



IVO SERGIO BARAN

**MAPEAMENTO DO VALOR ECONÔMICO
DOS EQUIPAMENTOS DE COMPENSAÇÃO
DE POTÊNCIA REATIVA**

Dissertação de Mestrado

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

Orientadores: Prof. Dr. Ricardo Prada
Dr. Boris Garbati Gorenstin

Rio de Janeiro
Outubro de 2002

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

Ivo Sergio Baran

Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense em 1971 e em Sistemas de Potência pela Coordenação dos Programas de Pós - Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1976. Atualmente é engenheiro de FURNAS - Centrais Elétricas, atuando nas áreas de transmissão de energia em corrente contínua, gerador síncrono, compensador estático de reativo, banco de capacitores série fixo e controlado a tiristores. É autor de vários artigos técnicos publicados no Brasil e no exterior.

Ficha Catalográfica

Baran, Ivo Sergio

Mapeamento do valor econômico dos equipamentos de compensação de potência reativa / Ivo Sergio Baran; orientadores: Ricardo Prada e Boris Garbati Gorenstin. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2002.

[16], 110 f. : il. ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográfica.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Serviços ancilares à operação. 3. Potência reativa. 4. Risco de operação. 5. Compensador estático de reativo. 6. Curva de capacidade. 7. Auto-excitação. 8. Capacitadores em derivação. 9. Reatores em derivação. 10. Opção de compra de energia. 11. Mecanismo de realocação de energia. I. Prada, Ricardo. II. Gorenstin, Boris Garbati. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD 621.3



Ivo Sérgio Baran

Mapeamento do Valor Econômico dos Equipamentos de Compensação Reativa

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

Dr. Boris Garbati Gorenstin

Co-Orientador

FURNAS

Dr. Paulo Roberto de Holanda Sales

ELETROBRÁS

Prof. José Wanderley Marangon Lima

UNIFEI

Prof. Ney Augusto Dumont

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 25 de outubro de 2002

Para meus pais Josek e Chana (in memorian).

Para minha querida esposa Deise Maria pelo carinho dedicado.

Para Flavio e Renato.

" Talvez o Livro da Vida, no final, seja o livro que cada um viveu. Se alguém não viveu nada, esse alguém não está no Livro da Vida "

Diário de Thomas Merton, 17 de julho de 1956

Agradecimentos

Para Eletrobrás - Centrais Elétricas Brasileiras pela realização deste treinamento através do programa PRODESPO – Programa de Desenvolvimento do Pessoal de Operação.

Para FURNAS - Centrais Elétricas na pessoa dos gerentes senhores Antonio de Oliveira Filho, Hamilton Pinto das Chagas e Jorge Kotlarewski pelo apoio e confiança depositados.

Ao Prof. Dr. Ricardo Prada e a todos os demais professores da PUC pela orientação e pelos conhecimentos transmitidos no decorrer deste curso.

Ao Dr. Boris Garbati Gorenstin e a Pedro A. M-S. David pela valiosa orientação recebida durante o preparo desta dissertação.

Ao Dr. Marcus Theodor Schilling (ONS) pelas sugestões recebidas durante a fase final desta dissertação.

Ao amigo Eduardo de Medeiros Brandi pelo entusiasmo recebido durante a realização deste curso e pelas sugestões ao texto da dissertação.

Aos colegas da PUC e das demais empresas do setor elétrico pela camaradagem e companheirismo durante os anos de convívio acadêmico.

Este trabalho é acadêmico e não necessariamente reflete a opinião de FURNAS - Centrais Elétricas S.A..

Resumo

No novo modelo para o setor elétrico brasileiro a operação do sistema é de responsabilidade do Operador Independente do Sistema enquanto que a propriedade do equipamento e os gastos com a sua manutenção são de responsabilidade do agente prestador do serviço ancilar.

Desta forma, o lucro do agente prestador do serviço ancilar de potência reativa será função do custo deste serviço uma vez que a sua remuneração é previamente definida pelo agente regulador.

Dentro desta ótica os riscos operacionais dos equipamentos de compensação de potência reativa, se não forem convenientemente mitigados, poderão aumentar os gastos com a manutenção e o pagamento de multa pela indisponibilidade do equipamento.

Riscos operacionais são situações de sistema que estão fora da responsabilidade do agente mas que poderão reduzir o seu faturamento.

Esta dissertação descreve os riscos operacionais e faz algumas sugestões para proteger o agente da redução do seu faturamento.

Palavras-chave

Serviços ancilares à operação, potência reativa, risco de operação, compensador estático de reativo, curva de capacidade, auto-excitação, capacitores em derivação, reatores em derivação, opção de compra de energia, mecanismo de realocação de energia.

Abstract

In the new brazilian deregulated electrical network, system operation is under Independent System Operator responsibility while the ancillary service agent is the owner of the reactive power equipment and, as a consequence, is responsible for its maintenance costs.

In the new model, the profit of the agent is a function of the maintenance costs because his payment is previously defined by the authorities.

The operational risks of the reactive power equipments, if not conveniently mitigated, may increase the maintenance frequency and may also result in the payment of a fee due to the equipment unavailability.

Operational risks are events in the electrical transmission system that are not under the responsibility of the agent but may reduce his profits.

This report describes these operational risks and makes some suggestions to protect the agent against the reduction in his profits.

Keywords

Reactive power, ancillary services, operational risk, static var compensator, capability curve, self-excitation, shunt capacitor, shunt reactor, call option, energy reallocation mechanism.

Sumário

1 Introdução	16
2 Riscos de operação associados à transmissão	20
2.1 Risco de operação de um compensador estático de reativo	20
2.1.1 Cálculo teórico das correntes injetadas no sistema e nos filtros do CER	20
2.1.2 Efeito das componentes harmônicas nas unidades capacitivas	22
2.1.3 Comentários.....	24
2.1.3.1 Envelhecimento precoce das unidades capacitivas	24
2.1.3.2 Distorção harmônica já existente no sistema de transmissão	25
2.1.3.3 Experiência operacional	26
2.1.3.4 Componente harmônica já existente no sistema	27
2.1.3.5 Efeito do transformador acoplador	27
2.2. Risco de operação durante a energização de banco de capacitores em derivação	27
2.2.1 Corrente de energização do banco de capacitores	28
2.2.2 Energização de banco de capacitores em derivação na condição de "back to back"	29
2.2.3 Comentários.....	29
2.3 Risco de operação durante chaveamento de reator derivação	30
2.3.1 Comentários	32
2.4 Risco de operação de um compensador síncrono	32
2.4.1 Comentários.....	33
2.5 Proposta de seguro para os equipamentos	34
2.5.1 Modelo de seguro para saída forçada nos equipamentos	35
2.5.2 Valor do prêmio do seguro	43
2.6 Conclusões.....	44
3 Riscos de operação associados à geração.....	46
3.1 Riscos de operação	46
3.1.1 Auto-excitação	46

3.1.2 Operação do relé de impedância do gerador	47
3.1.3 Ilhamento do sistema de transmissão	47
3.1.4 Redução da potência ativa para controle de tensão	47
3.2. Medidas de proteção para a comercialização da energia	49
3.2.1 Mecanismo de realocação de energia	49
3.2.1.1 Cálculo da energia secundária	49
3.2.1.2 Cálculo da energia assegurada ajustada	50
3.2.1.3 Alocação da energia assegurada para uma usina	52
3.2.1.4 Ajuste de energia para o primeiro estágio	53
3.2.1.5 Ajuste de energia do segundo estágio	54
3.2.1.6 Alocação de energia do terceiro estágio	55
3.2.1.7 Alocação de energia secundária	56
3.2.1.8 Parcela de energia secundária para cada uma das usinas	57
3.2.1.9 Ajustes totais do MRE	60
3.2.1.10 Custo de compensação de geração	61
3.3 Comentários quanto ao MRE	62
3.3.1 Resultados do caso A	63
3.3.2 Resultados do caso B	65
3.4 Formação de “hedge” com contrato de opção	66
3.4.1 Preços da energia no mercado “spot”	67
3.4.2 Montagem de um “portfolio”	69
3.4.3 Determinação do valor do prêmio da opção “call”	70
3.4.4 Determinação dos preços P21 e P22	72
3.4.5 Valor esperado do “portfolio”	72
3.5 Conclusões	75
4. Conclusões e trabalhos futuros	77
4.1 Conclusões	77
4.2 Trabalhos futuros	80
Referências Bibliográficas	81
Apêndice 1 Banco de capacitores em derivação e filtro harmônico	84
Apêndice 2 Compensador estático de reativo	91

Apêndice 3 Auto-excitação de geradores e compensadores síncronos.....	101
Apêndice 4 Característica de operação de um compensador síncrono em regime permanente	110
Apêndice 5 Desenvolvimento das equações associadas à curva de capacidade para um gerador síncrono	113
Apêndice 6 Cálculo da energia não suprida pela perda de geração.....	122

Lista de Ilustrações

Figura 2.1 Equivalente visto da barra de baixa tensão do CER	22
Figura 2.2 Circuito equivalente da abertura de um reator em derivação.....	31
Figura 2.3 Modelo de Markov a 2 estados.....	40
Figura 3.1 Árvore binomial de 2 estágios.....	70
Figura A.1.1 Banco de capacitores em derivação	85
Figura A.1.2 Módulo de Z_{filtro} versus frequência	90
Figura A.1.3 Ângulo de Z_{filtro} versus frequência	90
Figura A.2.1 Diagrama do compensador estático de reativo	91
Figura A.2.2 Corrente harmônica gerada pelo RCT.....	100
Figura A.3.1 Circuito equivalente do eixo direto	102
Figura A.3.2 Circuito equivalente do eixo em quadratura	104
Figura A.4.1 Característica de operação do síncrono em regime permanente	111
Figura A.4.2 Curva em "V" típica de um compensador síncrono	112
Figura A.6.1 Modelo do gerador	123
Figura A.6.2 Valor esperado da perda de carga.....	125

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Envelhecimento precoce dos capacitores	23
Tabela 2.2 Conteúdo harmônico na tensão de 138 kV	25
Tabela 2.3 Distorção harmônica valores de projeto	26
Tabela 2.4 Indisponibilidade dos capacitores em derivação	36
Tabela 3.1 Dados de geração e energia assegurada.....	62
Tabela 3.2 Resultados do caso A	63
Tabela 3.3 Resultados do caso B	65
Tabela 3.4 Série de preços para o mercado "spot"	67
Tabela A.1.1 Suportabilidade de tensão para os capacitores.	88
Tabela A.6.1 Probabilidades de saída forçada de geradores.	124

Lista de Abreviaturas

OIS: Operador Independente do Sistema

CER: compensador estático de reativo

RCT: reator controlado a tiristores

CCT: capacitor controlado a tiristores

I_{hv} : corrente harmônica do reator controlado a tiristores

I_{hn} : corrente harmônica no sistema

I_{hf} : corrente harmônica nos filtros

Z_{hf} , Z_{ht} , Z_{hn} : impedância harmônica dos filtros, transformador acoplador e equivalente do sistema, respectivamente

DTHT: distorção da tensão harmônica total

B.C. Hydro: British Columbia Hydro

i_{peak} : corrente máxima de energização do banco de capacitores em derivação

C_b : valor de capacitância do banco de capacitores

L_s : valor da indutância equivalente da fonte

L_{equiv} , L_b : valor da indutância equivalente do trecho de barramento

I_1 : corrente nominal do banco de capacitores energizado

I_2 : corrente nominal do banco de capacitores a ser energizado

L : valor da indutância do reator em derivação

L_p : valor da indutância em paralelo ao pólo do disjuntor

C_s : valor da capacitância equivalente do lado da fonte

C_p : valor da capacitância em paralelo ao pólo do disjuntor

C_l : valor da capacitância equivalente do lado da carga

i_{ch} : corrente de corte durante a abertura do reator

MRE: Mecanismo de realocação de energia

p : período de comercialização do MRE

j : índice da usina participante do MRE

s, l : índice do submercado do MRE

m : mês de apuração do MRE

i : ponto de medição de energia

g: gerador

CCC: conta de consumo de combustíveis

SEC: energia secundária do sistema

G: energia gerada já referida ao centro de gravidade do submercado

ASS_1: energia assegurada já referida ao centro de gravidade do submercado

GSF: fator de ajuste da energia assegurada

ASS_2: energia assegurada ajustada

ERM_Surp: superávit de energia gerada acima da energia assegurada ajustada

ERM_Def: déficit de geração

Pot: superávit de geração de todas as usinas participantes do MRE

Deficit: déficit de geração das usinas participantes do MRE

EA_1: valor de ajuste do primeiro estágio de alocação de energia do MRE

EA_2ASS: ajuste do segundo estágio de alocação de energia assegurada

EA_3ASS: ajuste de terceiro estágio de alocação de energia assegurada

Pot_1: superávit líquido de geração

ERN: energia total remanescente após a alocação da energia assegurada ter sido feita

excess: excedente de energia do MRE

SALOC_C: direito a parcela da energia assegurada total proporcional ao excesso de geração

R_SEC: parâmetro de rateio

SASS_C: direito a energia secundária proporcional a energia assegurada

SEC_SM: somatório de toda a energia secundária alocada para as usinas de um determinado submercado

Pot_2: diferença entre a energia remanescente após a alocação da energia assegurada e o direito total a energia em um submercado

EA_2SEC: ajuste de segundo estágio de alocação de energia relativo a energia secundária

EA_3SEC: ajuste de terceiro estágio de alocação de energia relativo a energia secundária

EA_2: ajuste de segundo estágio de alocação de energia do MRE

EA_3: ajuste de terceiro estágio de alocação de energia do MRE

ERM_P: ajuste total de energia do MRE

ERMS: total de ajuste do MRE em seu próprio submercado

DON: quantidade de energia alocada para outras usinas

REC: quantidade de energia recebida de outras usinas

CUSTO_MRE: custo de energia de uma determinada usina para trocas no MRE

CRR: taxa de recuperação do custo de geração

PAY: pagamento devido por geração

P_G : potência ativa gerada

Q_G : potência reativa gerada

R_T : valor do "portfolio"

K : valor de exercício da opção

S_T : preço da energia no mercado "spot"

G_T : geração disponível para o mercado "spot"

f : preço da energia do contrato futuro

F_T : quantidade de energia contratada

C_T : quantidade de energia contratada na opção de compra

c : valor do prêmio da opção

r_f : taxa de juros em risco

P_{21} : preço "uptick" da energia

P_{22} : preço "downtick" da energia

ω : probabilidade de neutralidade ao risco ou velocidade angular

Π_0 : "portfolio" sem a opção de compra

λ : taxa média de falha

μ : taxa média de reparo

MTBF: tempo médio entre falhas ("mean time between failures")

MTTF: tempo médio para a falha ("mean time to failure")

MTTR: tempo médio para reparo ("mean time to repair")

VaR: valor a risco