
Figura 5.14 - Evolução das Alocações de Perdas Reativas Globais com Inserção de Capacitor.....	94
Figura 5.15 - Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 118 barras com Região de Influência dos Geradores.....	98
Figura 5.16 – Alocação de Perdas Reativas entre as Fontes	99
Figura A.1 – Representação do Ramo i-j	108
Figura C.1 – Atenuação de Tensão.....	113