

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CONTRIBUIÇÃO AO PLANEJAMENTO E CONTROLE DA COMPENSAÇÃO
REATIVA EM ALIMENTADORES PRIMÁRIOS

Fernando Diniz Penha

CAMPINA GRANDE • PB

AGOSTO • 1991

FERNANDO DINIZ PENHA

CONTRIBUIÇÃO AO PLANEJAMENTO E CONTROLE DA COMPENSAÇÃO REATIVA
EM ALIMENTADORES PRIMÁRIOS

Dissertação apresentada ao curso
de MESTRADO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA da Universidade Federal
da Paraíba, em cumprimento às
exigências para a obtenção do
grau de Mestre.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO : PROCESSAMENTO DA ENERGIA

BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, mestre

Orientador

WELLINGTON SANTOS MOTTA, phd

Co-Orientador

CAMPINA GRANDE-PB

AGOSTO - 1991



P399c Penha, Fernando Diniz.
Contribuição ao planejamento e controle da compensação reativa em alimentadores primários / Fernando Diniz Penha. - Campina Grande, 1991.
147 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1991.
"Orientação : Prof. M.Sc. Benemar Alencar de Souza, Prof. Dr. Wellington Santos Motta".
Referências.

1. Distribuição de Energia. 2. Compensação Reativa. 3. Alimentadores Primários. 4. Capacitores - Sistema de Distribuição. 5. Dissertação - Engenharia Elétrica. I. Souza, Benemar Alencar de. II. Motta, Wellington Santos. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título

CDU 621.3.095.2(043)

CONTRIBUIÇÃO AO PLANEJAMENTO E CONTROLE DA
COMPENSAÇÃO REATIVA EM ALIMENTADORES PRIMÁRIOS

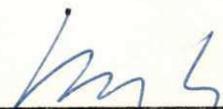
FERNANDO DINIZ PENHA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 12 / 08 / 91



BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, mestre

orientador



WELLINGTON SANTOS MOTTA, phd

co-orientador



CURSINO BRANDÃO JACOBINA, phd

componente da banca



WASHIGTON EVANGELISTA DE MACEDO, mestre

componente da banca

CAMPINA GRANDE - PB

AGOSTO -1991

A G R A D E C I M E N T O S

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, pela oportunidade que me dá em escrever este trabalho.

Ao professor Benemar Alencar de Souza, pela ajuda na escolha do tema, orientação em todo o desenvolvimento do assunto, além da valorização que deu a todas as minhas dúvidas e opiniões.

Aos membros do Grupo de Sistemas de Potência da Universidade Federal da Paraíba pelo apoio junto ao Laboratório de Sistemas de Potência no qual foi desenvolvido o trabalho.

Aos professores responsáveis pelo Laboratório de Automação e Processamento de Sinais, da Universidade Federal da Paraíba, pelo acesso que tive junto aos computadores deste laboratório, durante a fase de elaboração do texto.

Aos meus colegas de trabalho Luis Reyes, Cícero Wladimir e Ailson de Souza pelas discussões técnicas sobre o tema.

A todos aqueles que de alguma forma colaboraram para a realização deste trabalho.

DEDICATÓRIA

A minha mãe Maria do Socorro Diniz

A meu pai Gonçalo Penha (em memória)

Aos meus irmãos Sergio Diniz e Marcelo Diniz

SUMÁRIO

PÁGINA

LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE SÍMBOLOS	

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1 - A importância do estudo	1
1.2 - Revisão bibliográfica	3
1.3 - Contribuições da pesquisa	4
1.4 - Resumo dos capítulos subsequentes	5

CAPÍTULO 2

ASPECTOS GERAIS DA APLICAÇÃO DE CAPACITORES EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	7
2.1 - Introdução	7
2.2 - Tipos de capacitores instalados em sistemas de distribuição	9
2.3 - Benefícios dos capacitores em alimentadores primários	10
2.4 - Aspectos gerais da redução das perdas em alimentadores primários via instalação de capacitores em derivação .	12
2.5 - Conclusão	28

CAPÍTULO 3

PLANEJAMENTO E CONTROLE DA COMPENSAÇÃO REATIVA EM ALIMENTADORES PRIMÁRIOS SEM RAMAIS	30
3.1 - Introdução	30
3.2 - Modelo do alimentador físico	31
3.3 - Representação de cargas reativas e capacitores	36
3.4 - Características da variação de carga reativa com o tempo	39
3.5 - Estratégia para o planejamento e controle da compensação reativa em alimentadores primários	42
3.5.1 - Definição do problema geral do planejamento...	42
3.5.1.1 - A questão do planejamento	42
3.5.1.2.- A questão do controle	43
3.5.2 - Considerações sobre a estratégia utilizada para o controle da compensação reativa.....	45
3.5.3 - A função objetivo	48
3.6 - Otimização das perdas em alimentadores primários: formulação matemática do método de solução	50
3.6.1 -Subproblema A: Otimização da capacidade nominal.	55
3.6.2 -Subproblema B: Otimização do tempo de operação.	58
3.6.2.1 - Implementação da estratégia de controle da compensação reativa.....	61
3.6.3 - Subproblema C: Otimização da localização.....	63
3.7 - Exemplo de aplicação	67

3.8 - Análise de Sensibilidade do processo de otimização ...	75
3.8.1 - Efeito da variação em torno das localizações ótimas	75
3.8.2 - Efeito da variação em torno das capacidades ótimas	81
3.9 - Conclusão	86

CAPÍTULO 4

PLANEJAMENTO E CONTROLE DA COMPENSAÇÃO REATIVA EM ALIMENTADORES PRIMÁRIOS PROVIDOS DE RAMAIS	88
4.1 - Introdução	88
4.2 - Modelo estrutural do alimentador primário provido de ramais.....	89
4.3 - Representação das cargas reativas e dos capacitores...	90
4.4 - Modelo do alimentador físico.....	95
4.5 - Formulação geral da redução ^{de} perdas de potência e de energia.....	95
4.6 - A função economia líquida global : função objetivo....	105
4.7 - Procedimento geral de otimização da economia líquida global	106
4.7.1 - Subproblema A: Otimização da capacidade.....	107
4.7.2 - Subproblema B: Otimização de tempo de operação.	111
4.7.3 - Subproblema C: Otimização da localização	114
4.8 - Exemplo de aplicação	121
4.9 - Conclusão	126

CAPÍTULO 5

APLICAÇÕES	127
5.1 - Introdução	127
5.2 - Subsistemas analisados	127
5.2.1 - O Alimentador 01L2 da S/E Mussuré-I.....	127
5.5.2 - O Alimentador 01L5 da S/E Campina Grande-I....	128
5.3 - Dados de planejamento	128
5.4 - Resultados obtidos.....	135
5.5 - Análise dos resultados.....	138
5.6 - Conclusão	139

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES	141
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	145

LISTA DE FIGURAS

	<u>PAGINA.</u>
Figura 1.1 - Alimentador primário típico.....	02
Figura 2.1 - a) Alimentador primário com cargas concentrada e uniformemente distribuída e b) perfil da corrente de carga	16
Figura 2.2 - Perfil de carga do alimentador primário da fig.2.1, após a instalação de 1(um) banco de capacitor.....	17
Figura 2.3 - Redução percentual das perdas de potên- cia em função da localização de um ban- co de capacitor no alimentador primário da fig.2.1	26
Figura 2.4 - Redução percentual das perdas de potên- em função da capacidade de um banco de capacitor, no alimentador da fig.2.1..	27

Figura 2.5 - Redução percentual das perdas de energia no alimentador da fig.2.1, para diferentes fatores de carga	27
Figura 3.1 - Diagrama unifilar de um alimentador primário de nove barras, tensão 23Kv..	33
Figura 3.2 - a) O alimentador físico da fig.3.1 e seus modelos b) uniforme e c) uniforme normalizado	36
Figura 3.3 - Função distribuição de carga reativa normalizada, correspondente ao alimentador da fig.3.1.....	38
Figura 3.4 - Representação dos capacitores ao longo do modelo uniforme e normalizado de um alimentador primário	39
Figura 3.5 - Variação da carga reativa, com o tempo, para o alimentador primário da fig.3.1. a) curva de carga reativa diária; b) curva de duração de carga reativa...	41
Figura 3.6 - Fluxograma do procedimento iterativo de resolução dos subproblemas A, B e C....	66

Figura 3.7 - Representação gráfica da variação da função objetivo S, em relação a variações em $h_2=0.2248$ p.u.....	77
Figura 3.8 - Trecho ampliado da função distribuição de carga reativa da fig.3.3, em torno do ponto de localização $h_2=0.2248$ p.u..	80
Figura 3.9 - Economia líquida anual em função da capacidade nominal do primeiro capacitor ($I_{c1}=0.051833$ p.u).....	83
Figura 3.10 - Economia líquida anual em função da capacidade nominal do segundo capacitor ($I_{c2}=0.139412$ p.u).....	83
Figura 3.11 - Economia líquida anual em função da capacidade nominal do terceiro capacitor ($I_{c3}=0.315636$ p.u).....	84
Figura.4.1 - Elementos do modelo estrutural de um alimentador primário constituído de ramais.....	90
Figura 4.2 - Alimentador radial de 2(dois) caminhos abertos e 3 (três) seções.....	93

Figura 4.3 - Função distribuição de carga reativa através da a) seção(1), b) seção(2) e c) seção(3) do alimentador da fig.4.2.	94
Figura 4.4 - Função distribuição de carga reativa através do a) caminho(1)-(2) e b) caminho (1)-(3) do alimentador da fig.4.2...	94
Figura 4.5 - Alimentador primário de 3(três) caminhos abertos e 5(cinco) seções, no qual estão instalados 3(tres) capacitores.....	103
Figura 4.6 -Fluxograma do procedimento iterativo de resolução dos subproblemas A, B e C....	120
Figura 4.7 - Alimentador primário de 30(trinta) barras, tensão 23 Kv	123
Figura 4.8 - Variação da carga reativa com o tempo, para o alimentador primário da fig.4.7. a) curva de carga reativa diária; b) curva de duração carga reativa.....	123
Figura 5.1 - Diagrama unifilar do alimentador primário 01L2 da S/E Mussuré I, 13.8 Kv...	130

Figura 5.2 - Variação da carga reativa com o tempo,
para o alimentador primário fig.5.1.
a) curva de carga reativa; b) curva
de duração de carga reativa 130

Figura 5.3 - Diagrama unifilar do alimentador
primário 01L5 da S/E Campina Grande I,
13.8 Kv 133

Figura 5.4 - Variação da carga reativa com o tempo,
para o alimentador primário da fig.5.3.
a) curva de carga reativa; b) curva de
duração de carga reativa 134

LISTA DE TABELAS

	<u>PÁGINA.</u>
Tabela 3.1 - Dados característicos do alimentador primário da fig.3.1.....	34
Tabela 3.2 - Dados associados ao alimentador físico da fig.3.1 e seus modelos uniforme e uniforme normalizado.....	35
Tabela 3.3 - Resultados do planejamento da compensação reativa para o alimentador de 9(nove) barras da fig.3.1.....	74
Tabela 3.4 - Análise de sensibilidade do processo de otimização: efeito da utilização de valores de capacitores padronizados, sobre a economia líquida	85
Tabela 4.1 - Dados característicos do alimentador primário da fig.4.7.....	124
Tabela 4.2 - Resultados do planejamento da compensação reativa para o alimentador de 30(trinta) barras da fig.4.7.....	125

Tabela 5.1 - Dados característicos do alimentador da fig.5.1.....	131
Tabela 5.2 - Dados carcterísticos do alimentador da fig.5.3.....	132
Tabela 5.3 - Resultados do planejamento da compensação reativa para o alimentador da fig.5.1..	136
Tabela 5.4 - Resultados de planejamento da compensação reativa para o alimentador da fig.5.2..	137

LISTA DOS PRINCIPAIS SÍMBOLOS

- R - Resistência total uniforme
- r_i - Resistência em ohms por unidade de comprimento do i -ésimo trecho do modelo uniforme.
- L_i - Comprimento do i -ésimo trecho do alimentador físico.
- L_{ui} - Comprimento físico do i -ésimo trecho do modelo uniforme.
- L_T - Comprimento físico total do modelo uniforme.
- r - Resistência em ohms do modelo uniforme e normalizado
- x - Distância, medida a partir da subestação, ao longo do modelo uniforme e normalizado do alimentador.
- $I(x)$ - Densidade de carga ou corrente reativa em x .
- I_0 - Carga reativa máxima medida no barramento principal da subestação.
- $F(x)$ - Função distribuição de carga reativa ao longo do modelo uniforme e normalizado do alimentador.
- $I_0(t)$ - Função carga reativa medida na subestação.
- $I'_0(t)$ - Função duração de carga reativa.
- $I_0(x,t)$ - carga reativa no tempo t e num ponto do alimentador a uma distância x da subestação.
- h_i - Distância normalizada, medida a partir da subestação, até o ponto de instalação do i -ésimo capacitor.
- I_{ci} - Corrente ou capacidade nominal (em p.u) do i -ésimo banco de capacitor.
- $u_i=j$ - Tipo do i -ésimo banco de capacitor.

- $t_j^a(t_j^f)$ - Tempo no qual os capacitores do tipo j entram(saem) de operação.
- $I_a(t_j^a)$ - Nível de carga reativa no qual os capacitores de tipo j devem entrar em operação.
- $I_a(t_j^f)$ - Nível de carga reativa no qual os capacitores de tipo j devem sair em operação.
- m - Número de tipos de capacitores chaveados.
- $T_j = t_j^f - t_j^a$ - Tempo (em p.u), no qual os capacitores do tipo j ficam em operação.
- $A(j)$ - Conjunto que contém os índices do capacitores do tipo j .
- $\bar{A}(j)$ - Conjunto que contém os índices do capacitores do tipo $j, j-1, \dots, j, 0$.
- f_c - Fator de carga reativa associado com o tempo T .
- F_{cui} - Fator de carga reativa associado com o tempo de operação dos capacitores do tipo $u_i = j$.
- LP_i - Redução das perdas de potência devido a instalação do i -ésimo capacitor.
- LE_i - Redução das perdas de energia devido a instalação do i -ésimo capacitor.
- T - Duração do ciclo de carga reativa.
- LP - Redução total das perdas de potência.
- LE - Redução total das perdas de energia.
- S - Função custo-benefício ou função objetivo.
- K_p - Custo anual associado à unidade de perda de potência
- K_e - Custo anual associado à unidade de perda de energia
- $K_{cf}(K_{cf})$ - Custo anual associado à unidade trifásica capacitor

do tipo fixo (chaveado)

- n - Número de bancos de capacitores que estão instalados.
- K - Índice do caminho aberto do alimentador provido de ramais.
- s - Índice da seção do alimentador provido de ramais.
- n_s - Índice do trecho localizado imediatamente após o ponto x na seção s .
- N_s - Número de seções ao longo do alimentador provido de ramais.
- I_k - Corrente de carga reativa no k -ésimo trecho da seção s .
- F_j - Soma algébrica das correntes de carga reativa em todos os trechos da seção j , exceto o trecho inicial.
- $F(s,x)$ - Função distribuição de carga reativa normalizada, até a distância x , na seção s .
- $F_p(k,x)$ - Função distribuição de carga reativa normalizada, até a distância x no caminho aberto k .
- $LP_{ij} (LE_{ij})$ - Redução das perdas de potência (de energia) através da seção j , devido a instalação do i -ésimo capacitor.
- $PL_s^{(i-1)}$ - Perdas de potência através da seção s , devido aos capacitores 1, 2, ... (i-1).
- PL_s^i - Perdas de potência através de seção s , devido ao i -ésimo capacitor.
- $X_{ss}(xfs)$ - Distância normalizada entre a subestação e a barra de origem (destino) da seção s .
- h_{ij} - Distância normalizada, medida a partir da subestação,

que é comun as localizações dos capacitores i e j .

- K_i - Índice do caminho aberto no qual está instalado o i -ésimo capacitor.
- $F_p(k,x)$ - Função distribuição de carga reativa normalizada, até a distância x no caminho aberto K_i .
- $F_p^j(k_i,x)$ - Função distribuição de corrente capacitiva (em p.u), até a distância x no caminho aberto K_i , devido aos capacitores do tipo j , ($j \neq 0$).
- $\bar{F}_p^j(k_i,x)$ - Função distribuição de corrente capacitiva (em p.u), até a distância x no caminho aberto K_i , devido aos capacitores do tipo $0, 1, 2, \dots j$.
- X_{ik} - Distância normalizada, medida a partir da subestação, até o barramento do k -ésimo caminho aberto, no qual é instalado o i -ésimo capacitor.

RESUMO

Este trabalho descreve uma metodologia de planejamento e controle ótimos da compensação reativa em alimentadores primários (diretos ou com ramais), por um critério econômico de redução das perdas de potência e das perdas de energia, através da instalação de bancos de capacitores em derivação (fixos e/ou chavedos). Com o alimentador físico representado pelo seu modelo equivalente uniforme e normalizado, e conhecendo-se a curva de carga reativa diária, são determinadas, via procedimento iterativo de otimização, as localizações, capacidades nominais e/ou tempos de operação de um número pré-estabelecido de bancos de capacitores, que irá resultar em máxima economia (economia ótima) com perdas. A economia que é obtida com a redução das perdas totais, está representada pela função objetivo S , que é função do custo da redução das perdas de potência, custo da redução das perdas de energia e custo dos capacitores. Através da implementação de uma rotina computacional, são feitas aplicações da metodologia a diferentes sistemas, inclusive a sistemas da Região Nordeste.

ABSTRACT

This work describes a methodology of optimum planning and control of reactive compensation distribution feeders, using a economical criteria of minimization of power peak and energy loss, by means of the installation of derivative capacitor banks. By representing the real feeder by its equivalent uniform and normalized model, and knowing the daily reactive load curve, the locations, sizes and/or switching times of a pre-established number of capacitor banks, will result in maximum loss economy (economy optimum). The economy obtained by the reduction of the total loss is represented by the objective function S , which is a function of the cost on the reduction in power and energy loss, and also, the cost of the capacitors. By means of the implementation of a computational routine are realized applications on the methodology for several cases, inclusive on systems of the northeast region.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL.

1.1 - A IMPORTÂNCIA DO ESTUDO

O Sistema de Distribuição têm importância fundamental dentro do contexto de um sistema elétrico, não só pelo volume de investimentos que exige, como também pela sua elevada responsabilidade na qualidade de serviço prestado ao consumidor. De acordo com o grau de continuidade de suprimento aos consumidores, os sistemas de distribuição podem ser de vários tipos : radiais, anéis ou reticulados. O tipo radial é o mais simples, e também o mais empregado. Os sistemas em anel, por outro lado, são mais complexos, sendo empregados onde é exigido um elevado grau de continuidade de energia mais elevado às cargas mais importantes do sistema.

Este trabalho apresenta uma metodologia de planejamento e controle da compensação reativa em sistemas de distribuição do tipo radial, por serem estes os mais empregados na prática, visando a redução das perdas de energia e de pico de potência. Estes sistemas compreendem alimentadores primários que se irradiam das subestações, via uma parte principal, denominada tronco, e

estão confinados numa determinada área de consumo. Do tronco se irradiam os ramos laterais e/ou os ramos sublaterais, quando a distribuição geográfica das cargas exige. Para efeito de ilustração do alimentador primário de sistemas distribuição do tipo radial, apresentamos na fig.1.1, o diagrama unifilar típico de um alimentador.

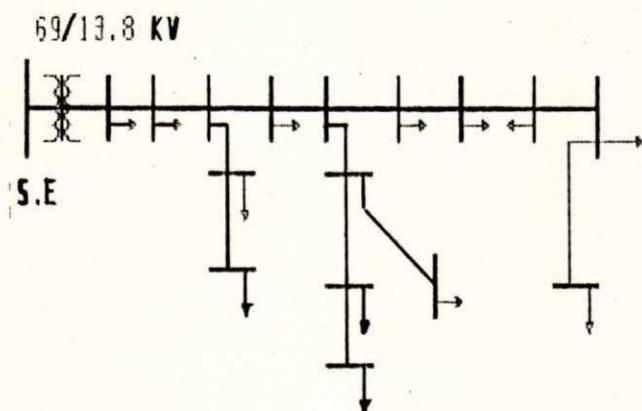


Fig.1.1 - Alimentador primário típico

Os investimentos feitos pelas indústrias de energia elétrica, no que se refere à instalação e geração de potência para atender novos consumidores são bastante elevados. Os custos destes investimentos não podem ser debitados apenas à energia requerida,

mas também às perdas e à demanda dos consumidores. Redução de perdas dispensa geração elétrica adicional e portanto, proporciona o adiamento de novos investimentos, o que implica em redução dos custos de produção para as indústrias de energia. Neste sentido, tem se tornado cada vez mais importante, o desenvolvimento e implementação de métodos de cálculo práticos e confiáveis, para avaliar as perdas em sistemas de energia elétrica. Esta importância cresce no nível da distribuição, uma vez que " as perdas no sistema de distribuição são em torno de 14% da potência gerada no instante de pico " (DURAN, 1968).

No planejamento de sistemas de distribuição, têm-se buscado a redução das perdas através da instalação de bancos de capacitores em derivação, ao longo dos alimentadores primários. Estes bancos de capacitores quando adequadamente dimensionados e localizados, podem compensar a demanda de potência reativa dos consumidores resultando economia de potência e de energia, e como efeito colateral, variação do perfil e tensão alimentador.

1.2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As técnicas usuais de minimização das perdas de energia e de pico de potência em alimentadores primários de distribuição, tem se guiado através de publicações escritas por NEAGLE & SAMSON

(1956), COOK (1961), SCHMILL (1965), CHANG (1968), DURAN (1968), as quais se baseam nas seguintes hipóteses simplificativas: os alimentadores são trifásicos simétricos sem ramais e suprem cargas equilibradas; não há variação de tipo ou bitola dos condutores, nem de tensão do alimentador; os custos dos capacitores não estão incluídos na fase de planejamento; os capacitores do tipo chaveado são programados para operarem simultaneamente.

Numa série de artigos mais recentes GRAINGER et alli (1980), GRAINGER & LEE (1981), LEE & GRAINGER (1981), GRAINGER et alli (1982) desenvolveram uma metodologia de planejamento da compensação reativa baseada em modelos bastante realistas do alimentador, os quais levam em conta: distribuição de carga não uniforme, diversidade de tipo e bitola dos condutores, variação do perfil de tensão, custo associado aos capacitores e possibilidade de operação dos capacitores chaveados em tempos diferentes.

1.3 - CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

Para tratar o problema da compensação reativa em alimentadores radiais mais realistas (providos de ramais), desenvolvemos um abordagem mais geral da metodologia apresentada nas publicações acima mencionadas, tendo como base um modelo estrutural de alimentador provido de ramais, definido por HAPP (1980).

Utilizando os conceitos desta metodologia, foi desenvolvido um programa computacional que permite o estudo de planejamento da compensação reativa em alimentadores reais da nossa Região. Tendo em vista que a base para o planejamento da compensação reativa em alimentadores primários, é o conhecimento da curva de carga reativa diária, ou em alguns casos, a curva de duração de carga reativa, as quais nem sempre estão disponíveis, introduz-se no programa uma rotina que permite a obtenção destas curvas a partir de dados de tensão, corrente e fator médio diário ou a partir de dados de energia ativa e reativa medidos na subestação.

1.4 - RESUMO DOS CAPÍTULOS SUBSEQUENTES

Apresentamos a seguir um breve resumo do conteúdo dos capítulos subsequentes que compõem o corpo deste trabalho. No capítulo 2 expomos os aspectos gerais mais importantes da aplicação de capacitores em alimentadores primários, dando ênfase principalmente ao problema da redução das perdas de potência e de energia. O desenvolvimento das equações de redução das perdas e dos métodos básicos de alocação e dimensionamento ótimo de capacitores em alimentadores radiais simples também são apresentados.

No capítulo 3, apresentamos uma metodologia de planejamento e

controle da compensação reativa em alimentadores trifásicos radiais diretos (sem ramais) via instalação de capacitores fixos e/ou chaveados, tendo como base, a curva de carga reativa medida na subestação. O objetivo desta compensação é a redução das perdas de potência e de energia ao longo do alimentador de modo a maximizar a economia global resultante. O controle da compensação reativa é exercido através do chaveamento de capacitores automáticos estáticos sob diferentes níveis de carga reativa.

A mesma metodologia acima mencionada é modificada e estendida no capítulo 4, para ser aplicada em alimentadores radiais providos de ramais. A aplicação desta metodologia a sistemas particulares, e análise dos resultados obtidos, compõem o capítulo 5. Finalmente no capítulo 6, são apresentadas as conclusões finais do trabalho, bem como algumas sugestões para trabalhos posteriores.

imprescindível a instalação de capacitores ao longo dos alimentadores primários, o que proporciona grandes benefícios econômicos para o sistema, tais como: redução global das perdas, redução da queda de tensão e liberação da capacidade instalada.

2.2 - TIPOS DE CAPACITORES INSTALADOS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Em geral, os bancos de capacitores instalados em alimentadores primários podem ser fixos ou chaveados. Os capacitores do tipo fixo são projetados para operarem permanentemente no sistema durante todo o ciclo de carga, de modo a compensar nível de carga reativa leve, enquanto que os capacitores do tipo chaveado (ou automáticos) estão programados para operarem em intervalos regulares ou contínuos de carga, de modo a complementar a compensação dos capacitores fixos até o nível máximo de carga reativa. O dimensionamento, ponto de instalação e controle dos capacitores são determinados com base na curva de carga reativa do alimentador.

Dependendo da finalidade básica no sistema, os capacitores do tipo chaveado podem ser controlados por tensão, tempo, corrente e tensão ou por tempo e tensão. No que diz respeito a redução das perdas em alimentadores primários, o tempo é o critério de controle mais apropriado para este tipo de capacitor. A unidade de

controle pelo tempo simplesmente permite que o capacitor seja chaveado automaticamente de acordo com um horário de operação pré-estabelecido, independentemente da sua localização ao longo do alimentador. Além disto, a unidade admite programação diária e também semanal para a operação do capacitor, ou seja, ela inclui um dispositivo de bloqueio que evita a manobra do capacitor nos dias como domingo, por exemplo, em que a variação da carga é diferente daquela ocorrida nos dias normais. Além do baixo custo, a unidade de controle pelo tempo tem a vantagem de dispensar coordenação com reguladores de tensão.

2.3 - BENEFÍCIOS DOS CAPACITORES EM ALIMENTADORES PRIMÁRIOS

Os principais benefícios econômicos obtidos com a instalação de capacitores derivação em sistemas de distribuição, especificamente nos alimentadores primários são:

a) Redução das perdas de energia ativa da instalação e sistema da concessionária e das perdas provocadas por pico de potência ativa.

As perdas de energia e de pico de potência ativa que ocorrem nos alimentadores primários são proporcionais ao quadrado da corrente total entre o transformador da subestação e os pontos de carga. Quando um capacitor em derivação é instalado junto a uma

carga deste alimentador, somente a componente reativa da corrente total é reduzida, para contrabalançar a corrente suprida pelo capacitor. Conseqüentemente, as perdas através do alimentador devido a esta corrente serão reduzidas na mesma proporção. Redução das perdas dispensa investimentos adicionais com geração, proporcionando assim, economia de custo para o planejamento do sistema.

b) Redução da queda de tensão

Desde que o capacitor instalado junto a um ponto de carga do alimentador reduz a corrente reativa injetada neste ponto, a queda de tensão será reduzida numa proporção igual ao produto da corrente do capacitor pela reatância do trecho do alimentador onde está situada a carga.

c) Liberação da capacidade instalada no alimentador.

A capacidade de um alimentador pode ser limitada por tensão ou termicamente. Nos alimentadores aéreos, o limite por tensão é, geralmente alcançado primeiro. Quando um banco de capacitor é instalado junto à carga de um alimentador que se encontra no limite de queda de tensão, há uma liberação da capacidade de operação do alimentador, provocada pela redução da potência

reativa. Deste modo o alimentador fica "aliviado", uma vez que sua carga em KVA, foi reduzida. Entretanto, a quantidade de KVA adicional a ser instalada, não deverá exceder àquela parcela liberada pelo alimentador.

Dentre estes benefícios, a redução das perdas de pico potência ativa e das perdas de energia constituem o principal objetivo do planejamento e controle da compensação reativa em alimentadores primários visando economizar os custos com a energia requerida. É conveniente, portanto, abordar os aspectos gerais da redução das perdas em alimentadores primários via instalação de bancos de capacitores, o que é feito nos itens subsequentes.

2.4 - ASPECTOS GERAIS DA REDUÇÃO DAS PERDAS EM ALIMENTADORES PRIMÁRIOS VIA INSTALAÇÃO DE CAPACITORES EM DERIVAÇÃO.

As perdas que ocorrem nos sistemas elétricos de distribuição podem ser de dois tipos: perdas de pico de potência e perdas de energia. Como foi dito no capítulo anterior, estas perdas representam 14% da potência ativa gerada nos instantes de demanda máxima. Do ponto de vista econômico, esta parcela de perdas exige que sejam feitos investimentos adicionais com geração a fim de que o suprimento de energia elétrica seja mantido em níveis de qualidade compatível com o mercado consumidor. Deste modo, para

que o sistema forneça energia de boa qualidade a um menor custo possível, é importante adotar um tipo de planejamento que leve em conta principalmente, a redução das perdas no sistema, durante a maior parte do tempo e sob as mais diversas condições de operação.

A redução econômica das perdas de potência ativa e das perdas de energia nos sistemas de distribuição é, em geral, conseguida através da instalação de bancos de capacitores em derivação ao longo dos seus alimentadores primários. Entretanto, é mais comum na prática, instalar os capacitores na própria subestação de distribuição. Esta alternativa é realmente mais viável do ponto de vista da operação, pois os bancos são comandados facilmente pelo controle em tempo real existente na subestação. No que diz respeito a redução econômica das perdas, é inevitável a instalação de capacitores ao longo do tronco dos alimentadores primários ou mesmo nas seções laterais ou sublaterais, no caso de alimentadores primários mais complexos (constituído de ramais).

Como foi dito no item 2.3, a componente reativa da corrente de carga total é a que realmente afeta a redução das perdas nos alimentadores primários a partir da instalação de capacitores em derivação, conforme é demonstrado a seguir.

A fig.2.1 mostra o diagrama unifilar de um alimentador primário do tipo radial de comprimento 1.0 p.u., resistência uniforme R ohms por unidade de comprimento, que é composto de uma combinação de carga uniformemente distribuída e concentrada. Sabe-se que a distribuição da corrente de carga em algum ponto do alimentador, é função da distância deste ponto até a subestação. Segundo Gönen 1980, as perdas que ocorrem através de um trecho infinitesimal de comprimento dx, e resistência total dr, que está localizado a uma distância x da subestação, é expressa por:

$$dp_x = 3 \cdot I(x)^2 \cdot dr \quad (2.1)$$

onde $dr=R \cdot dx$ e $I(x)$ representa a distribuição da corrente de carga até a distância normalizada x, que no caso do alimentador da fig.2.1, é dada por:

$$I(x) = [I_1 - (I_1 - I_2) \cdot x] \quad (2.2)$$

onde:

I_1 = corrente de carga no início do alimentador

I_2 = corrente de carga no fim do alimentador

Substituindo a eq.(2.2) na eq.(2.1), obtém-se:

$$dp_x = 3 [I_1 - (I_1 - I_2) \cdot x]^2 R \cdot dx \quad (2.3)$$

As perdas totais que ocorrem ao longo de toda a extensão do alimentador é calculada, fazendo-se a integração da eq.(2.3) entre os limites $x = 0$. e $x = 1$, isto é:

$$P = 3 \int_0^{1.0} [I_1 - (I_1 - I_2)x]^2 R \cdot dx \quad (2.4)$$

resolvendo a integral da eq.(2.4), obtém-se:

$$P = (I_1^2 + I_1 I_2 + I_2^2)R \quad (2.5)$$

Para o caso particular, $I_2 = 0$ e fazendo $I = I_1$, a eq.(2.5) torna-se:

$$P = RI^2 \quad (2.6)$$

onde I é a corrente de carga total medida no início do alimentador

Sabendo-se que a corrente de carga I é formada de duas componentes: uma componente ativa, em fase com a tensão, $I \cos \phi$, e uma componente reativa, defasada da tensão, $I \sin \phi$, a eq.(2.6) pode ser reescrita da forma:

$$P = R [(I \cos \phi)^2 + (I \sin \phi)^2] \quad (2.7)$$

Se um banco de capacitor é instalado em algum trecho do alimentador, a componente reativa da carga, $I \sin \phi$, diminui do valor da corrente I_c que é suprida pelo capacitor. Deste modo, a

eq.(2.7) é reescrita na forma:

$$P' = R [(I \cos \phi)^2 + (I \sin \phi - I_c)^2] \quad (2.8)$$

onde P' representa as perdas através do alimentador, após a instalação do banco de capacitor de corrente I_c .

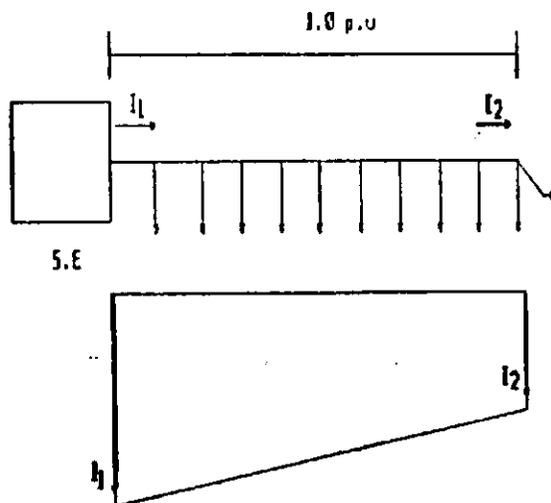


Fig.2.1- a) Alimentador primário com cargas concentrada e uniformemente distribuída e b) perfil da corrente de carga.

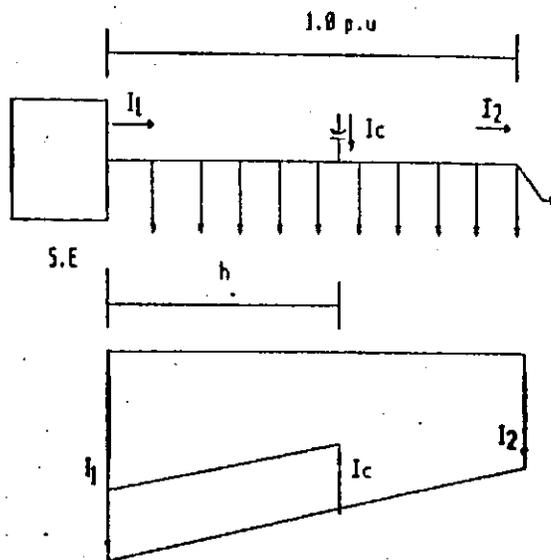


Fig.2.2 - Distribuição da corrente de carga do alimentador primário da fig.2.1, após a instalação de 1(um) banco de capacitor.

Se LP representa a redução das perdas obtida após a instalação do capacitor de capacidade I_c , tem-se:

$$LP = P - P' \quad (2.9)$$

Substituindo as eqs.(2.6) e (2.8) na eq. (2.9), e organizando os termos comuns, obtém-se:

$$LP = 2RI_c [(I \cos \phi) - I_c] \quad (2.10)$$

Como se vê pela eq.(2.10), apenas a componente reativa, $I \sin \phi$ da corrente total de carga está relacionada com a redução das perdas devido a presença do banco de capacitor.

Basicamente, a redução econômica das perdas em um alimentador primário via compensação reativa, depende da localização, capacidade nominal e tempo de operação dos capacitores que são instalados. Na medida em que estes três parâmetros sejam convenientemente projetados, através de algum procedimento prático ou teórico, é de se esperar que ocorram benefícios econômicos que justifiquem a instalação dos capacitores. Para analisar o efeito da localização, capacidade e tempo de operação dos bancos de capacitores sobre a redução das perdas de potência e das de energia, consideremos novamente o alimentador primário na fig.2.1, no qual as perdas devido a componente reativa da corrente de carga, antes da instalação de algum capacitor é calculada por:

$$\bar{P} = (\bar{I}_1^2 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 + \bar{I}_2^2) R \quad (2.11)$$

onde :

\bar{I}_1 = componente reativa da corrente de carga no início do alimentador

\bar{I}_2 = componente reativa da corrente de carga no fim do alimentador

Se um banco de capacitor de corrente I_c é instalado a uma distância h da subestação, o perfil de carga através do alimentador é modificado conforme indicado na fig.2.2. Para este caso, a equação que calcula as perdas de potência através do alimentador é dada por:

$$\bar{P}' = 3 \int_0^{1.0} [\bar{I}_1 - (\bar{I}_1 - \bar{I}_2)x - I_c]^2 R dx + 3 \int_h^{1.0} [\bar{I}_1 - (\bar{I}_1 - \bar{I}_2)x]^2 R dx \quad (2.12)$$

resolvendo as integrais, obtém-se:

$$\bar{P}' = (\bar{I}_1^2 + \bar{I}_1 \bar{I}_2 + \bar{I}_2^2)R + 3hI_c [(h-2)\bar{I}_1 - h\bar{I}_2 + \bar{I}_c]R \quad (2.13)$$

A redução das perdas LP, após a instalação do capacitor é, portanto, dada por:

$$LP = \bar{P} - \bar{P}' \quad (2.14)$$

Substituindo as eqs.(2.11) e (2.13) na eq.(2.14), obtém-se:

$$LP = 3RhI_c [(2-h)\bar{I}_1 + \bar{I}_2 h - I_c] \quad (2.15)$$

O percentual da redução das perdas ΔP , devido a presença do capacitor, é dado por:

$$\Delta P = (\bar{P} - \bar{P}') / \bar{P} \quad (2.16)$$

Substituindo as eqs.(2.11) e (2.14) na eq. (2.16), e dividindo o numerador e o denominador por \bar{I}_1^2 , obtém-se:

$$\Delta P = \frac{3hc}{1+a+a^2} [2-h+a \cdot h-c] \quad (2.17)$$

onde:

$$c = \frac{I_c}{\bar{I}_1} \quad (2.18)$$

$$a = \frac{\bar{I}_2}{\bar{I}_1} \quad (2.19)$$

definindo, $\alpha = 1/(1+a+a^2)$, a eq.(2.17) torna-se:

$$\Delta P = 3\alpha hc [(2-h)+ha-c] \quad (2.20)$$

Se o banco de capacitor opera durante o período T do ciclo de carga reativa, o percentual da redução das perdas de energia ΔE , é dado por:

$$\Delta E = \int_0^T \left\{ 3\alpha ch [(2-h)f_c + h \cdot a \cdot f_c - c] \right\} dt \quad (2.21)$$

onde f_c é o fator de carga reativa associado ao tempo de operação do capacitor. Por definição, f_c é a relação entre a demanda média da carga reativa durante o tempo T, e a demanda máxima da carga reativa neste mesmo período.

Como pode ser visto pelas eqs.(2.20) e (2.21), as reduções

das perdas de potência e das perdas de energia, devidas a presença do capacitor, é função da sua localização e capacidade nominal. Para que a redução das perdas de potência e das perdas de energia sejam máximas, a localização e a capacidade nominal do capacitor são calculadas como segue.

A condição para que a localização do capacitor, proporcione máxima redução das perdas de potência é a de que a derivada parcial de primeira ordem da eq.(2.20) em relação a localização h , seja nula, ou seja,

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial h} = 0 \quad (2.22)$$

Aplicando a eq.(2.22) na eq.(2.20) e resolvendo para h , obtemos:

$$h^* = \frac{2-c}{2(1-a)} \quad (2.23)$$

onde h^* representa a localização ótima (em p.u) do capacitor, para que a redução das perdas de potência seja máxima.

Quando o valor de h na eq.(2.20) é substituído por h^* , dado pela eq.(2.23), obtém-se o percentual máximo da redução das perdas de potência, que é dado por:

$$\Delta P_{\max} = \frac{3\alpha c}{1-a} (1-c+c^2/4) \quad (2.24)$$

Igualando a zero, a derivada parcial de 1ª ordem da eq.(2.24) em relação a c, e resolvendo para c, obtém-se a capacidade do banco de capacitor que irá resultar no percentual máximo da redução de perdas de potência, ou seja,

$$\text{Se } \frac{\partial \Delta P_{\max}}{\partial c} = 0, \quad (2.25)$$

então:

$$c=2/3 \quad (2.26)$$

$$\text{ou } I_c^* = \frac{2}{3} \bar{I}_1 \quad (2.27)$$

onde \bar{I}_1 é a corrente de carga reativa total do alimentador. Substituindo a eq.(2.26) nas eqs.(2.23) e (2.24), obtém-se:

$$h^* = 2/[3(1-a)] \quad (2.28)$$

$$\Delta P_{\max} = \frac{8\alpha}{9(1-a)} \quad (2.29)$$

De modo semelhante à eq.(2.22), a condição necessária para que a localização do capacitor, proporcione máxima redução das perdas de energia, é dada por:

$$\frac{\partial \Delta E}{\partial h} = 0 \quad (2.30)$$

onde ΔE representa o percentual da redução das perdas de energia que é dado pela eq.(2.19).

Aplicando a eq.(2.30) na eq.(2.21) e resolvendo para h , obtém-se:

$$\bar{h} = \frac{2f_c - c}{2f_c(1-a)} \quad (2.31)$$

onde \bar{h} representa a localização do capacitor que resulta em máxima redução de perdas de energia e f_c é o fator de carga reativa associado ao tempo de operação T .

Quando o valor de h na eq.(2.21) é substituído por \bar{h} , dado por (2.31), obtém-se o percentual máximo de redução das perdas de energia, que é expresso por:

$$\Delta E_{\max} = \frac{3\alpha c}{1-a} \left[fc - c + \frac{c^2}{4f_c} \right] T \quad (2.32)$$

Igualando a zero a derivada parcial de 1ª ordem da eq.(2.32) em relação a c , e resolvendo para c , obtém-se a capacidade do banco de capacitor que irá resultar em máxima redução das perdas

de energia através do alimentador, ou seja,

$$\text{Se } \frac{\partial \Delta E_{\max}}{\partial c} = 0, \quad (2.33)$$

então:

$$c = \frac{2}{3} \cdot f_c \quad (2.34)$$

$$\text{ou } \bar{I}_c = \frac{2}{3} \cdot f_c \cdot \bar{I}_1 \quad (2.35)$$

Substituindo a eq.(2.34) na eq.(2.31), obtém-se:

$$\bar{h} = \frac{2}{3(1-a)} \quad (2.36)$$

Como pode ser visto através das eqs.(2.28) e (2.36), existe uma única localização para o capacitor que resulta em máximas reduções de perdas de potência e de energia.

Com base na eq.(2.29), o efeito da localização de um banco de capacitor sobre a redução das perdas de potência através de alimentador da fig.2.1, é mostrado na fig.2.3, considerando três diferentes combinações de carga reativa e capacidade nominal do banco igual a dois terços da corrente reativa total (capacidade ótima). Como pode ser observado nesta figura, se a carga do alimentador é uniformemente distribuída ($\bar{I}_2=0$ e $a=0$), a máxima redução das perdas ocorre quando o capacitor está localizado a uma

distância equivalente a dois terços do comprimento total do alimentador, conforme é indicado através da eq.(2.26). Se a carga está concentrada no extremo do alimentador ($\bar{I}_2 = \bar{I}_1$ e $a=1$), nota-se que a localização mais adequada para o capacitor é exatamente no ponto onde está a carga.

Com base na eq.(2.24), o efeito da capacidade nominal do banco sobre a redução das perdas de potência é mostrada na fig.2.4, considerando tres diferentes combinações de carga reativa e o capacitor localizado a uma distância de dois terços do comprimento total do alimentador. Se a carga é concentrada no extremo do alimentador, a capacidade nominal do banco que resulta em máxima redução das perdas de potência deve ser igual a demanda reativa total. Se, no entanto, a carga é uniformemente distribuída ($a=0$), nota-se que, de fato, a capacidade nominal do banco deve ser 2/3 da demanda reativa total, para que ocorra máxima redução das perdas de potência.

Como pode ser visto pela eq.(2.19), o fator de carga reativa f_c , associado ao tempo de operação do capacitor, influi apenas na redução das perdas de energia. A fig.2.5 mostra a influência do fator de carga reativa sobre a redução das perdas de energia para o alimentador da fig.2.1, considerando a presença de cargas concentrada e uniformemente distribuída. Como se pode observar

nesta figura, se é estabelecido um determinado nível de compensação reativa, a máxima redução das perdas de energia é obtida para valores crescentes do fator de carga.

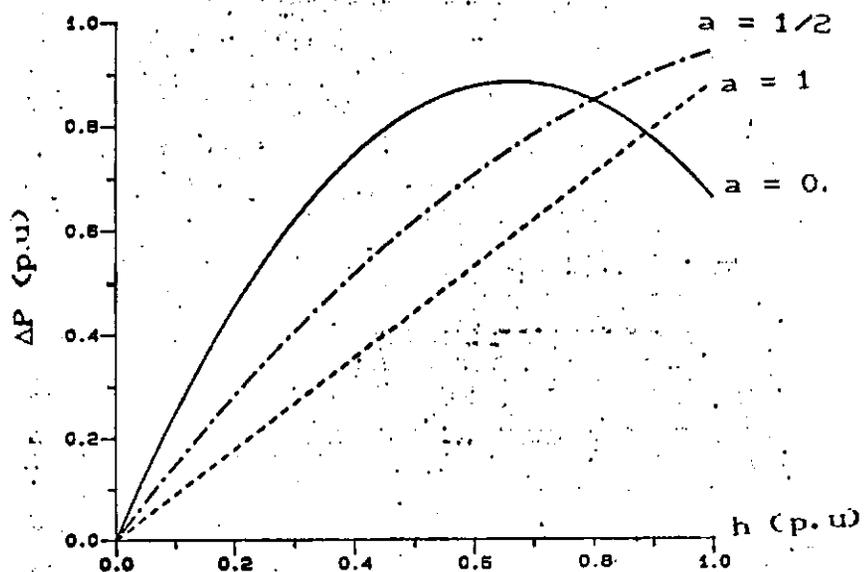


Fig.2.3 - Redução percentual das perdas de potência em função da localização de um banco de capacitor, no alimentador da fig.2.1.

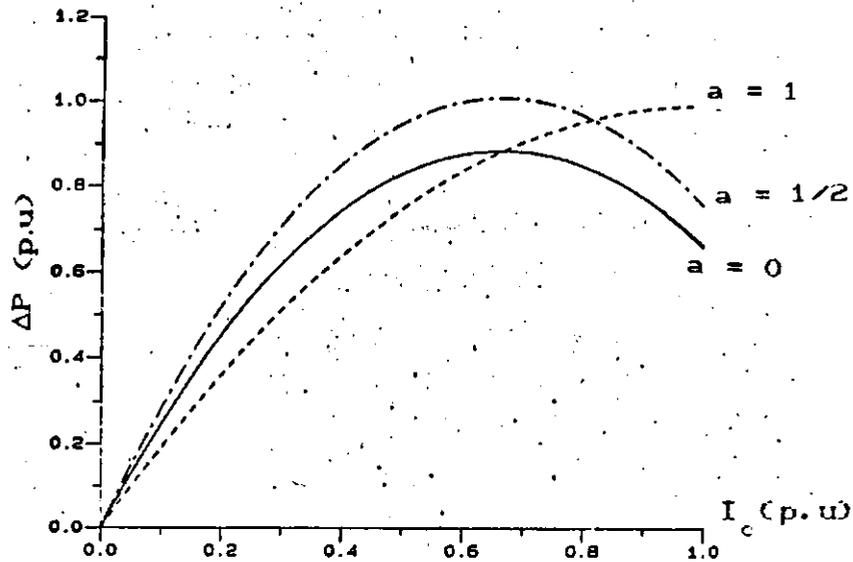


Fig.2.4 - Redução percentual das perdas de potência em função da capacidade de um banco de capacitor, no alimentador da fig.2.1.

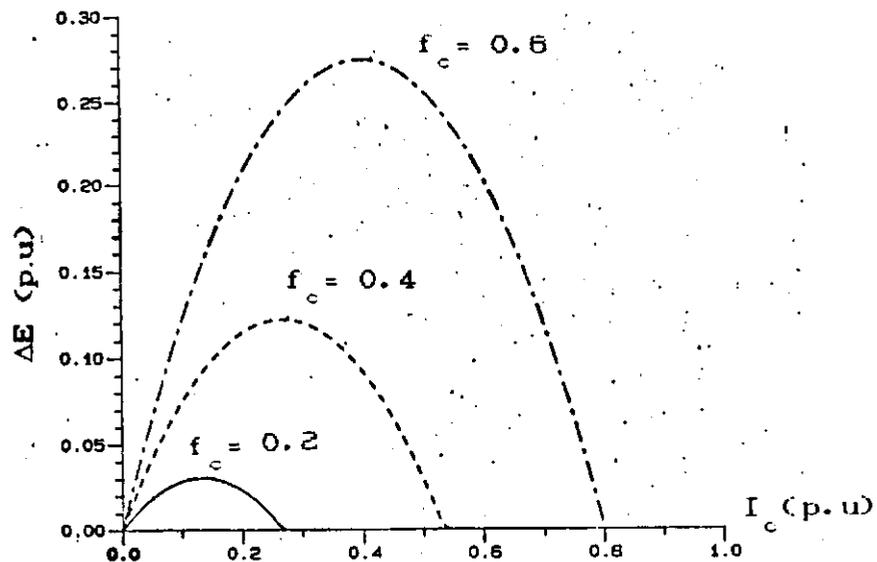


Fig.2.5 - Redução percentual das perdas de energia, no alimentador da fig.2.1, para diferentes fatores de carga.

Embora as análises apresentadas acima refiram-se ao caso particular de alimentador primário bastante simples, no qual é instalado um único banco de capacitor, ficou evidente que a filosofia utilizada para a avaliação da redução de perdas em alimentadores primários via compensação reativa, está fundamentalmente baseada na otimização da localização e capacidade nominal de bancos de capacitores.

2.6 - CONCLUSÃO

Neste capítulo, foram apresentados os aspectos gerais da aplicação de capacitores em sistemas de distribuição para tratar o problema da redução de perdas em alimentadores primários. Utilizando a configuração de um alimentador primário bem simples, o qual contém carga concentrada e uniformemente distribuída, foi feito o desenvolvimento das equações básicas de redução de perdas de potência e de energia, para o caso particular de instalação de um único banco de capacitor. Com base nas derivadas de primeira ordem das equações de perdas de potência, determina-se a capacidade nominal e a localização do capacitor para que haja máxima redução de perdas de potência no alimentador. Uma análise gráfica que mostra as influências da localização, capacidade e fator de carga reativa sobre a redução das perdas de potência e de energia, é apresentada para reforçar o entendimento das equações

que foram obtidas. Tendo em vista que as configurações dos alimentadores encontrados na prática são mais complexas, e que a presença de mais de um banco de capacitor é inevitável, para a compensação reativa sob diferentes níveis de carga, é bastante oportuno, descrever a questão da redução das perdas em alimentadores primários, através de uma metodologia mais geral e consistente, que considere estes e outros fatores realistas. Tal metodologia é apresentada nos próximos capítulos.

CAPÍTULO 3

PLANEJAMENTO E CONTROLE DA COMPENSAÇÃO REATIVA EM ALIMENTADORES PRIMÁRIOS SEM RAMAIS.

3.1 - INTRODUÇÃO

O crescente aumento nos custos de energia elétrica e a dificuldade de expansão, cada vez maior da capacidade de geração dos sistemas elétricos, estão despertando o interesse, por parte dos engenheiros, em desenvolver novas técnicas para tratar dos problemas referentes ao planejamento, controle e operação de sistemas.

Tendo em vista, principalmente a importância dos sistemas de distribuição dentro do contexto de um sistema elétrico, têm sido crescente as pesquisas nas áreas de microeletrônica e telecomunicações com o objetivo de aperfeiçoar as técnicas mais usuais de operação, automação, e controle de sistemas de distribuição. O desempenho ótimo de um sistema de distribuição exige uma atividade de planejamento que propicie o fornecimento de energia de boa qualidade aos consumidores, ao menor custo possível. Neste sentido, um dos aspectos mais importantes no planejamento destes sistemas, diz respeito a avaliação

quantitativa das perdas e os custos associados.

Neste capítulo, a questão da redução econômica das perdas em alimentadores primários, discutida no capítulo anterior, terá uma abordagem mais realista através de uma metodologia de planejamento e controle ótimos da compensação reativa, cujo o principal objetivo é a maximização da economia global que é proporcionada com a redução das perdas. A representação das cargas reativas e dos capacitores apresentada por GRAINGER e LEE (1980,1981), será tratada neste capítulo e adotada em todo o texto.

3.2 - MODELO DO ALIMENTADOR FÍSICO

É bastante comum, em estudos relativos à instalação de capacitores, considerar que o alimentador é uniforme e tenha distribuição uniforme de carga reativa. Realmente, nem o alimentador e nem sua distribuição espacial de carga são completamente uniformes. Deste modo, as técnicas que serão apresentadas neste trabalho, são fundamentalmente aquelas proposta por GRAINGER e LEE (1980), as quais são isentas da restrição alimentador e/ou carga uniforme.

Para simplificar o desenvolvimento da teoria que será aplicada posteriormente, é conveniente representar o alimentador

físico por um alimentador equivalente de resistência uniforme e comprimento unitário (modelo uniforme e normalizado). Este modelo é obtido através do seguinte procedimento:

a) Supondo que o alimentador físico é constituído por k trechos, escolhe-se a resistência em ohms por unidade de comprimento do j - ésimo trecho, r_j , para ser a resistência do modelo uniforme. Com base neste valor, o comprimento físico L_i do i -ésimo trecho, cuja resistência é r_i ohms por unidade de comprimento, passa a ser dado por:

$$L_{ui} = \frac{L_i \cdot r_i}{r_j} \quad i=1, 2, \dots, k \quad (3.1)$$

onde L_{ui} é o comprimento físico i -ésimo trecho do modelo uniforme.

b) Calcula-se o comprimento físico total do modelo uniforme, pela equação:

$$L_T = \sum_{i=1}^k L_{ui} \quad (3.2)$$

c) dividindo-se o comprimento de cada trecho do modelo uniforme, eq.(3.1), pelo seu comprimento total, eq.(3.2), obtém-se comprimento normalizado de cada trecho do modelo uniforme e normalizado, dado por:

$$Ln_i = \frac{L_{ui}}{L_T} \quad 0 < Ln_i \leq 1.0 \quad (3.3)$$

e resistência uniforme r é dada por:

$$r = \sum_{i=1}^K L_i r_i \quad \text{ohms} \quad (3.4)$$

Para ilustrar numericamente o procedimento acima descrito, consideremos o alimentador primário mostrado na fig.3.1, (GRAINGER e LEE, 1980). Os dados reais de resistência, tipo de bitola dos condutores, comprimento e carga reativa de cada trecho, estão resumidos na tab.3.1. Escolhemos como resistência do modelo uniforme, a resistência do quarto trecho $r_4 = 0.8622$ ohms/milhas.

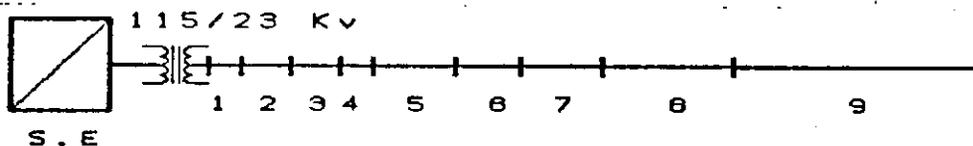


Fig.3.1 - Diagrama unifilar de um alimentador primário de 9(nove) barras, tensão 23Kv.

TRECHO	CABO	RESISTÊNCIA (Ω /milhas)	COMPRIMENTO (milhas)	CARGA REATIVA (KVAR) NO FIM DO TRECHO.
1	300 Cu	0.1951	0.63	460
2	336.4AL	0.2803	0.88	340
3	2/0 Cu	0.8390	1.70	446
4	2 Cu	0.8622	0.81	1840
5	2 Cu	0.8622	2.30	600
6	2 Cu	0.8622	1.05	110
7	4 Cu	1.3701	1.50	60
8	4 Cu	1.3701	3.50	130
9	4 Cu	1.3701	3.90	200

Tab.3.1 - Dados característicos do alimentador primário da fig.3.1.

Os resultados obtidos com aplicação do procedimento acima, a este sistema, estão indicados nas colunas 3 e 4 da tab.3.2.

TRECHO i	COMP. FÍSICO (milhas) L_i	COMPRIMENTO ASSOCIADO AO MODELO UNIFORME (milhas) $L_{ui} = (L_i \cdot r_i) / r_4$	COMPRIMENTO ASSOCIADO AO MODELO UNIFORME E NORMALIZADO $L_{ni} = L_{ui} / L_T$
1	0.63	0.1430	0.0073
2	0.88	0.2861	0.0146
3	1.70	0.8656	0.0442
4	0.81	0.8100	0.0413
5	2.30	2.30	0.1174
6	1.05	1.05	0.0536
7	1.05	2.3837	0.1216
8	3.50	5.5618	0.2838
9	3.90	6.1974	0.3162
		$L_T = 19.5977$	

Tab.3.2 - Dados associados ao alimentador físico da fig.3.1 e seus modelos uniforme e uniforme normalizado.

É importante observar, através das eqs. (3.1) e (3.2), que dependendo do valor escolhido para a resistência r_j do modelo uniforme, o comprimento de um determinado trecho do alimentador físico, poderá ser expandido, contraído ou inalterado em relação ao comprimento de outros trechos, após a obtenção do modelo uniforme e normalizado, conforme indicado na fig.3.2.

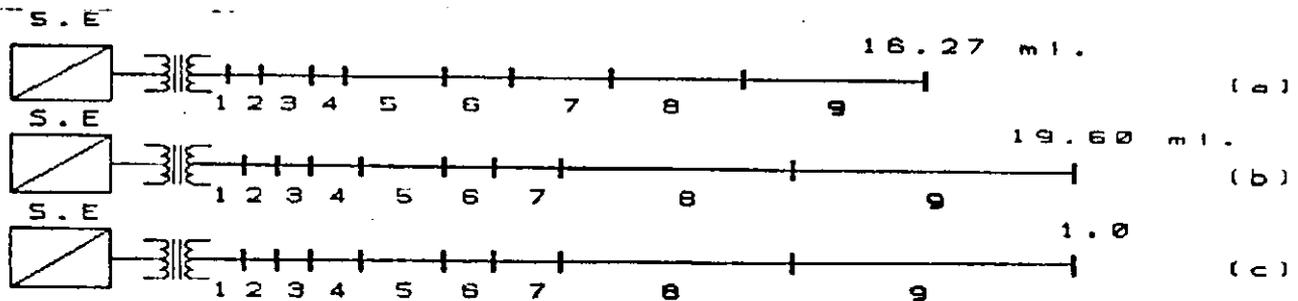


Fig.3.2 - a) O alimentador físico da fig.3.1 e seus modelos
 b) uniforme e c) uniforme normalizado

3.3 - REPRESENTAÇÃO DE CARGAS REATIVAS E CAPACITORES

Como foi visto no item anterior, o procedimento utilizado para transformação do alimentador físico em um modelo equivalente uniforme normalizado, independe da distribuição da carga reativa ao longo do alimentador, e portanto, pode ser aplicado para os mais diversos tipos de configurações reais de alimentadores.

Para qualquer alimentador radial primário, tal como aquele mostrado na fig.3.1, onde as cargas reativas estão concentradas nos fins de trecho, a função de distribuição espacial de carga reativa normalizada $F(x)$, referente ao modelo uniforme e normalizado, é definida por:

$$F(x) = \sum_{x \leq \tau \leq 1} \frac{I(\tau)}{I_s} \quad (3.5)$$

onde I_s é o valor máximo de carga reativa através do barramento principal da subestação, x é a distância normalizada medida a partir da subestação e $I(\tau)$ é a densidade da carga reativa em τ .

Nos trechos onde existe carga distribuída, a função $F(x)$ da eq.(3.5), é definida por:

$$F(x) = \int_x^{1.0} \frac{I(\tau)}{I_s} d\tau \quad (3.6)$$

O conhecimento da função distribuição de carga reativa normalizada é fundamental para o planejamento da compensação reativa em alimentadores primários, pois como será visto posteriormente, ela é utilizada na determinação dos níveis de carga reativa sob os quais os capacitores chaveados deverão entrar e sair de operação, já conhecidos a dimensão e localização dos mesmos. Para ilustrar o modo de aplicação da eq.(3.5), escolhemos novamente o alimentador da fig.3.1, cujos dados de carga reativa estão indicados na tab.3.1. A função distribuição de carga reativa normalizada $F(x)$, associada ao modelo uniforme normalizado deste alimentador é mostrada na fig.3.3. As cargas reativas foram normalizadas com base no valor máximo da carga reativa na subestação, que neste caso, é 4186 KVAR.

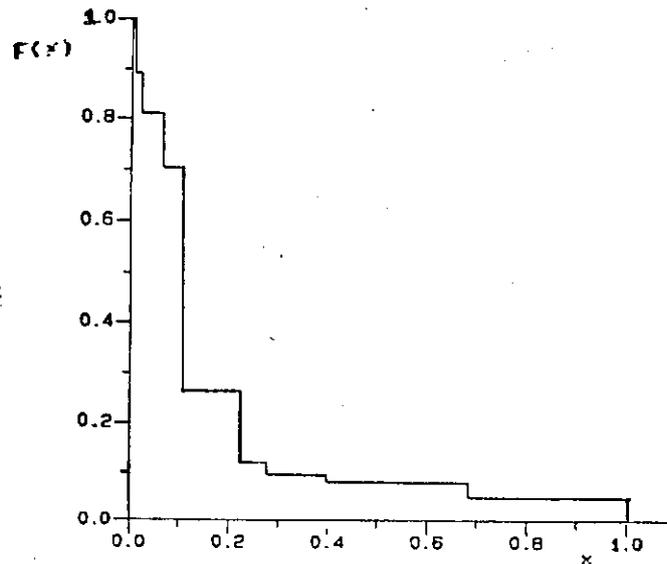


Fig.3.3 - Função distribuição de carga reativa normalizada correspondente ao alimentador da fig.3.1.

Para representação das localizações e capacidades dos capacitores ao longo do modelo uniforme normalizado, refira-se à fig.3.4. Como se vê, os n capacitores fixos e/ou chaveados são numerados consecutivamente do fim do alimentador em direção à subestação. As respectivas localizações, simbolizadas por h_i ($i=1, 2, \dots, n$) são medidas a partir do barramento da subestação. As capacidades nominais dos capacitores, simbolizadas por I_{c_i} , ($i=1, 2, \dots, n$), estão em p.u na base de carga reativa máxima na subestação. Esta mesma simbologia pode também representar a corrente reativa suprida pelos capacitores.

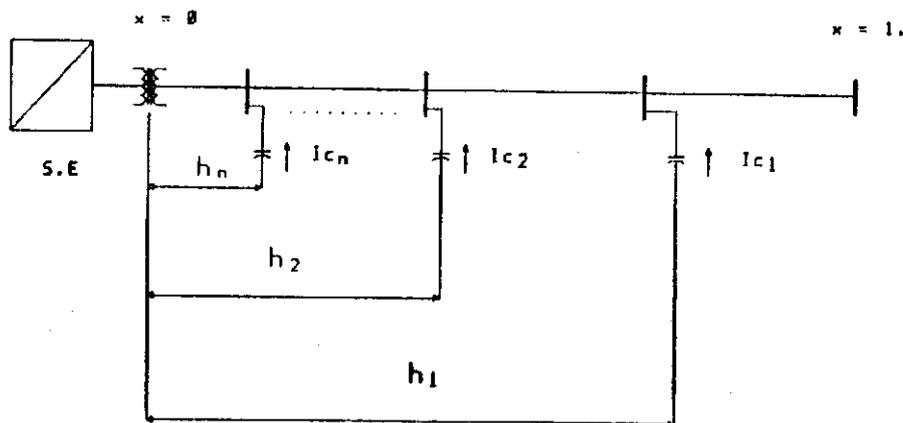


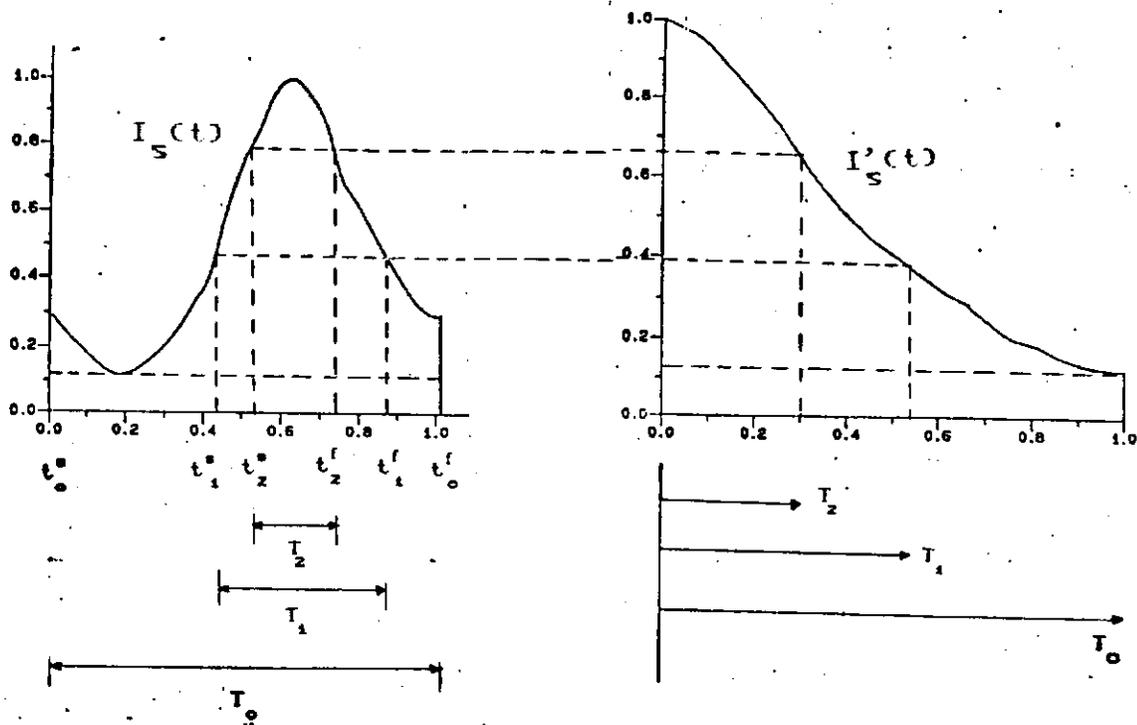
Fig.3.4 - Representação dos capacitores ao longo do modelo uniforme normalizado de um alimentador primário.

3.4 - CARACTERÍSTICAS DA VARIAÇÃO DE CARGA REATIVA COM O TEMPO.

Desde que no planejamento da compensação reativa em alimentadores primários, a presença de capacitores do tipo chaveado seja indispensável, é necessário dispor de uma representação da variação da carga ou corrente reativa do alimentador durante um período de tempo pré-estabelecido (dia, semana, mês, etc.). Dependendo da natureza de solução exigida para o planejamento, esta representação poderá ser a curva de demanda reativa diária do alimentador, como exemplificado na fig.3.5.a, ou a sua correspondente curva de duração diária de carga reativa, representada na fig.3.5.b, ambas referentes ao alimentador da fig.3.1. A definição das variáveis de tempo que

estão indicadas nestas figuras, é apresentada na seção 3.5.2, quando então será definida a estratégia utilizada para o controle da compensação reativa. A curva de duração representa a relação entre os tempos nos quais a demanda reativa total registrada na subestação, permanece igual ou superior a um determinado nível de carga. Se é desejado, por exemplo, obter o horário do dia mais conveniente para a entrada e saída de operação de capacitores chaveados, deverá ser utilizada a curva de demanda reativa diária; No entanto, se é desejado determinar somente o tempo no qual estes capacitores deverão operar, então tanto a curva de demanda diária como a curva de duração de carga podem ser igualmente utilizadas.

A natureza dos dados necessários para as análises de soluções depende do estágio atual. Por exemplo, durante a fase de planejamento, é bastante conveniente optar pela curva de duração de carga reativa, já que neste caso, a natureza aleatória dos dados de carga ou corrente obtidos na subestação, podem ser tratados com mais eficiência.



(a)

(b)

Fig.3.5 - Variação da carga reativa, com o tempo para o alimentador primário da fig.3.1. (a) curva de carga reativa diária; (b) curva de duração de carga reativa.

3.5 - ESTRATÉGIA PARA O PLANEJAMENTO E CONTROLE DA COMPENSAÇÃO REATIVA EM ALIMENTADORES PRIMÁRIOS.

3.5.1 - Definição do problema geral do planejamento.

Em geral, o planejamento da compensação reativa consiste na determinação da capacidade, localização e/ou tempo de operação ótimos de um número pré-estabelecido de bancos de capacitores fixos e/ou chaveados, em função da curva de carga reativa diária do alimentador e dos custos das perdas e dos capacitores. Para facilitar a resolução do problema geral do planejamento da compensação reativa, este será tratado como dois subproblemas interdependentes. O primeiro deles trata da determinação da capacidade nominal e localização dos capacitores a serem instalados, enquanto que o segundo trata do controle e supervisão do tempo de operação dos capacitores do tipo chaveado, assumindo que suas capacidades e localizações já sejam conhecidos. Com base na solução obtida, determina-se a redução das perdas de pico de potência e das perdas de energia, as quais irão proporcionar máxima economia global.

3.5.1.1 - A questão do planejamento.

O problema do planejameneto da compensação reativa

consiste na determinação da capacidade nominal(kvar) e da localização ótimas de um número pré-estabelecido de bancos capacitores fixos e/ou chaveados a serem instalados no alimentador, de modo a tornar máxima a economia proveniente da redução das perdas de energia e de pico de potência. Para isto, é necessário ter disponível os dados de demanda diária, para que seja construída a curva típica de duração de carga reativa, tal como aquela mostrada na fig.3.5.b. Obviamente que, no caso dos capacitores chaveados, deve ser conhecido previamente, o nível de carga reativa sob o qual deverão ser ligados e assim, o tempo sob o qual deverão permanecer operando ao longo do ciclo de carga, com o auxílio da curva de duração de carga reativa. Para os capacitores fixos, é estabelecido que devem compensar o nível de carga mínima do sistema e portanto, deverão operar durante todo o ciclo de carga.

3.5.1.2 - A questão do controle

O problema do controle da compensação reativa consiste na determinação dos tempos ótimos de operação dos capacitores chaveados, já dimensionados e localizados no alimentador, de acordo com uma sequência de entrada em operação pré-definida. Com base nas informações sobre a capacidade e localização ótimas destes capacitores e da distribuição espacial de carga reativa ao

longo do alimentador, são determinados os níveis de carga reativa sob os quais, os capacitores deverão operar. Associados a estes níveis de carga, os tempos de operação, que resultam em máxima redução de perdas, são obtidos com o auxílio da curva de demanda reativa diária ou a sua correspondente curva de duração de carga. A operação dos capacitores não é necessariamente feita em tempos iguais tornando possível, então, a determinação de diferentes tempos de operação. A implementação deste controle, baseia-se nas seguintes considerações:

a) A demanda de carga reativa medida em algum ponto do alimentador não varia com o tempo, e deste modo, pode ser medida diretamente na subestação. Portanto, podemos definir a função carga reativa na subestação em função do tempo t , e da distância x de um ponto de carga até a subestação, $I_g(x,t)$, como sendo:

$$I_g(x,t) = I_g(t) \cdot F(x) \quad (3.7)$$

onde $F(x)$ é a função distribuição de carga reativa normalizada, e $I_g(t)$ é o nível de carga reativa medido na subestação no tempo t .

b) O tempo no qual um determinado capacitor chaveado entra em operação, quando há elevação da carga reativa, e aquele no qual sai de operação, quando há diminuição da carga, deve corresponder a um mesmo nível de carga reativa, ou seja, após ter entrado em

operação o capacitor deverá ser desligado automaticamente no instante em que a carga reativa atingir o nível igual aquele sob o qual foi ligado.

3.5.2 - Considerações sobre a estratégia utilizada para o controle da compensação reativa.

Como foi visto anteriormente, o controle da compensação reativa através do chaveamento de bancos de capacitores sob diferentes níveis de carga reativa, é estabelecido em função da distribuição espacial de carga reativa normalizada ao longo do modelo uniforme e normalizado do alimentador. Tendo em vista que o objetivo do controle é a máxima redução das perdas de energia, o nível de carga reativa estabelecido num dado instante do ciclo de carga, determinará se naquele instante é solicitada a presença de um ou mais capacitores chaveados. No caso de solicitação de mais de um capacitor, o nível de carga, também determinará a sequência de entrada em operação. Como se vê, trata-se de um problema combinacional, cuja natureza de resolução é relativamente complicada.

Para tratar com mais simplicidade esta questão, a estratégia utilizada para o controle da compensação reativa sob diferentes níveis de carga, terá como base as seguintes premissas:

a) De acordo com o tempo de operação sobre o ciclo de carga, cada capacitor instalado, pertence a um dos seguintes tipos: tipo 0, tipo 1, tipo 2., tipo j,, tipo m.

b) Os capacitores do tipo 0 são, por definição, capacitores fixos, ou seja, operam permanentemente no sistema, independentemente no nível de carga reativa; Os capacitores do tipo 1, tipo 2, ... tipo m, por outro lado, são capacitores chaveados que entram e saem de operação de acordo com o aumento ou decréscimo do nível de carga reativa na subestação.

c) Na faixa de tempo do ciclo de carga, em que se observa um crescimento do nível de carga $I_r(t)$, os capacitores do tipo j, $j=1, 2, \dots, m$, devem entrar em operação antes dos capacitores do tipo $(j+1)$, $(j+2)$, ...etc, e sair de operação antes dos capacitores do tipo $(j-1)$, $(j-2)$, ...1, na faixa de tempo onde se verifica um decréscimo daquele nível.

Para ilustrar o tipo de notação descrito acima, referimo-nos ao perfil de carga reativa diária mostrado fig.3.5.a, relativo ao alimentador da fig.3.1. Os tempos nos quais três capacitores entram e saem de operação, estão representados pelas variáveis t_j^e e t_j^f respectivamente, onde j neste caso, assume os valores 0, 1 e 2. Os tempos t_0^e e t_0^f , associados com os capacitores fixos, embora

não possuem o mesmo significado prático em relação aos demais, estão indicados apenas por consistência da notação. Por definição, o tempo $T_j = t_j^f - t_j^s$, $j=0, 1, 2, \dots, m$, representa o tempo de operação do capacitor do tipo j . Estes tempos são representados ao longo da curva de duração de carga reativa, conforme mostrado na fig.3.5.b.

Como foi dito no item 3.5.1.2, os níveis de carga reativa correspondentes aos instantes de entrada e saída de operação dos capacitores chaveados, devem ser iguais, ou seja,

$$I_s(t_j^s) = I_s(t_j^f), \text{ para todo } j \quad (3.8)$$

Com base nesta propriedade, o controle da compensação reativa, será exercido considerando que, para todos os conjuntos de capacitores chaveados do tipo j , com dimensões e localizações conhecidas, o nível de carga reativa sob os quais deverão entrar ou sair de operação deve ser pré-estabelecido. Deste modo, no instante em que a carga reativa medida na subestação atinge o nível pré-estabelecido $I_s(t_j^s) = I_s(t_j^f)$, os capacitores do tipo j serão ligados ou desligados do sistema, dependendo se naquele instante, ocorre aumento ou diminuição da demanda de carga.

3.5.3 - A função objetivo

A economia líquida que é obtida com a redução das perdas de potência e de energia, via o planejamento e controle de compensação reativa, é calculada em função dos custos associados a estas perdas e dos custos associados aos bancos de capacitores. A equação que representa esta economia é denominada, " FUNÇÃO OBJETIVO ", S, que é definida do seguinte modo:

$$\boxed{\text{FUNÇÃO OBJETIVO S}} = \boxed{\text{CUSTO DEVIDO A REDUÇÃO DAS PERDAS DE POTÊNCIA}} + \boxed{\text{CUSTO DEVIDO A REDUÇÃO DAS PERDAS DE ENERGIA}} - \boxed{\text{CUSTO DOS CAPACITORES}}$$

(3.9)

A eq.(3.9) constitui a base de toda a estratégia do planejamento e controle da compensação reativa, com a qual serão determinadas as três variáveis de interesse: capacidade nominal, localizações e tempos de operação dos bancos de capacitores que tornam máximas a redução das perdas de potência e a redução das perdas de energia. Com a redução máxima das perdas, ocorre maximização da economia líquida.

Para representar matematicamente a função objetivo S, faremos uso da mesma notação proposta por GRAINGER e LEE (1982). Como foi dito anteriormente, cada um dos n capacitores instalados

no alimentador deve pertencer a um dos conjuntos de tipos 0, 1, 2, ..., m. O tipo do i-ésimo capacitor é denotado por u_i ou simplesmente, j . Com base nesta notação, T_{u_i} ou T_j representa o tempo de operação do capacitor do tipo u_i . Além disto, são definidos os seguintes conjuntos:

$A(j)$: conjunto dos índices dos capacitores do tipo j .

$\bar{A}(j)$: conjunto dos índices dos capacitores do tipo 0, 1, ..., $j-1, j$, ou seja, $\bar{A}(j) = \{A(0), A(1), \dots, A(j)\}$.

As localizações dos capacitores, simbolizadas por h_i ($i=1, 2, \dots, n$), são medidas consecutivamente a partir do extremo do alimentador, representado pelo modelo uniforme normalizado. As correspondentes capacidades nominais, simbolizadas por I_{c_i} ($i=1, 2, \dots, n$), estão em p.u. com base no nível de carga reativa total medido na subestação.

Considerando que LP e LE representam respectivamente a redução das perdas de potência e a redução das perdas de energia devido a instalação de n capacitores em um alimentador primário, a função objetivo S será expressa por:

$$S = K_p LP + K_e LE - K_{cf} \sum_{\substack{i=1 \\ u_i=0}}^n I_{c_i} - K_{ce} \sum_{\substack{i=1 \\ u_i \neq 0}}^n I_{c_i} \quad (3.10)$$

onde:

K_p : custo médio anual do KW de perda de potência.

K_e : custo médio anual do KWh de perda de energia.

$K_{ef}(K_{cs})$: custo médio anual associado a unidade de capacitor fixo (chaveado).

3.6 - OTIMIZAÇÃO DAS PERDAS EM ALIMENTADORES PRIMÁRIOS : FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO MÉTODO DE SOLUÇÃO.

De acordo com as considerações feitas em relação à estratégia ótima do planejamento e controle da compensação reativa, torna-se praticamente inviável a determinação simultânea das três variáveis de interesse: capacidade nominal, localização e tempo de operação dos capacitores, que maximizem a função objetivo S (eq.3.9). Diante disto, GRAINGER e LEE (1980), propuseram um método para solução do problema geral de otimização que consiste na decomposição deste, em três subproblemas interdependentes, onde em cada um deles, duas das três variáveis de decisão são conhecidas previamente, restando então, determinar a terceira variável. Este método, conforme foi comentado no início deste capítulo, é mais completo pois trata do problema com mais realidade. Por esta razão, será explorado com detalhes por todo este trabalho.

A decomposição do problema geral de otimização em três subproblemas, baseia-se no fato de que cada capacitor instalado no alimentador contribui individualmente para o total da redução das perdas de pico de potência, LP, e de energia, LE. Do ponto de vista analítico e computacional, seria bastante vantajoso representar LP e LE em função das contribuições individuais de cada capacitor. No entanto, tais contribuições não são completamente independentes. Como será visto adiante, a parcela de redução das perdas de potência e de energia associada com a adição de um novo capacitor, depende das contribuições individuais dos capacitores anteriormente instalados. Entretanto, os valores totais de redução das perdas podem ser avaliados independentemente, através de um equacionamento relativamente simples, como será mostrado a seguir.

Considere um alimentador primário, no qual serão instalados n capacitores em derivação para minimizar perdas de potência e de energia. Seja $I_r(t)$, a variação com o tempo da demanda reativa neste alimentador, tal como aquela mostrada na fig. 3.5.a. Como demonstra GRAINGER e LEE (1982), a redução total nas perdas de potência e de energia devido a presença dos capacitores é, respectivamente, dada por:

$$LP = 3 \sum_{i=1}^n LP_i \quad (3,11)$$

$$LE = 3 \sum_{i=1}^n LE_i \quad (3.12)$$

onde $LP_i (LE_i)$ representa a redução das perdas de potência (energia), que é obtida após a adição do i -ésimo capacitor, considerando que os capacitores 1, 2, ... $i-1$, já foram instalados. Para $i=1, 2, \dots, n$, tem-se:

$$LP_i = 2rI_{c_i} \int_0^{h_i} \left[F(x) - \sum_{k=1}^{i-1} I_{c_k} \right] dx - rh_i I_{c_i}^2 \quad (3.13)$$

onde, por definição: $\sum_{k=1}^0 I_{c_k} = 0$.

No caso particular do alimentador primário da fig.2.1, no qual é instalado um único banco de capacitor, $i=1$ e a função distribuição da corrente de carga reativa é linear, dada por:

$$F(x) = \bar{I}_1 - (\bar{I}_1 - \bar{I}_2)x \quad (3.14)$$

onde \bar{I}_1 e \bar{I}_2 estão definidas na seção 2.4.

Substituindo a eq.(3.14) na eq.(3.13) e fazendo-se $r=R$, $h=h_1$ e $I_c=I_{c_1}$, tem-se:

$$LP_1 = 2RI_{c_1} \int_0^h \left[\bar{I}_1 - (\bar{I}_1 - \bar{I}_2)x \right] dx - rhI_{c_1}^2 \quad (3.15)$$

$$LP_1 = RI_{c_1}h \left[(2-h)\bar{I}_1 + \bar{I}_2h \right] - RhI_{c_1}^2 \quad (3.16)$$

$$LP_1 = RhI_c [(2-h)\bar{I}_1 + \bar{I}_2 h - I_c] \quad (3.17)$$

Substituindo a eq.(3.17) na eq.(3.11), obtém-se:

$$LP = 3RhI_c [(2-h)\bar{I}_1 + \bar{I}_2 h - I_c] \quad (3.18)$$

que equivale à eq.(2.15) do capítulo 2.

A variação das perdas de pico de potência ao longo do ciclo de carga reativa resulta nas perdas de energia. Sendo assim, a equação que calcula a redução das perdas de energia LE_i devido a instalação do i -ésimo capacitor é obtida fazendo-se a integração da eq.(3.13) sobre a função carga reativa variável no tempo, dada pela eq.(3.7). Em função das variáveis que representam os tempos de entrada e de saída dos capacitores chaveados, tem-se:

$$LE_i = \sum_{j=u_i}^{m-1} \int_{t_j}^{t_{j+1}^s} \left[2rI_c \int_0^{h_i} (I_s(t)F(x) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \in A(j)}}^{i-1} I_{c_k}) dx - rh_i I_{c_i}^2 \right] dt$$

$$+ \int_{t_m^s}^{t_m^f} \left[2rI_c \int_0^{h_i} (I_s(t)F(x) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \in A(m)}}^{i-1} I_{c_k}) dx - rh_i I_{c_i}^2 \right] dt$$

$$+ \sum_{j=u_i}^{m-1} \int_{t_{j+1}^f}^{t_j} \left[2rI_c \int_0^{h_i} (I_s(t)F(x) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \in A(j)}}^{i-1} I_{c_k}) dx - rh_i I_{c_i}^2 \right] dt \quad (3.19)$$

Como se pode observar pela eqs.(3.13) e (3.19), o nível da demanda de carga reativa, $I_s(t)$, em algum instante t do ciclo de carga, bem como o intervalo de tempo sobre o qual os capacitores chaveados operam acima deste nível, tem efeito apenas na redução das perdas de energia. Conseqüentemente, a função $I_s'(t)$ que representa a duração dos níveis de carga reativa, tal como aquela mostrada na fig.3.5.b, pode ser igualmente utilizada na eq. (3.20), permitindo assim, a utilização da variável T_j , $j = 1, 2, \dots, m$, ao invés das variáveis t_j^s e t_j^f , simplificando consideravelmente a expressão de LE_i . Deste modo, após algumas operações algébricas, a eq.(3.19) é reescrita na forma:

$$LE_i = \sum_{j=1}^{m-1} \int_{T_{j1}}^{T_j} \left\{ 2rIc_i \int_0^{h_i} [I_s'(t) F(x) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \in A(j)}}^{i-1} Ic_k] dx - rh_i Ic_i^2 \right\} dt \quad (3.20)$$

Conforme foi dito no item 3.5.1.2, a operação dos capacitores do tipo chaveado não ocorre necessariamente em tempos iguais do ciclo de carga. Isto significa que para cada período de tempo em que capacitores do tipo j operam, há um fator de carga reativa correspondente. Matematicamente, o fator de carga reativa associado ao tempo de operação T_j , é definido por:

$$F_{c_j} = \frac{1}{T_j} \int_0^{T_j} I_s'(t) dt \quad (3.21)$$

Portanto, em função do fator de carga reativa F_{c_j} , a eq.(3.20), torna-se igual a:

$$LE_i = 2rIc_i Tu_i F_{c_{u_i}} \int_0^{h_i} F(x) dx - rh_i Tu_i Ic_i^2 - 2rIc_i h_i \left[Tu_i \sum_{\substack{k=1 \\ k \in \bar{A}(u_i)}}^{i-1} Ic_k + \sum_{j=u_i+1}^m T_j \sum_{\substack{k=1 \\ k \in \bar{A}(j)}}^{i-1} Ic_k \right] \quad (3.22)$$

Como se pode notar, através das equações (3.13) e (3.22), a redução das perdas de potência e de energia estão expressas em função da capacidade, localização e tempo de operação dos capacitores. Para maximizar a função objetivo S, eq.(3.10), as variáveis Ic_i , h_i , Tu_i , ($i=1, 2, \dots, n$), serão determinadas através da resolução dos três subproblemas de otimização, conforme é descrito a seguir.

3.6.1 - Subproblema A: Otimização da capacidade nominal.

Para maximizar a função objetivo S ou economia líquida global proveniente da redução das perdas de potência e de energia, os valores ótimos das capacidades nominais Ic_1, Ic_2, \dots, Ic_n de n capacitores, que serão localizados respectivamente em h_1, h_2, \dots, h_n e cujos tempos de operação associados àqueles do tipo j, estejam de acordo com uma sequência de operação pré-estabelecida,

são determinados como segue.

Se são conhecidos os tempos de operação T_j para os capacitores do tipo j , $j=1, 2, \dots, m$, a condição para a otimização da capacidade do i -ésimo capacitor é expressa por:

$$\frac{\partial S}{\partial I_{c_i}} = 0 \quad i=1, 2, \dots, n \quad (3.23)$$

Aplicando a eq.(3.23) à eq.(3.10), tem-se:

$$\frac{\partial S}{\partial I_{c_i}} = K_p \frac{\partial LP}{\partial I_{c_i}} + K_e \frac{\partial LE}{\partial I_{c_i}} - K_{ci} = 0 \quad (3.24)$$

onde:

$$K_{ci} = \begin{cases} K_{cf}, & \text{se } u_i = 0 \\ K_{ce}, & \text{se } u_i \neq 0 \end{cases} \quad (3.25)$$

Com base nas eqs.(3.13) e (3.22), tem-se:

$$\frac{\partial LP_i}{\partial I_{c_i}} = 2r \int_0^{h_i} F(x) dx - 2rh_i \sum_{k=1}^{i-1} I_{c_k} \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial LP_k}{\partial I_{c_i}} = \begin{cases} -2rh_k I_{c_k} & \text{para } k > i \\ 0 & \text{para } k < i \end{cases} \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial LE_i}{\partial I_{ci}} = 2rT_{ui} F_{c_{u_i}} \int_0^{h_i} F(x) dx - 2rh_i \sum_{j=u_i}^m (T_j \sum_{\substack{k=1 \\ k \in \bar{\Lambda}(j)}}^{i-1} I_{c_k}) \quad (3.28)$$

$$\frac{\partial LE_k}{\partial I_{ci}} = \begin{cases} -2rh_k I_{c_k} T_{u_i} & \text{para } k > i \text{ e } u_k \leq u_i \\ -2rh_k I_{c_k} T_{u_k} & \text{para } k > i \text{ e } u_k > u_i \\ 0 & \text{para } k < i \end{cases} \quad (3.29)$$

A eq.(3.24) pode ser rescrita na seguinte forma:

$$\frac{\partial S}{\partial I_{ci}} = K_p \sum_{k=1}^n \frac{\partial LP_k}{\partial I_{ci}} + K_o \sum_{k=1}^n \frac{\partial LE_k}{\partial I_{ci}} - K_{ci} = 0 \quad (3.30)$$

Substituindo as eqs. (3.26)-(3.29) na eq.(3.30) e organizando os termos comuns, obtém-se um sistema de equações algébricas lineares, que na forma matricial é dado por:

$$[H] [I_c] = [D] \quad (3.31)$$

onde $[I_c] = [I_{c_1} I_{c_2} \dots I_{c_n}]^T$ é o vetor n-dimensional das capacidades ou correntes nominais dos capacitores.

$$D_i = \begin{cases} (K_p + K_o T_{u_i} F_{c_{u_i}}) \int_0^{h_i} F(x) dx - \frac{K_{cf}}{2r}, & \text{se } u_i = 0. \\ (K_p + K_o T_{u_i} F_{c_{u_i}}) \int_0^{h_i} F(x) dx - \frac{K_{cs}}{2r}, & \text{se } u_i \neq 0. \end{cases} \quad (3.32)$$

$$H_{ij} = \begin{cases} h_i (K_p + K_e T u_i) & \text{se } j \leq i \text{ e } u_j \leq u_i \\ h_i (K_p + K_e T u_j) & \text{se } j < i \text{ e } u_j > u_i \\ h_j (K_p + K_e T u_i) & \text{se } j > i \text{ e } u_j \leq u_i \\ h_j (K_p + K_e T u_j) & \text{se } j > i \text{ e } u_j > u_i \end{cases} \quad (3.33)$$

3.6.2 - Subproblema B: Otimização do tempo de operação.

Se n capacitores de capacidades $I_{c_1}, I_{c_2}, \dots, I_{c_n}$, estão localizados, respectivamente às distâncias h_1, h_2, \dots, h_n da subestação, o tempo de operação $T_j, j=1, 2, \dots, m$, no qual os capacitores do tipo j , deverão operar, para que haja redução das perdas de potência e de energia, e conseqüentemente, maximização da economia líquida resultante, é determinado como segue.

Como pode ser visto pelas eqs.(3.13) e (3.22), o tempo de operação dos capacitores tem efeito apenas na redução das perdas de energia. Deste modo, a condição necessária para otimização do tempo $T_j, j=1, 2, \dots, m$, está definida por:

$$\frac{\partial S}{\partial T_j} = K_e \frac{\partial LE}{\partial T_j} = 0 \quad (3.34)$$

onde:

$$\frac{\partial LE}{\partial T_j} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial LE_i}{\partial T_j} \quad (3.35)$$

Com base na eq.(3.22), tem-se:

$$\frac{\partial S}{\partial T_j} = \begin{cases} -2rIc_i \int_0^{h_i} \left[I'_s(T_j)F(x) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \in \bar{A}(j)}}^{i-1} Ic_k \right] dx + rh_i Ic_i^2 & \text{se } j=u_i \\ 0 & \text{se } j < u_i \\ 2rh_i Ic_i \sum_{\substack{k=1 \\ k \in \bar{A}(j)}}^{i-1} Ic_k & \text{se } j > u_i \end{cases} \quad (3.36)$$

Substituindo a eq. (3.36) na eq. (3.35), obtém-se:

$$\sum_{\substack{k=1 \\ k \in \bar{A}(j)}}^n \left\{ 2rIc_i \int_0^{h_i} \left[I'_s(T_j)F(x) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \in \bar{A}(j)}}^{i-1} Ic_k \right] dx - rh_i Ic_i^2 \right\} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \in \bar{A}(j-1)}}^n \left[2rIc_i h_i \sum_{\substack{k=1 \\ k \in \bar{A}(j)}}^{i-1} Ic_k \right] = 0 \quad (3.37)$$

$$I'_s(T_j) \sum_{i=1}^n Ic_i \int_0^{h_i} F(x) dx = \sum_{i=1}^n \left\{ h_i Ic_i \left[\frac{Ic_i}{2} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \in \bar{A}(j)}}^{i-1} Ic_k \right] \right\}$$

$$+ \sum_{\substack{i=1 \\ i \in A(j-1)}}^n \left[h_i I_{c_i} \left(\sum_{\substack{k=1 \\ k \in A(j)}}^{i-1} I_{c_k} \right) \right] \quad (3.38)$$

Resolvendo para $I'_s(T_j)$, obtém-se:

$$I'_s(T_j) = \frac{\sum_{i \in A(j)} \left\{ h_i I_{c_i} \left[\frac{I_{c_i}}{2} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \in A(j)}}^{i-1} I_{c_k} \right] \right\} + \sum_{i \in A(j-1)} \left[h_i I_{c_i} \left(\sum_{\substack{k=1 \\ k \in A(j)}}^{i-1} I_{c_k} \right) \right]}{\sum_{i \in A(j)} I_{c_i} \int_0^{h_i} F(x) dx} \quad (3.39)$$

Na eq.(3.39), o termo à esquerda corresponde ao nível de carga reativa sob o qual o capacitor do tipo j deve operar, durante o tempo T_j . Este mesmo nível determina o tempo no qual o capacitor do tipo j deve entrar em operação, t_j^j , quando há aumento de carga reativa, e aquele no qual deve sair de operação, t_j^f , quando há decréscimo da carga, ou seja,

$$I_s(t_j^s) = I_s(t_j^f) = I'_s(T_j) \quad (3.40)$$

onde $I_s(t)$ é a representação da curva de carga reativa diária.

3.6.2.1 - Implementação da estratégia de controle da compensação reativa.

Como base nas considerações a respeito da estratégia do controle da compensação reativa, já discutidas na seção 3.5.2, é obtida a máxima redução das perdas de energia sem afetar, é claro, a demanda total exigida pelos consumidores. Se os capacitores do tipo j já estão instalados ao longo do alimentador, a máxima redução nas perdas de energia é alcançada, se tais capacitores forem programados para entrar em operação quando o nível de carga reativa atingir o valor dado por:

$$I_s(t_j^0) = \frac{\sum_{i \in A(j)} \left[h_i I_{c_i} \left(\frac{I_{c_i}^{i-1}}{2} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \in \bar{A}(j)}}^{i-1} I_{c_k} \right) \right] + \sum_{i \in A(j-1)} \left[h_i I_{c_i} \sum_{\substack{k=1 \\ k \in A(j)}}^{i-1} I_{c_k} \right]}{\sum_{i \in A(j)} I_{c_i} \int_0^{h_i} F(x) dx} \quad (3.41)$$

Estes capacitores deverão permanecer em operação até que o nível de carga reativa atinja novamente o valor da eq.(3.41), quando, então, serão automaticamente desligados. É interessante observar, pela equação acima, que o nível de carga no qual capacitores deverão ser chaveados dependem basicamente das suas capacidades nominais e localizações, o que representa uma

característica muito importante, sob o ponto de vista de implementação desta estratégia de controle. Outra característica bastante realista de implementação deste controle, diz respeito a possibilidade de construção de diferentes funções de distribuição de carga reativa $F(x)$ para representar qualquer distribuição espacial de carga reativa não uniforme ao longo do dia. Isto significa que não é necessário assumir que a carga esta uniformemente distribuída ao longo do alimentador. Em função do período do dia em que as cargas operam em suas capacidades máximas, escolhe-se a função de distribuição $F(x)$ mais apropriada para ser usada na eq. (3.41).

Desta forma, os níveis de carga reativa associados com o tempo de chaveamento dos vários tipos de capacitores, são calculados para diferentes períodos do dia. Além disto, a aplicação da eq.(3.41), não faz restrições quanto ao tipo de dados e configuração do alimentador. Portanto, a estratégia de controle aqui apresentada, pode ser aplicada para uma ampla faixa de circunstâncias realistas, mediante o uso de um sistema apropriado de aquisição de dados, que considere variações em toda configuração do alimentador.

3.6.3 - Subproblema C: Otimização da localização

Se n capacitores de capacidades $I_{c_1}, I_{c_2}, \dots, I_{c_n}$, estão disponíveis para serem instalados ao longo de um alimentador primário, e se o tempo de operação T_j , $j=1, 2, \dots, m$, dos capacitores chaveados são pré-estabelecidos, a localização ótima de cada um destes capacitores que resulta em máxima economia, é obtida como segue.

Como pode ser visto através das eqs.(3.13) e (3.22), as reduções das perdas de potência, LP_i , e das perdas de energia, LE_i , devidas a adição do i -ésimo capacitor, não depende da localização do j -ésimo capacitor, $j \neq i$, que já está instalado. Sendo assim, a condição necessária para que a localização h_i do i -ésimo capacitor, seja ótima, é expressa pela seguinte equação:

$$\frac{\partial S}{\partial h_i} = K_p \frac{\partial LP_i}{\partial h_i} + K_e \frac{\partial LE_i}{\partial h_i} = 0 \quad (3.42)$$

Com base nas eqs.(3.13) e (3.22), tem-se:

$$\frac{\partial LP_i}{\partial h_i} = 2rI_{c_i} \left[F(h_i) - \sum_{k=1}^{i-1} I_{c_k} \right] - rI_{c_i}^2 \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial LE_i}{\partial h_i} = T_{u_i} \left[2rI_{c_i} F_{c_{u_i}} F(h_i) - rI_{c_i}^2 \right] - 2rI_{c_i} \left[T_{u_i} \sum_{\substack{k=1 \\ k \in \bar{A}(u_i)}}^{i-1} I_{c_k} \right. \\ \left. + \sum_{j=u_i+1}^m T_j \sum_{\substack{k=1 \\ k \in A(j)}}^{i-1} I_{c_k} \right] \quad (3.44)$$

Substituindo as eqs. (3.43) e (3.44) na eq. (3.42), obtém-se:

$$F(h_i) \left[K_p + K_e T_{u_i} F_{c_{u_i}} \right] = K_p \left[\frac{I_{c_i}}{2} + \sum_{k=1}^{i-1} I_{c_k} \right] + K_e \left[T_{u_i} \frac{I_{c_i}}{2} + \sum_{k=1}^{i-1} T_M I_{c_k} \right] \quad (3.45)$$

Resolvendo a eq. (3.45) para $F(h_i)$, obtém-se:

$$F(h_i) = \frac{\left[K_p \left(\frac{I_{c_i}}{2} + \sum_{k=1}^{i-1} I_{c_k} \right) + K_e \left(T_{u_i} \left(I_{c_i} / 2 \right) + \sum_{k=1}^{i-1} T_M I_{c_k} \right) \right]}{\left(K_p + K_e T_{u_i} F_{c_{u_i}} \right)} \quad (3.46)$$

onde:

$$T_M = \begin{cases} T_{u_i}, & \text{se } u_i \geq u_k \\ T_{u_k}, & \text{se } u_i < u_k \end{cases} \quad (3.47)$$

Portanto, a localização ótima h_i do i -ésimo capacitor é obtida através da função distribuição de carga reativa $F(x)$, de modo que o valor de h_i satisfaça a eq. (3.45).

Como se pode observar através das equações (3.31), (3.39) e (3.45), a resolução de um subproblema particular faz uso dos valores conhecidos das variáveis que são determinadas nos subproblemas restantes, isto é, os três subproblemas estão interrelacionados. Sendo assim, o problema geral da otimização das perdas será avaliado com base num procedimento iterativo de resolução dos subproblemas A, B e C, conforme mostra o fluxograma da fig.3.6.

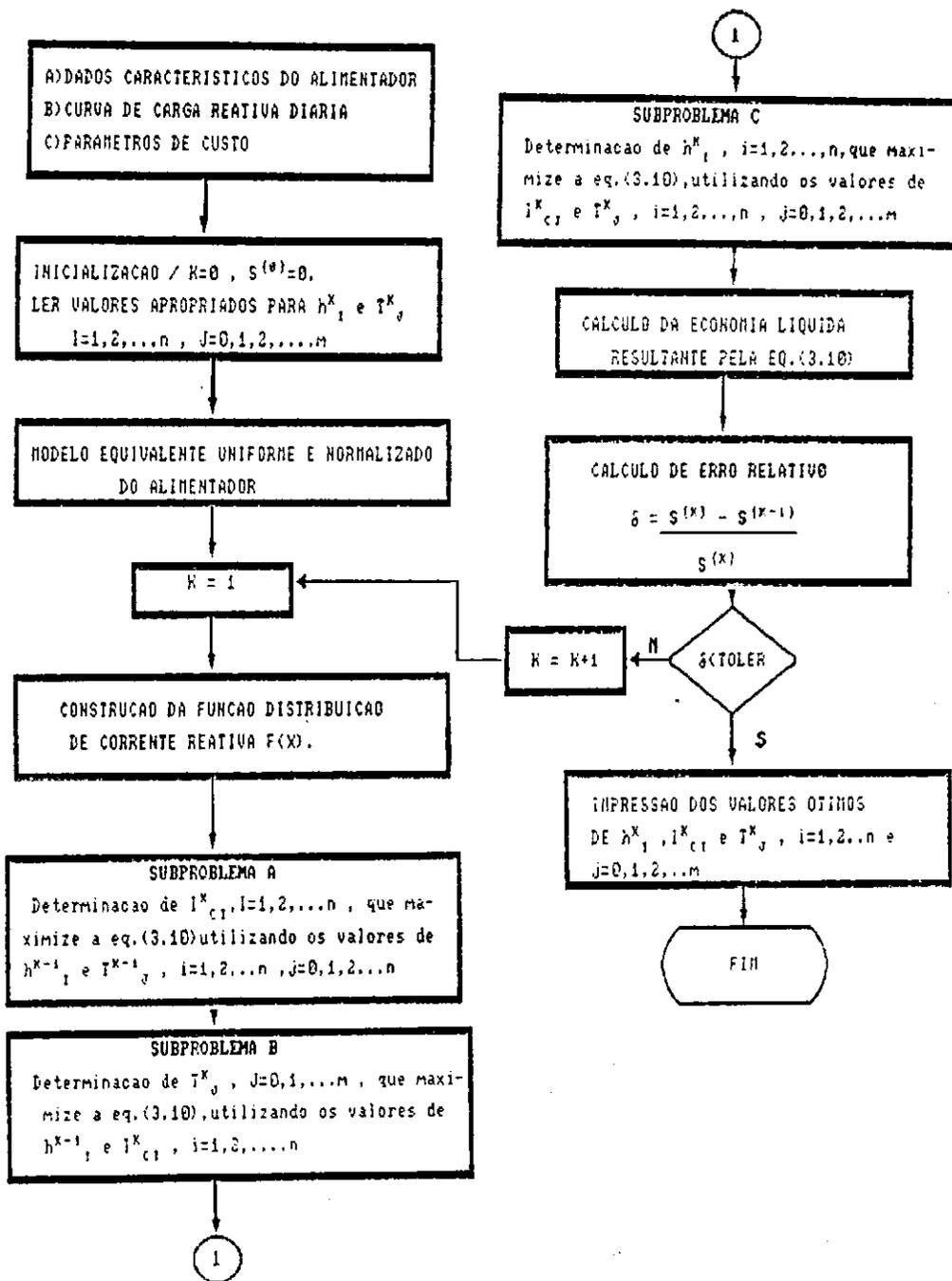


Fig.3.6 - Fluxograma do procedimento iterativo de resolução dos subproblemas A,B e C

3.7 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO.

Para aplicar a metodologia que foi apresentada, escolhemos o alimentador radial de nove trechos indicado na fig.3.1, cujos dados estão contidos na tab.3.1. De acordo com a definição do modelo de representação da cargas, a função $F(x)$, mostrada na fig.3.3, representa a distribuição espacial de carga reativa normalizada, ao longo de toda a extensão do alimentador. O perfil diário da demanda reativa e a correspondente curva de duração de carga estão mostradas na fig.3.5. Objetivando maximizar a economia líquida anual proveniente da redução das perdas, serão adotados os seguintes parâmetros de custo:

$$K_p = \text{US\$ } 120/\text{KW/ano.}$$

$$K_e = \text{US\$ } 0.015 \text{ kW/ano}$$

$$K_{cf} = \text{US\$ } 3.5/\text{KVar}$$

$$K_{cs} = \text{US\$ } 6.0/\text{KVar}$$

A taxa anual aplicada ao custo dos capacitores é 14.3%.

Deseja-se fazer planejamento e controle da compensação reativa através da determinação da capacidade, localização e tempo de operação de três capacitores, sendo um do tipo fixo e os demais, do tipo chaveado. O capacitor fixo deverá estar mais

próximo da subestação, enquanto que os capacitores chaveados deverão estar mais afastados. Durante o período de elevação da demanda reativa, entrará primeiro em operação o capacitor que estiver mais distante da subestação, e assim sucessivamente. A curva de duração de carga reativa deste alimentador, mostrada na fig.3.5.b representa a variação da carga reativa ao longo do período estabelecido para o planejamento.

De acordo com descrição acima, pode-se dizer que os capacitores 1, 2, e 3 são de tipos 1, 2 e 0 respectivamente. Portanto, na notação estabelecida, temos $u_1 = 1$, $u_2 = 2$ e $u_3 = 0$ e, adicionalmente, tem-se:

$$\begin{array}{ll} A(0) = \{3\} & \bar{A}(0) = \{3\} \\ A(1) = \{1\} & \bar{A}(1) = \{1,3\} \\ A(2) = \{2\} & \bar{A}(2) = \{1,2,3\} \end{array}$$

Com a aplicação do procedimento iterativo, representado na fig.3.6, a solução ótima foi obtida após 7 iterações. Para ilustrar numericamente a resolução dos três subproblemas do processo iterativo, mostramos, a seguir, os cálculos realizados com a última iteração.

Ao final da 6^a iteração, obteve-se os seguintes valores de capacidade, localização e tempo de operação dos capacitores:

$$\begin{aligned} I_{c_1} &= 0.056138 \text{ p.u} = 235 \text{ Kvar} \\ I_{c_2} &= 0.1036 \text{ p.u} = 433 \text{ Kvar} \\ I_{c_3} &= 0.39345 \text{ p.u} = 1647 \text{ Kvar} \end{aligned} \quad (3.48)$$

$$\begin{aligned} h_1 &= 1.0 \text{ p.u} = 16.27 \text{ milhas} \\ h_2 &= 0.2248 \text{ p.u} = 6.32 \text{ milhas} \\ h_3 &= 0.1074 \text{ p.u} = 4.02 \text{ milhas} \end{aligned} \quad (3.49)$$

$$\begin{aligned} T_0 &= 1.0 \text{ p.u} = 8760 \text{ horas/ano} \\ T_1 &= 0.4875 \text{ p.u} = 4270 \text{ horas/ano} \\ T_2 &= 0.4045 \text{ p.u} = 3543 \text{ horas/ano} \end{aligned} \quad (3.50)$$

SUBPROBLEMA A:

Com base na curva de duração de carga da fig.3.5.b, e eq.(3.15), os fatores de carga reativa associados aos tempos de operação T_0 , T_1 , T_2 , são, em pu, $F_{c_0} = 0.4766$, $F_{c_1} = 0.7267$ e $F_{c_2} = 0.78256$ respectivamente. Quando os valores de localizações e tempos de operação indicados, respectivamente nas eqs.(3.49) e (3.50), bem como os parâmetros de custo, são substituídos nas eqs.(3.32) e (3.33), obtém-se:

$$[H] = \begin{bmatrix} 184.064 & 69.255 & 19.767 \\ 69.255 & 69.255 & 18.595 \\ 19.767 & 18.595 & 25.00 \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} 25.29 & 18.383 & 13.66 \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

Resolvendo a eq.(3.31) para o vetor $[I_c]$, os valores ótimos das capacidades nominais dos capacitores são:

$$\begin{aligned} I_{c_1} &= 0.056138 \text{ p.u} = 235 \text{ Kvar} \\ I_{c_2} &= 0.1036 \text{ p.u} = 433 \text{ Kvar} \\ I_{c_3} &= 0.3934 \text{ p.u} = 1647 \text{ Kvar} \end{aligned} \quad (3.53)$$

SUBPROBLEMA B:

Para resolver este subproblema, os valores atuais de capacidade e localização especificando nas eqs.(3.53) e (3.49) são substituídos na eq.(3.39) para que sejam obtidos os respectivos níveis de carga reativa sob os quais devem operar os capacitores de tipos 1 e 2.

$$\begin{aligned} I'_9(T_1) &= 0.41101 \text{ p.u} = 1720 \text{ Kvar} \\ I'_9(T_2) &= 0.4978 \text{ p.u} = 2083 \text{ Kvar} \end{aligned} \quad (3.54)$$

Com o auxílio da curva de duração de carga da fig.3.5.b, são obtidos os tempos durante os quais os capacitores chaveados deverão operar:

$$T_1 = 0.48755 \text{ p.u} = 4270 \text{ horas/ano} \quad (3.55)$$

$$T_2 = 0.4045 \text{ p.u} = 3543 \text{ horas/ano}$$

O tempo de operação associado ao capacitor fixo, é por definição, $T_0 = 1 \text{ p.u} = 8760 \text{ horas/ano}$.

SUBPROBLEMA C:

Quando os dados de custo e os valores atuais de capacidade e tempo de duração especificados nas eqs.(3.53) e (3.55), são substituídos na eq.(3.45), obtém-se:

$$\begin{aligned} F(h_1) &= 0.03864 \text{ p.u} \\ F(h_2) &= 0.127931 \text{ p.u} \\ F(h_3) &= 0.42567 \text{ p.u} \end{aligned} \quad (3.56)$$

Portanto, com base na função distribuição de carga reativa normalizada, mostrada na fig.3.3, obtemos as correspondentes localizações para os três capacitores, que são:

$$h_1 = 1.0 \text{ p.u} = 16.27 \text{ milhas}$$

$$h_2 = 0.2248 \text{ p.u} = 6.32 \text{ milhas} \quad (3.57)$$

$$h_3 = 0.1074 \text{ p.u} = 4.02 \text{ milhas}$$

Como se vê, os valores das variáveis h_i , I_{c_i} , e T_j , ($i=1,2,\dots n$), ($j=0, 1, \dots m$), que forem obtidos na 6^a iteração são os mesmos que foram obtidos na 7^a iteração e assim, o processo iterativo pára.

Portanto, para que se tenha a máxima economia de custo anual com perdas de pico de potência e de energia, os capacitores chaveados devem ser de 235 Kvar e 433 Kvar, e deverão ser localizados a 16.27 milhas e 6.32 milhas respectivamente, da subestação. O capacitor fixo deve ser de 1645 Kvar, localizado a 4.02 milhas. O capacitor de 235 Kvar deve ser ajustado para operar durante 4270 horas/ano sob um nível de carga reativa igual ou superior a 1720 Kvar, enquanto que o capacitor de 433 kvar deverá ser ajustado para operar durante 3543 horas/ano sob um nível de carga reativa igual ou superior a 2083 Kvar.

OBSERVAÇÕES:

a) De acordo com o modelo indicado na fig.3.4 para a representação dos capacitores ao longo do alimentador, a eq.(3.45) mostra que o ponto ótimo de localização, h_i , do i -ésimo capacitor

não depende da presença dos capacitores de dimensão I_{c_j} , $j > i$. Em outras palavras, todos os capacitores que serão instalados à montante do i -ésimo capacitor, ou seja, mais próximo da subestação, não terão influência na localização deste último.

b) No exemplo acima, os valores obtidos para as capacidades nominais dos capacitores não correspondem a valores disponíveis comercialmente. Deste modo, deve-se escolher unidades padronizadas de capacidades próximas dos valores teóricos. Isto, porém, não resulta em um valor de economia líquida demasiadamente diferente daquela obtida pela solução ótima, conforme será visto mais adiante.

c) A sequência de entrada em operação dos capacitores é um fator decisivo no planejamento e controle da compensação reativa. Para ilustrar este fato, estão contidas na tab.3.3 os valores ótimos referentes ao planejamento da compensação reativa considerando diferentes sequências de chaveamento dos capacitores. Como se pode observar, através de um controle apropriado de capacitores automáticos, obtém-se um ganho considerável na redução das perdas de energia, em relação ao uso de somente capacitores fixos. Embora a alternativa mais econômica seja aquela que considera a presença de capacitores chaveados (ao invés do uso de apenas capacitores fixos), nota-se em alguns casos esta

alternativa não é justificada, devido ao elevado custo destes capacitores.

d) Geralmente, a atribuição do tipo a cada capacitor é feita unicamente com base numa análise profunda e detalhada das características físicas do alimentador, tais como: bitola dos condutores e a distribuição espacial da carga. Em alguns casos, porém, esta tarefa se torna bastante difícil e o engenheiro deve recorrer ao bom senso para chegar a uma definição convincente.

TIPO DE CAPAC	CAPAC OTIMA (KVAR)	LOCAL. OTIMA (BARRA)	TEMPO OTIMO DE OPERACAO (HOR./ANO)	NIVEL DE REATIVO P/CHAV. (KVAR)	RED. DAS PERDAS DE POTENCIA (KW/ANO)	RED. DAS PERDAS DE ENERGIA (KWH/ANO)	ECONOMIA ANUAL (US\$/ANO)
0	216.	9	8760.				
0	582.	5	8760.	-	39.00	76038	4762.
0	1319.	4	8760.				
0	252.	9	8760.				
1	724.	5	5825.	1190.	41.29	106422.	4603.
2	1400.	4	3482.	2115.			
0	253.	9	8760.				
2	836.	5	2916.	2481	41.27	109218.	4654.
1	1273	4	5926.	1123			
1	265.	9	3985.	1851.			
0	819.	5	8760.		41.42	105812.	4806.
2	1298.	4	3352.	2189.			
1	273.	9	4321.	1703.			
2	741.	5	2782.	2583.	41.85	106096.	5022.
0	1440.	4	8760.				
2	350.	9	1096.	3780.			
1	702.	5	3677.	2014.	42.85	102491.	4936.
0	1438.	4	8760.				
2	1800.	9	1463.	3550.			
0	479.	5	8760.		41.58	105086.	4798.
1	966.	4	3980.	1854.			

Tab.3.3 - Resultados do planejamento da compensação para o alimentador de 9(nove) barras da fig.3.1.

3.8 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO

A metodologia utilizada até agora, assume implicitamente que as capacidades dos bancos possam ser ajustadas continuamente, sem nenhuma restrição. Na prática, os bancos de capacitores são disponíveis comercialmente em módulos de valores padronizados, como por exemplo, 150Kvar. É de se concluir, portanto, que as capacidades que foram obtidas para os capacitores do exemplo anterior não constituem valores práticos. No que diz respeito à localização dos capacitores ao longo do alimentador, deve-se salientar que, do ponto de vista prático, nem sempre é possível instalar os capacitores exatamente nas distâncias estabelecidas pela solução ótima. Para avaliar esta questão, descreveremos a seguir, uma análise que aborda o efeito das variações em torno da capacidade e localização dos capacitores, sobre os benefícios econômicos obtidos com a solução ótima.

3.8.1 - EFEITO DA VARIAÇÃO EM TORNO DAS LOCALIZAÇÕES ÓTIMAS

Reconsideremos o exemplo da seção 3.7. Suponhamos que os três capacitores são fixos e que, por circunstâncias práticas, o capacitor de 582 KVAR não possa ser instalado exatamente à 6.32 milhas (ou $h_2=0.2248$ p.u) da subestação. A questão é, portanto, decidir se a nova localização, implementável, deverá ser buscada

na direção da subestação ou na direção inversa . Esta questão será avaliada com base em uma análise da variação da função objetivo S em relação a variável h_2 nas vizinhanças do valor ótimo $h_2=0.2248$ p.u, considerando que os demais valores ótimos de I_{c_1} , I_{c_2} , I_{c_3} , h_1 e h_3 , mantenham-se constantes.

Analisando as eqs. (3.10), (3.13) e (3.22) e observando o comportamento da função $F(x)$ na fig.3.3, em torno do ponto $x=0.2248$, conclui-se que a função objetivo S é linear tanto para valores ligeiramente menores, quanto para valores maiores que 0.2248. Para efeito de ilustração, refira-se à fig.3.7. A linha continua representa a variação da função objetivo S em torno de diferentes valores da variável h_2 , enquanto que as retas pontilhadas r_1 e r_2 representam o modo de variação de S , para diferentes variações em h_2 , isto é, as derivadas da função S em relação a variável h_2 .

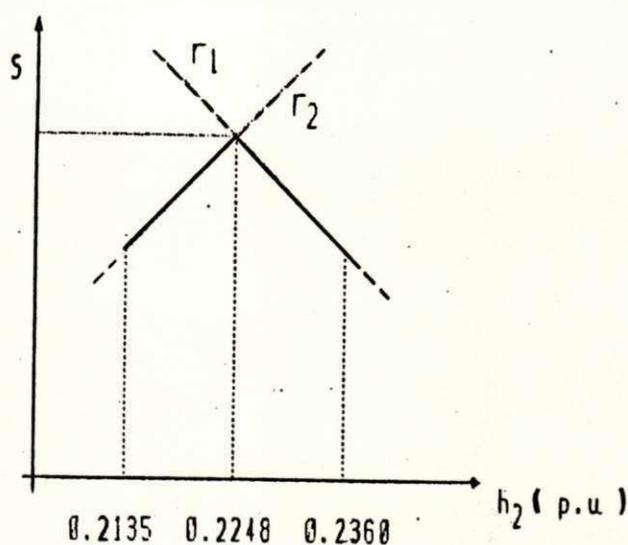


fig.3.7 - Representação gráfica da variação de S em relação variações em $h_2 = 0.2248$ p.u.

A equação que determina a variação da função S em relação a variações na variável h_i , $i = 1, 2, \dots, n$, é dada por:

$$\frac{\partial S}{\partial h_i} = K_p \frac{\partial LP}{\partial h_i} + K_e \frac{\partial LE}{\partial h_i} \quad (3.58)$$

onde:

$$\frac{\partial LP}{\partial h_i} = \frac{\partial LP_i}{\partial h_i} = 2rIc_i \left[F(h_i) - \sum_{k=1}^{i-1} Ic_k \right] - rIc_i^2 \quad (3.59)$$

$$\frac{\partial LE}{\partial h_i} = \frac{\partial LE_i}{\partial h_i} = T_{ui} \left[2rIc_i F_{u_i} F(h_i) - rIc_i^2 \right] - 2rIc_i \left[T_{ui} \sum_{k=1}^{i-1} I_{ck} \right]_{\overline{KEA}(u_i)}$$

$$+ \sum_{j=u_i}^m (T_j \sum_{k=1}^{i-1} I_{ck})] \quad (3.60)$$

$K \in A(j)$

Desta forma, podemos investigar se a nova localização para o segundo capacitor, se aproxima ou se afasta da subestação, fazendo uso das equações (3.58), (3.59) e (3.60) acima, juntamente com os valores da função $F(x)$ no ponto ótimo ($h_2 = 0.2248$ p.u) e em pontos vizinhos. Pela fig.3.3, tem-se: $F(h_2) = 0.2628$, para $h_2 < 0.2248$ p.u e $F(h_2) = 0.1194$ para $h_2 > 0.2248$ p.u. Substituindo estes valores nas eqs.(3.58), (3.59), e (3.60), obtém-se:

$$\frac{\partial S}{\partial h_2} = \text{US\$ } 7908 / \text{compr. normalizado, para } h_2 < 0.2248 \text{ p.u.}$$

$$\frac{\partial S}{\partial h_2} = \text{US\$ } 2081 / \text{compr. normalizado, para } h_2 > 0.2248 \text{ p.u.}$$

Para avaliar numericamente a variação que é obtida na economia líquida total, quando há uma variação em torno da localização ótima, vamos considerar os dois casos a seguir:

1º Caso:

Se o capacitor é deslocado 500 metros da localização ótima em direção à subestação, a economia ótima total de US\$ 4762 será reduzida de:

$$\text{US\$ 7908/compr.normalizado} \times \frac{0.1174 \times 500 \text{ metros}}{2.3 \times 1609 \text{ metros}} \approx \text{US\$ 125.}$$

que corresponde a 2.6% da economia ótima.

2º Caso:

Se o capacitor é deslocado 500 metros da localização ótima em direção ao fim do alimentador, a economia ótima será reduzida de:

$$\text{US\$ 2081/compr.normalizado} \times \frac{0.0536 \times 500 \text{ metros}}{1.05 \times 1609 \text{ metros}} \approx \text{US\$ 33.}$$

que corresponde a 0.69% da economia ótima.

De acordo com estes resultados, a decisão a ser tomada, é naturalmente, deslocar o capacitor 500 metros em direção ao fim do alimentador, embora a alternativa oposta seja também viável. Pode-se concluir que a economia líquida total ótima, é praticamente invariável quando ocorrem pequenas variações em torno das localizações ótimas dos capacitores.

A resolução das equações (3.58), (3.59) e (3.60) para determinar se o deslocamento a partir da localização ótima do capacitor será na direção da subestação ou não, poderá ser desnecessária, tendo em vista que a relação entre os valores

absolutos das inclinações das retas r_1 e r_2 , calculadas pela eq.(3.58), pode ser determinada facilmente com o uso apenas da função distribuição de carga reativa $F(x)$. A fig.3.8, mostra em escala ampliada, o trecho da função $F(x)$ que contém a localização do capacitor já mencionado.

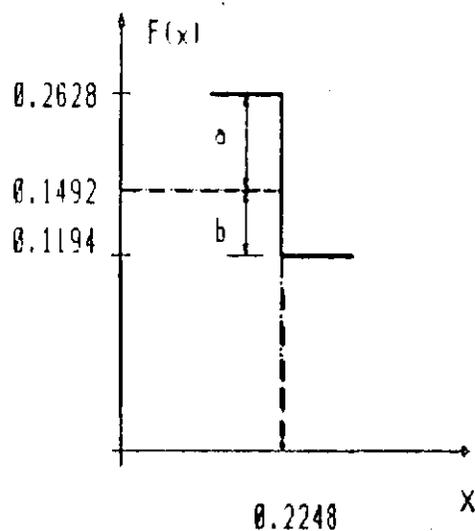


Fig.3.8 -Trecho ampliado da função distribuição de carga reativa da fig.3.3 em torno do ponto $x=0.2248$ p.u.

Pela fig.3.8, tem-se:

$$a = 0.2628 - 0.1492 = 0.1136$$

$$b = 0.1492 - 0.1194 = 0.0298$$

Analizando as eqs.(3.58), (3.59) e (3.60), conclui-se que:

$$\frac{a}{b} = \frac{| \text{inclinação de } r_2 |}{| \text{inclinação de } r_1 |} \quad (3.61)$$

Dependendo do valor numérico da eq.(3.61), decide-se se a nova posição para o capacitor será à esquerda ou à direita da posição ótima. Se $a/b > 1$, a nova posição estará à jusante da posição ótima; se $a/b < 1$, a nova posição estará à montante daquela posição.

No caso em análise, tem-se:

$$\frac{a}{b} = \frac{0.1136}{0.0298} = \frac{\text{US\$ } 7908}{\text{US\$ } 2081} = 3.8 > 1.0$$

confirmando, de fato que, no caso de impossibilidade de instalação do capacitor exatamente no ponto ótimo, a nova posição deverá ser em direção ao fim do alimentador.

3.8.2 - EFEITO DA VARIAÇÃO EM TORNO DAS CAPACIDADES ÓTIMAS

Para analisar o efeito da variação nas capacidades nominais dos capacitores, sobre a economia ótima, examinaremos dois casos distintos: no primeiro, consideramos o efeito da variação na capacidade de um único capacitor, e no segundo, consideramos que, a variação se dá para todos os capacitores, no sentido de se chegar aos valores comerciais. É importante acrescentar que em ambos os casos, considera-se que as localizações dos capacitores são mantidos em seus valores ótimos. Por conveniência, esta

análise sera feita novamente com base na solução ótima obtida para os três capacitores fixos do exemplo da seção 3.7.

1º Caso:

Os valores ótimos ou ideais de capacidade nominal, para os três capacitores fixos do exemplo da seção 3.7, foram:

$$I_{c_1} = 216 \text{ KVAR}$$

$$I_{c_2} = 582 \text{ KVAR}$$

$$I_{c_9} = 1319 \text{ KVAR}$$

Para avaliar o efeito da variação de apenas um destes valores, sobre a economia líquida anual, consideramos variações percentuais de ± 20 , ± 40 , ± 60 , ± 100 , em torno do valor I_{c_1} , mantendo fixos, os valores de I_{c_2} e I_{c_9} . Os correspondentes valores de economia líquida anual são mostrados através da curva na fig.3.9. As mesmas variações percentuais referidas acima, foram consideradas em torno do valor de I_{c_2} , mantendo I_{c_1} e I_{c_9} fixos, e em torno de I_{c_9} , mantendo fixos, I_{c_1} e I_{c_2} . As figs.3.10 e 3.11 mostram os valores de economia líquida anual correspondentes a cada caso.

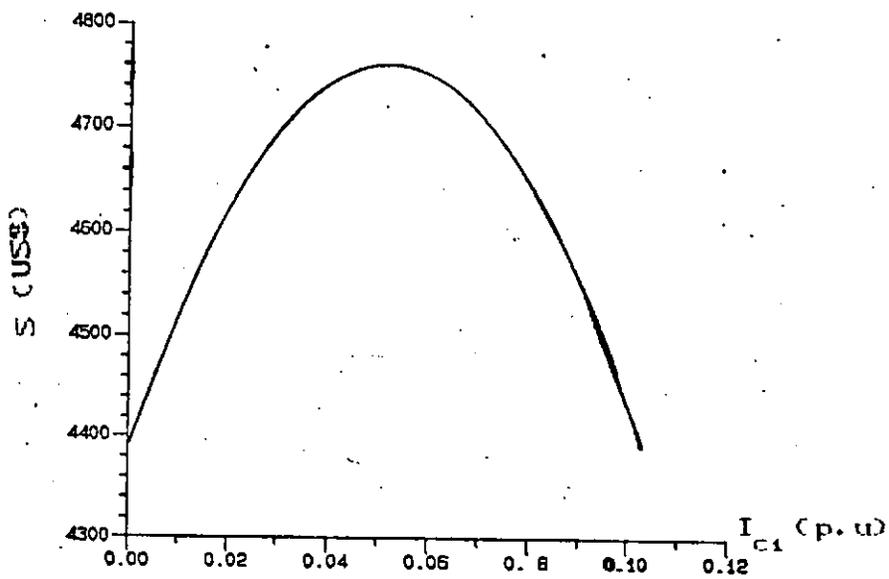


Fig.3.9 - Economia líquida anual em função da capacidade nominal do primeiro capacitor ($I_{c_1} = 0.051833$ p.u)

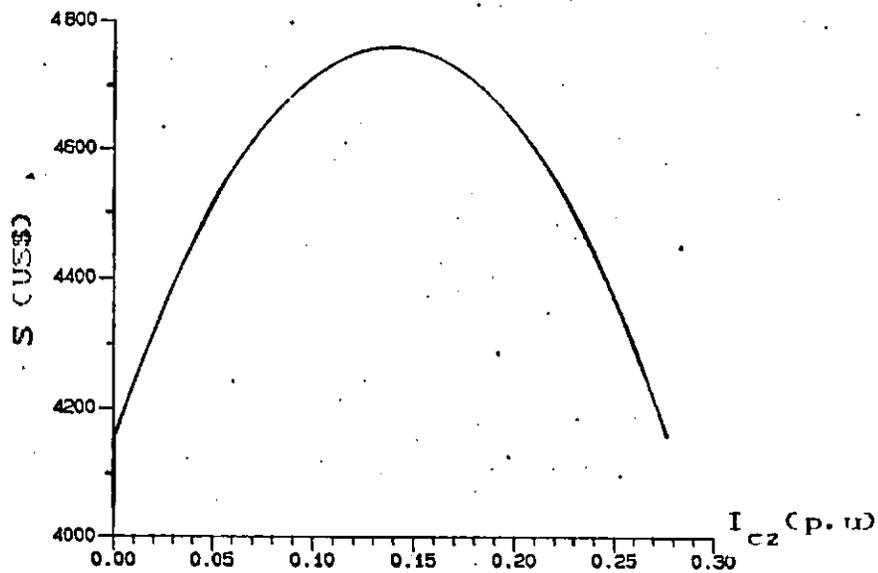


Fig.3.10 - Economia líquida anual em função da capacidade nominal do segundo capacitor ($I_{c_2} = 0.139412$ p.u)

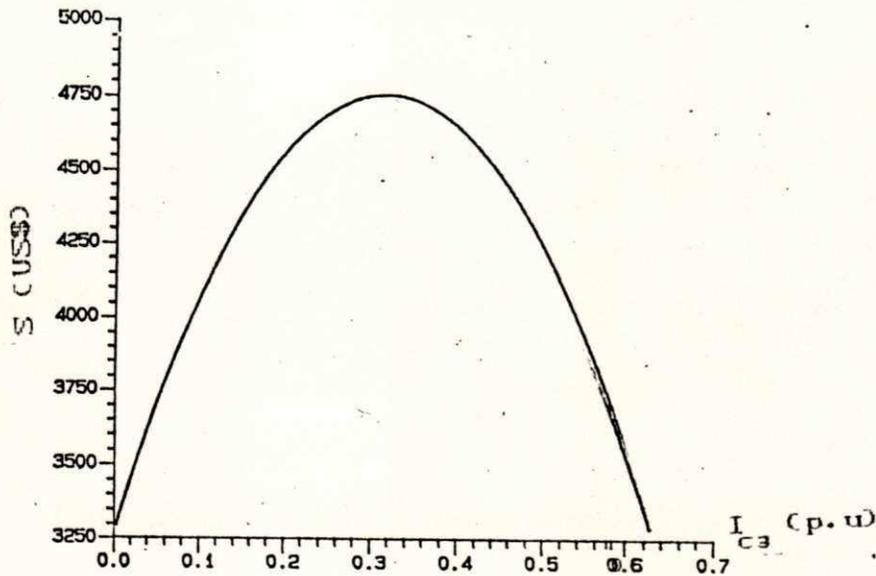


Fig.3.11 - Economia líquida anual em função da capacidade nominal do terceiro capacitor ($I_{c_3} = 0.315636$ p.u)

2º Caso:

Com base nos valores ótimos de I_{c_1} , I_{c_2} e I_{c_3} , e no valor padronizado, 150 Kvar, definimos as seguintes faixas de valores padronizados de potências dos três capacitores: ($150 < I_{c_1} < 300$ Kvar), ($450 < I_{c_2} < 600$ Kvar), ($1200 < I_{c_3} < 1350$ Kvar). Utilizando os valores extremos em cada faixa foram calculados os correspondentes valores de redução das perdas de potência e de energia e a economia anual resultante. A tab.3.3 contém os resultados obtidos para sete possíveis combinações dos valores padronizados de I_{c_1} , I_{c_2} e I_{c_3} , além do resultado da economia anual obtida com a solução ótima.

	VALOR ÓTIMO	VALORES COMERCIAIS ESCOLHIDOS					
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
I_{c1} (KVar)	217	150	300	150	150	300	300
I_{c2} (KVar)	582	600	600	450	600	450	600
I_{c3} (KVar)	1321	1350	1350	1200	1200	1350	1200
COMP. REATIVA TOTAL (KVar)	2120	2100	2250	1800	1950	2100	2100
LP (KW)		38.	40.4	35.	37.	38.9	39.20
LE (KWh)		78595	64872	83875	82706	73200	70236
LP (US\$)		4603	4747	4200	4445	4669	4706
LE (US\$)		1179	973	1258	1239	1098	1053
S (US\$)	4762	4731	4693	4557	4707	4716	4708
ERRO RELATIVO (%)	—	0.65	1.4	4.3	1.15	0.96	1.13

Tab.3.4 - Análise de sensibilidade do processo de otimização: efeito da utilização de valores pradrionizados de capacitores, sobre a economia líquida anual.

A partir dos resultados desta tabela, concluímos que:

a) Se os valores de capacidade que foram obtidos pelo procedimento de otimização são substituídos pelos respectivos valores comerciais mais próximos, obtém-se um valor de economia líquida anual bem próximo do valor de economia ótima. No exemplo

em análise, os valores comerciais escolhidos seriam de 150 kvar, 600 kvar e 1350 kvar, proporcionando um erro de apenas 0.65% em relação a economia ótima.

b) Diante da presença de apenas capacitores fixos, o aumento do nível total da compensação reativa proporciona máxima redução das perdas de pico de potência e mínima redução das perdas de energia.

c) No que diz respeito apenas ao custo devido a redução das perdas totais, é mais economicamente viável, utilizar valores comerciais mais distantes dos valores teóricos. Neste exemplo, os valores comerciais de 150 kvar, 450 kvar e 1200 kvar, proporcionam uma economia equivalente a US\$ 5458, desprezando-se o custo total destes capacitores.

3.9 - CONCLUSÃO

Neste capítulo, é apresentada uma metodologia que trata de uma forma mais geral, o problema da redução das perdas de pico de potência e de energia em alimentadores primários sem ramificações, através de bancos de capacitores, considerando aspectos mais realistas tais como: alimentador/distribuição de carga não uniforme e a presença de bancos de capacitores do tipo chaveado

que operam simultaneamente ou em tempos diferentes. O método iterativo de otimização que trata do planejamento e controle da compensação reativa, visa a maximização da economia anual que é proveniente da redução de perdas de pico de potência e de energia e tem como base um modelo simplificado do alimentador físico (modelo uniforme e normalizado), a distribuição espacial de carga reativa e a curva de carga reativa diária do alimentador que é obtida na subestação. A aplicação do método é feita para um alimentador não uniforme de nove barras, tensão 23kv, no qual são instalados tres bancos de capacitores. Em função de diferentes sequências de chaveamento dos capacitores são obtidos diferentes resultados de planejamento, dentre os quais, decide-se pela alternativa mais econômica. Uma análise de sensibilidade do processo iterativo de otimização que aborda o efeito das variações nos valores de capacidade e de localização dos capacitores na economia líquida anual obtida com a solução ótima, é feita no sentido de se avaliar aspectos práticos tais como: impossibilidade de instalação do capacitor no ponto de localização ótima e utilização de unidades de capacitores cujos valores de potência estão disponíveis comercialmente. Os conceitos que aqui foram apresentados farão parte de uma abordagem mais extensa do método de planejamento da compensação reativa aplicado a alimentadores mais complexos (providos de ramais) conforme será vista no próximo capítulo.

CAPÍTULO 4

PLANEJAMENTO E CONTROLE DA COMPENSAÇÃO REATIVA EM ALIMENTADORES PRIMÁRIOS PROVIDOS DE RAMAIS.

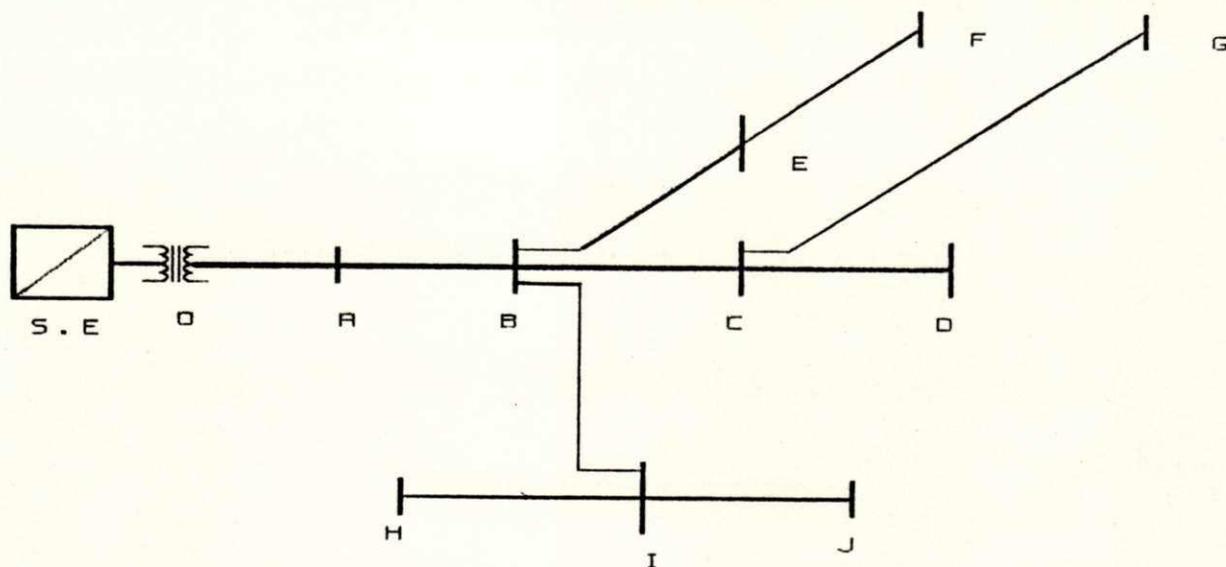
4.1 - INTRODUÇÃO

No capítulo anterior, apresentamos uma metodologia bastante consistente que é aplicada ao planejamento e controle da compensação reativa em alimentadores radiais diretos (sem ramais). Neste capítulo, esta metodologia será ampliada para tratar do problema da compensação reativa em alimentadores radiais mais complexos, que incluem ramais. Tendo em vista a distribuição geográfica dos consumidores, estes sistemas são mais comuns na prática e por isso, o modelo para representação destes sistemas deve ser tão exato quanto à sua própria configuração física. O planejamento da compensação reativa em alimentadores primários providos de ramais é um tanto complicada. Um dos métodos de solução tem como base as técnicas de programação dinâmica as quais, porém, não são muito recomendáveis, devido ao grande esforço computacional exigido pela dimensão do problema. Este capítulo apresenta uma alternativa de solução que está baseada em um modelo estrutural do alimentador, a partir da definição de "caminho aberto", sugerido por HAPP, 1980. Com base neste modelo,

será apresentada uma metodologia mais complexa para tratar a questão da redução das perdas em alimentadores primários, via planejamento e controle da compensação reativa.

4.2 - MODELO ESTRUTURAL DO ALIMENTADOR PRIMÁRIO PROVIDO DE RAMAIS

Para tratar a estrutura bi-dimensional dos alimentadores primários providos de ramais, HAPP(1980), considerou que os mesmos compõem-se de um número finito de "caminhos abertos". Segundo ele, um caminho aberto ao longo de um alimentador, é todo o percurso que vai desde a subestação até um barramento remoto, além do qual não existem outros barramentos. Este barramento mais remoto é chamado " barramento terminal " do caminho aberto, e o número total de barramento terminais determina o número total de caminhos abertos ao longo do alimentador. Um destes caminhos abertos, escolhido arbitrariamente, é denominado caminho aberto principal. Ao longo do caminho aberto principal existem pontos sobre os quais originam-se os ramos laterais (ou ramais). O conjunto dos ramos adjacentes entre dois destes pontos ou entre um ponto e um barramento terminal, constituem as seções. Cada seção, por sua vez, é constituída de um ou vários trechos adjacentes. Para efeito de ilustração, é indicado na fig. 4.1, os elementos que fazem parte do modelo estrutural de um alimentador primário provido de ramais.



LEGENDA

OABCD, OABEF, OABCG, OABIH - caminhos abertos

OABCD - caminho principal

OB, BF, BI, BC, CD, CG, IH, IJ - seções

OA, EF, BE - trechos

Fig.4.1 - Elementos do modelo estrutural de um alimentador primário constituído de ramais.

4.3 - REPRESENTAÇÃO DAS CARGAS REATIVAS E DOS CAPACITORES

Como foi visto no capítulo 3, a representação das cargas reativas ao longo de um alimentador radial direto é feita com base na definição de uma função distribuição de carga reativa normalizada que é construída, em função dos fluxos de carga

reativa em cada trecho. De acordo com a definição de caminho aberto, pode-se dizer que o alimentador radial direto é constituído de um único caminho aberto (caminho principal), o qual contém uma única seção. Portanto, para este tipo de alimentador, é construída uma única função distribuição de carga reativa.

Tendo em vista que o alimentador radial provido de ramais, contém mais de uma seção, é necessário que seja definida a função distribuição de carga reativa em cada seção, para então, definir a função distribuição de carga reativa em todos os caminhos abertos do alimentador.

A função distribuição de carga reativa normalizada até a distância x , na seção do alimentador é definida por:

$$F(s, x) = \sum_{k=n_x}^{n_s} I_k + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq s}}^{N_s} E_{sj} F_j \quad (4.1)$$

onde:

I_k : fluxo de carga reativa através do trecho k da seção s .

n_s : último trecho da seção s .

n_x : trecho imediatamente após o ponto x na seção s .

F_j : soma algébrica dos fluxos de carga reativa através dos trechos da seção j , exceto o trecho inicial.

N_s : número total de seções do alimentador.

$$E_{sj} = \begin{cases} 1, & \text{se as seções } s \text{ e } j \text{ são comuns ao caminho aberto} \\ & \text{que vai do barramento inicial da seção } s, \text{ até um} \\ & \text{ou mais barramentos terminais.} \\ \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (4.2)$$

O 1º termo do lado direito da eq.(4.1) representa a soma dos fluxos de carga reativa através dos trechos internos da seção s , enquanto que o 2º termo, corresponde a carga reativa equivalente que é concentrada no barramento terminal da mesma seção. Esta carga equivalente inclui todas as cargas reativas que estão à jusante do barramento terminal.

As funções distribuição de carga reativa normalizada para todos os caminhos abertos do alimentador são obtidas a partir das funções distribuição de carga reativa das seções que os constituem, ou seja, cada função distribuição de carga reativa por caminho aberto é uma composição de funções distribuição de carga reativa por seção. Podemos, então, definir a função distribuição de carga reativa no caminho aberto K , da seguinte maneira:

Se s é uma seção do caminho aberto K , então:

$$F_p(K,x) = F(s,x), \text{ se } x \in s \quad (4.3)$$

onde s é uma seção do caminho K e x é a distância normalizada, medida a partir da subestação, até um ponto sobre o caminho K .

Para efeito de ilustração das funções distribuição de carga por seção e por caminho aberto, escolhemos um alimentador radial da Fig.4.2, que é constituído de 2(dois) caminhos abertos e 3 (três) seções. Os valores das cargas reativas, em pu, estão indicados juntos aos barramentos para uma melhor representação. Os números entre parênteses, indicam a ordem de numeração das seções.

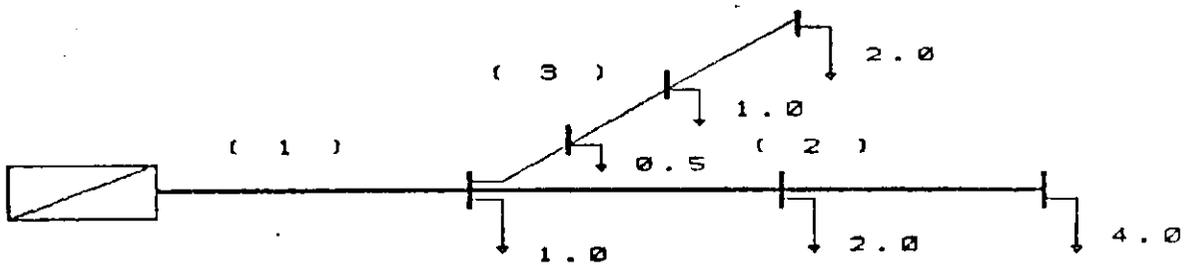


Fig.4.2 - Alimentador radial de 2(dois) caminhos abertos e 3(três) seções.

De acordo com a definição de função distribuição de carga reativa por seção, eq.(4.1) e função distribuição de carga reativa por caminho aberto, eq.(4.2), são construídas as funções distribuição de carga reativa das seções (1), (2) e (3), bem como

dos caminhos abertos (1)-(2) e (1)-(3), como é mostrado respectivamente nas figs.4.3.e 4.4.

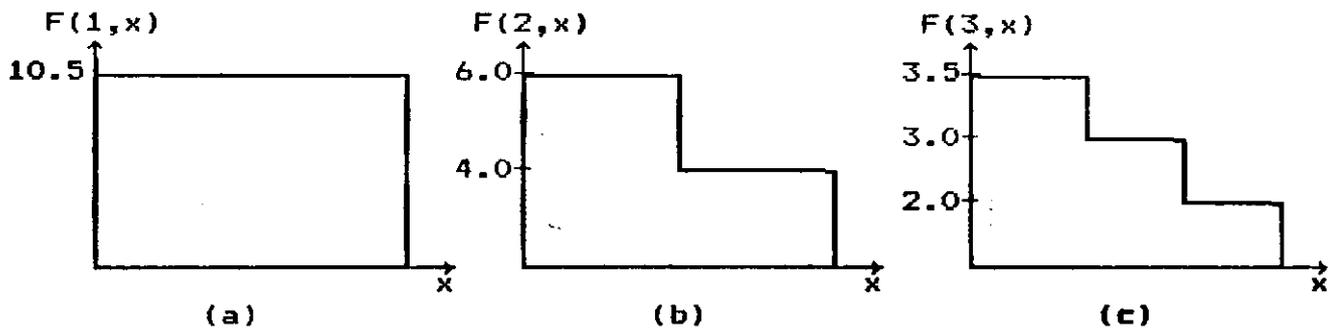


Fig.4.3 - Função de distribuição de carga reativa longo da (a) seção (1), (b) seção (2) e (c) seção (3) do alimentador da fig.4.2.

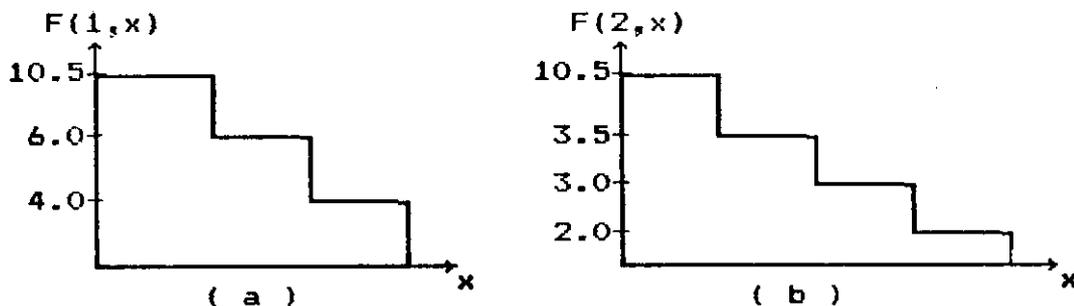


Fig.4.4 - Função de distribuição de carga reativa ao longo do (a) caminho (1)-(2) e (b) caminho (1)-(3) do alimentador da fig.4.2.

Para a representação dos capacitores ao longo do alimentador, será utilizado o mesmo modelo, descrito no capítulo 3. Refira-se à fig.3.4 .

4.4 MODELO DO ALIMENTADOR FÍSICO

A representação do alimentador físico por um modelo equivalente uniforme normalizado (alimentador de resistência uniforme e comprimento unitário), é também bastante conveniente, quando se trata de alimentadores primários constituídos de ramais. O mesmo procedimento mostrado no capítulo 3, para transformação do alimentador físico em um equivalente normalizado, se aplica para este caso, sem nenhuma restrição.

4.5 - FORMULAÇÃO GERAL DA REDUÇÃO DAS PERDAS DE POTÊNCIA E DE ENERGIA

Conforme foi visto no capítulo anterior, a estratégia de planejamento e controle da compensação reativa em alimentadores radiais diretos, consiste na determinação dos valores ótimos de capacidade, tempo de operação e localização de n capacitores (fixos e/ou chaveados), de modo a maximizar a redução das perdas de pico de potência e de energia. Para estender, tal estratégia a alimentadores mais realistas, como é o caso dos alimentadores primários constituídos de ramais, basearemos-nos inicialmente nas equações gerais de redução das perdas de potência, eq.(3.11) e de energia, eq.(3.19). Na formulação matemática que segue, adotamos a mesma notação simbólica descrita capítulo 3.

Considere que n capacitores de tipo 0, 1, 2, ... m estão instalados ao longo de um alimentador primário que contém p ramais. Se o i-ésimo capacitor está instalado em algum barramento da j-ésima seção que pertence ao k-ésimo caminho aberto deste alimentador, ele contribui individualmente para a redução nas perdas através de todas as seções deste caminho, a montante do seu ponto instalação. A soma das contribuições individuais de cada capacitor, através das seções, resulta na redução das perdas totais através do alimentador.

Se LP_i (LE_i) é a parcela da redução total das perdas de potência, LP (de energia, LE) obtida com a instalação do i-ésimo capacitor em algum ponto da seção K, considerando que já foram instalados os capacitores 1, 2, ... i - 1, então, por definição temos:

$$LP = \sum_{i=1}^n LP_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{NS} LP_{ij} B_{ji} \quad (4.4)$$

$$LE = \sum_{i=1}^n LE_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{NS} LE_{ij} B_{ji} \quad (4.5)$$

onde:

$$B_{ji} = \sum_{k=1}^{NS} E_{jk} C_{ki} \quad j=1, 2, \dots, NS; \quad i=1, 2, \dots, n \quad (4.6)$$

$$C_{ki} \triangleq \begin{cases} 1, & \text{se o } i\text{-ésimo capacitor está instalado em algum} \\ & \text{ponto da seção } k. \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.7)$$

e LP_{ij} (LE_{ij}) representa a redução das perdas de potência (de energia) através da seção j , com a instalação do i -ésimo capacitor, e considerando que os capacitores 1, 2, ... $i-1$, já foram instalados.

As equações que determinam LP_{ij} e LE_{ij} , $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, N_s$, são obtidas como segue.

Consideremos que em algum ponto da seção j , esteja instalado o i -ésimo capacitor, de capacidade nominal I_{c_i} , e cuja distância até a subestação é h_i . Tendo em vista que a corrente fornecida por este capacitor afeta o fluxo de carga reativa da seção s que está à montante do seu ponto de instalação e considerando que já foram instalados os capacitores 1, 2, ... ($i-1$), definimos:

a) Perdas de potência através da seção j , devido a presença dos capacitores 1, 2, ... ($i-1$).

$$PL_j^{(i-1)} = r \int_{x_{sj}}^{h_i} \left[F(j, x) - \sum_{k=1}^{i-1} B_{jk} I_{c_k} \right]^2 dx \quad (4.8)$$

b) Perdas de potência através da seção s, devido a presença dos capacitores 1, 2, ... (i-1).

$$PL_s^{(i-1)} = r \int_{x_{ss}}^{x_{fs}} \left[F(s, x) - \sum_{k=1}^{i-1} B_{sk} I_{c_k} \right]^2 dx \quad (4.9)$$

c) Perdas de potência através da seção j, após a instalação do i-ésimo capacitor.

$$PL_j^i = r \int_{x_{sj}}^{x_{hj}} \left[F(j, x) - \sum_{k=1}^{i-1} B_{jk} I_{c_k} \right]^2 dx \quad (4.10)$$

d) Perdas de potência através da seção s, após a instalação do i-ésimo capacitor.

$$PL_s^i = r \int_{x_{ss}}^{x_{fs}} \left[F(s, x) - \sum_{k=1}^{i-1} B_{sk} I_{c_k} \right]^2 dx \quad (4.11)$$

Se LP_{ij} (LP_{is}) é a redução das perdas de potência através da seção j(s), após a instalação dos capacitores 1, 2, ... i, definimos:

$$LP_{ij}^{(i-1)} = PL_j^{(i-1)} - PL_j^i \quad (4.12)$$

$$LP_{is}^{(i-1)} = PL_s^{(i-1)} - PL_s^i \quad (4.13)$$

Substituindo as eqs. (4.7) e (4.9) na Eq. (4.11), obtemos a equação geral de LP_{ij} dada por:

$$LP_{ij} = r \int_{x_{sj}}^{h_i} \left\{ 2I_{c_i} \left[F(j, x) - \sum_{k=1}^{i-1} B_{sk} I_{c_k} \right] - I_{c_i}^2 \right\} dx \quad (4.14)$$

De modo semelhante, substituindo as eqs.(4.8) e (4.10) na eq. (4.12), obtemos a equação geral de LP_{is} .

$$LP_{is} = r \int_{x_{ss}}^{x_{fs}} \left\{ 2I_{c_i} \left[F(s, x) - \sum_{k=1}^{i-1} B_{sk} I_{c_k} \right] - I_{c_i}^2 \right\} dx \quad (4.15)$$

onde:

r : resistência do modelo uniforme normalizado, em ohms.

x_{sj} : distância (em p.u) entre a subestação e o início da seção j .

x_{ss} : distância (em p.u) entre a subestação e o início da seção s .

x_{fs} : distância entre a subestação e o fim da seção s .

$\sum_{k=1}^{i-1} B_{jk} I_{c_k}$: fluxo de carga reativa através da seção j ,
devido aos capacitores 1, 2, ... $i-1$.

$\sum_{k=1}^{i-1} B_{sk} I_{c_k}$: fluxo de carga reativa através da seção s ,
devido aos capacitores 1, 2, ... $i-1$.

Para obter a expressão que determina a redução das perdas de energia, consideramos que os n capacitores pertencem a um dos tipos 0, 1, 2, ... m . Por definição, a redução das perdas de

energia através de uma seção s correspondente à relação das perdas de potência nesta seção durante o período do ciclo de carga em que os capacitores operam. Portanto, utilizando a eq.(4.14) ao longo ciclo de carga reativa, tal como o mostrado na fig.3.4.a, obtemos a equação de redução das perdas de energia através da seção j , após a instalação dos capacitores 1, 2, ... i .

$$LE_{ij} = \int_{t_{u_i}^s}^{t_{u_i+1}^s} r \int_{x_{sj}}^{h_i} \left\{ 2Ic_i [I_s(t)F(j,x) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \in \bar{A}(u_i)}}^{i-1} B_{jk} Ic_k] - Ic_i^2 \right\} dxdt$$

$$\dots + \int_{t_{m-1}^s}^{t_m^s} r \int_{x_{sj}}^{h_i} \left\{ 2Ic_i [I_s(t)F(j,x) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \in \bar{A}(u_{m-1})}}^{i-1} B_{jk} Ic_k] - Ic_i^2 \right\} dxdt$$

$$\dots + \int_{t_m^f}^{t_m^f} r \int_{x_{sj}}^{h_i} \left\{ 2Ic_i [I_s(t)F(j,x) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \in \bar{A}(m)}}^{i-1} B_{jk} Ic_k] - Ic_i^2 \right\} dxdt +$$

$$\dots + \int_{t_m^f}^{t_{m-1}^f} r \int_{x_{sj}}^{h_i} \left\{ 2Ic_i [I_s(t)F(j,x) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \in \bar{A}(m-1)}}^{i-1} B_{jk} Ic_k] - Ic_i^2 \right\} dxdt$$

$$+ \int_{t_{u_i+1}^f}^{t_{u_i}^f} r \int_{x_{s_j}}^{h_i} \left\{ 2I_{c_i} [I_s(t)F(j,x) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \in \bar{A}(u_i+1)}}^{i-1} B_{jk} I_{c_k}] - I_{c_i}^2 \right\} dxdt \quad (4.16)$$

A equação (4.16) pode ser reescrita na seguinte forma:

$$\begin{aligned} LE_{ij} &= \sum_{l=u_i}^{m-1} \int_{t_l^s}^{t_{l+1}^s} r \int_{x_{s_j}}^{h_i} \left\{ 2I_{c_i} [I_s(t)F(j,x) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \in \bar{A}(j)}}^{i-1} B_{jk} I_{c_k}] - I_{c_i}^2 \right\} dxdt \\ &\dots + \int_{t_m^s}^{t_m^s} r \int_{x_{s_j}}^{h_i} \left\{ 2I_{c_i} [I_s(t)F(j,x) - \sum_{k=1}^{i-1} B_{jk} I_{c_k}] - I_{c_i}^2 \right\} dxdt \\ &+ \sum_{l=u_i}^{m-1} \int_{t_l^f}^{t_{l+1}^f} r \int_{x_j}^{h_i} \left\{ 2I_{c_i} [I_s(t)F(j,x) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \in \bar{A}(j)}}^{i-1} B_{jk} I_{c_k}] - I_{c_i}^2 \right\} dxdt \quad (4.17) \end{aligned}$$

Tendo em vista que as perdas de energia estão associadas com o tempo de duração dos diferentes níveis de carga reativa, a função $I_s(t)$ na eq.(4.17) pode ser substituída pela função $I'_s(t)$, representada na fig.3.4.b. Deste modo, quando as varáveis t_l^s e t_l^f são substituídas por T_l , a eq.(4.17) é reescrita de uma forma mais simplificada, como segue:

$$LE_{ij} = \sum_{l=u_i}^{m-1} \int_{T_{l+1}}^{T_l} r \int_{x_{s_j}}^{h_i} \left\{ 2I_{c_i} [I'_s(t)F(j,x) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \in \bar{A}(j)}}^{i-1} B_{jk} I_{c_k}] - I_{c_i}^2 \right\} dxdt \quad (4.18)$$

Para obter LE_{ij} , em função do fator de carga reativa F_{cu_i} , associado com os tempo de operação T_{ui} , a eq.(4.17) é expandida e após algumas operações algébricas, obtemos:

$$LE_{ij} = r \int_{x_{sj}}^{h_i} I_{c_i} \left\{ 2 [T_{ui} F_{cu_i} F(j, x) - \sum_{k=1}^{i-1} T_M - \sum_{\substack{l=1 \\ l \in A(M)}}^{i-1} B_{jl} I_{c_l}] - T_{ui} I_{c_i}^2 \right\} dx \quad (4.19)$$

$$\text{onde: } M = \begin{cases} u_i, & \text{se } u_i \geq u_k \\ u_k, & \text{se } u_i < u_k \end{cases} \quad (4.20)$$

A expressão geral que dá a redução das perdas de energia através de uma seção s , a montante do ponto de instalação do i -ésimo capacitor, é similar à eq.(4.19), bastando para isto, trocar j por s e h_i por x_{fs} , ou seja:

$$LE_{is} = r \int_{x_{ss}}^{x_{fs}} I_{c_i} \left\{ 2 [T_{ui} F_{cu_i} F(s, x) - \sum_{k=1}^{i-1} T_M - \sum_{\substack{l=1 \\ l \in A(M)}}^{i-1} B_{sl} I_{c_l}] - T_{ui} I_{c_i}^2 \right\} dx \quad (4.21)$$

onde M é dada pela eq.(4.20).

Para exemplificar o uso das eqs. (4.4) e (4.5), escolhemos o diagrama unifilar do alimentador de 5(cinco) seções, mostrado na fig.4.5, no qual são instalados 3 (três) capacitores de capacidades I_{c_1} , I_{c_2} , I_{c_3} , nas seções 2, 4 e 5, respectivamente.

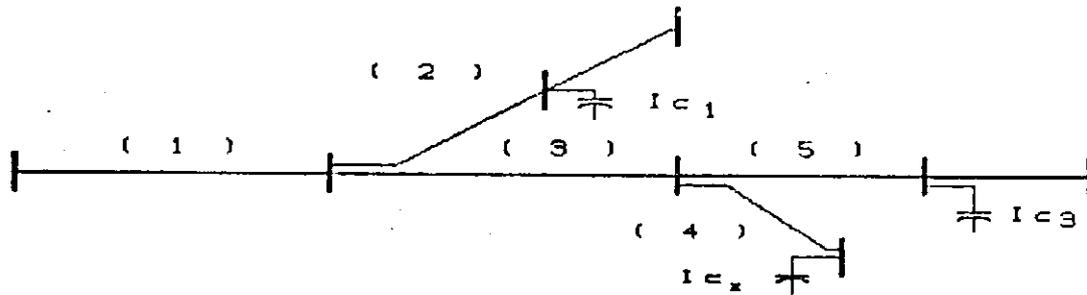


Fig.4.5 - Alimentador radial de 3(três) caminhos abertos e 5(cinco) seções no qual são instalados 3(três) capacitores.

De acordo com a fig.4.5, temos: $n=3$ e $N_s=5$, onde n é o número de capacitores e N_s é o número total de seções. A partir das como equações (4.2) e (4.7), obtemos os elementos das matrizes E e C , mostrados a seguir.

$$[E] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

onde: $s, j, k = 1, 2, \dots, N_s$; $i = 1, 2, \dots, n$

Como se pode observar, o elemento $E_{13} = 1$ na matriz E, indica que as seções 1 e 3 são comuns ao caminho aberto que tem início na seção 1; por outro lado, o elemento $E_{31} = 0$, indica que as seções 3 e 1 não pertencem a nenhum caminho aberto que se inicia na seção 3. Na matriz de incidência capacitor-seção, dada na eq.(4.23), o elemento $C_{42} = 1$, indica que o capacitor 2 está localizado na seção da seção 4.

Através do produto das matrizes E e C, obtemos a matriz B, que é mostrada a seguir:

$$[B] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} j = 1, 2, \dots, N_s \\ i = 1, 2, \dots, n \end{array} \quad (4.24)$$

Os elementos iguais a 1, em cada coluna da matriz B, indicam as seções que são afetadas, pela presença de um determinado capacitor. Por exemplo, a coluna 2 mostra que o capacitor 2 afeta a redução das perdas através das seções 1, 3 e 4.

Com o uso das equações (4.22), (4.23) e (4.24), a redução das perdas de potência, LP e redução das perdas de energia, LE, dadas pelas eqs.(4.4) e (4.5) respectivamente, serão expressas por:

$$LP=(LP_{11}+LP_{12})+(LP_{21}+LP_{23}+LP_{24})+(LP_{91}+LP_{93}+LP_{95}) \quad (4.25)$$

$$LE=(LE_{11}+LE_{12})+(LE_{21}+LE_{23}+LE_{24})+(LE_{91}+LE_{93}+LE_{95}) \quad (4.26)$$

O primeiro termo entre parênteses no lado direito da eq.(4.25) representa a redução nas perdas de potência através das seções 1 e 2, devido a presença do capacitor I_{c_1} .

4.6 - A FUNÇÃO ECONOMIA LÍQUIDA GLOBAL: FUNÇÃO OBJETIVO

Como foi visto no capítulo anterior, a economia líquida global, que é obtida a partir da redução das perdas de potência e de energia através de alimentadores primários, é calculada em função dos custos associados às perdas de potência e de energia, como também, dos custos associados aos capacitores, conforme mostrado pela função objetiva S na eq.(3.9). Esta mesma

representação será utilizada neste capítulo, com base nos custos associados a redução das perdas de potência LP, na eq.(4.3), e da redução de perdas energia LE, na eq.(4.4).

Deste modo, tem-se:

$$S = K_p LP + K_e LE - K_{cf} \sum_{i=1}^n I_{c_i} - K_{cs} \sum_{i=1}^n I_{c_i} \quad (4.27)$$

$u_i = 0$ $u_i \neq 0$

onde:

K_p : Custo associado ao Kilowatt de perda de potência

K_e : Custo associado ao Kilowatt-hora de perda de energia

K_{cf} : Custo associado ao KVAR de capacitor fixo

K_{cs} : Custo associado ao KVAR de capacitor chaveado

$A(j)$: Conjunto dos índices dos capacitores de tipo j, j = 0, 1, 2, ... m.

4.7 - PROCEDIMENTO GERAL DE OTIMIZAÇÃO DA ECONOMIA LÍQUIDA GLOBAL

Para resolver o problema geral do planejamento e controle da compensação reativa é necessário determinar simultaneamente, a capacidade, localização e do tempo de operação de um número pré-estabelecido de capacitores-derivação, de modo a minimizar as perdas de potência e de energia, proporcionando assim, a máxima economia líquida global, representada pela função objetivo S na eq.(4.21).

O procedimento para solução do problema geral consiste, portanto, na resolução de três subproblemas interdependentes nos quais duas das três variáveis independentes (capacidade, localização e tempo de operação) são especificadas, para a determinação da terceira variável. A solução de cada subproblema que será descrita a seguir, contribui para a maximização da função objetivo S da eq.(4.21).

4.7.1 - Subproblema A: Otimização da Capacidade

Para maximizar a economia líquida global, representada pela função S na eq.(4.27), a capacidade ótima para os n capacitores (fixos e/ou chaveados), que serão instalados em locais pré-determinados ao longo do alimentador, é determinado como segue.

Se são estabelecidos os tempos de operação para os capacitores chaveados, a condição necessária para otimização da capacidade dos n capacitores, é expressa por:

$$\frac{\partial S}{\partial I_{c_i}} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.28)$$

Aplicando a eq.(4.28) à eq.(4.27), tem-se:

$$\frac{\partial S}{\partial I_{c_i}} = K_p \frac{\partial LP}{\partial I_{c_i}} + K_e \frac{\partial LE}{\partial I_{c_i}} - K_{ci} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.29)$$

onde:

$$K_{ci} = \begin{cases} K_{cf}, & \text{se } u_i = 0 \\ K_{cs}, & \text{se } u_i \neq 0 \end{cases} \quad (4.30)$$

Para determinar as derivadas $\partial LP / \partial I_{c_i}$ e $\partial LE / \partial I_{c_i}$ na eq.(4.29), faremos uso das eqs.(4.14), (4.15), (4.19), (4.20) e (4.21), como segue:

$$\frac{\partial LP_{ij}}{\partial I_{c_i}} = 2r \left[\int_{x_{sj}}^{h_i} F(j, x) dx - (h_i - x_{sj}) \left(I_{c_i} + \sum_{l=1}^{i-1} B_{jl} I_{c_l} \right) \right] \quad (4.31)$$

$$\frac{\partial LP_{kj}}{\partial I_{c_i}} = \begin{cases} -2r(h_k - x_{sj}) I_{c_k} B_{ji} & , \text{ para } k > i \\ 0 & , \text{ para } k < i \end{cases} \quad (4.32)$$

$$\frac{\partial LP_{is}}{\partial I_{c_i}} = 2r \left[\int_{x_{ss}}^{x_{fs}} F(s, x) dx - (x_{fs} - x_{ss}) \left(I_{c_i} + \sum_{k=1}^{i-1} B_{sk} I_{c_k} \right) \right] \quad (4.33)$$

$$\frac{\partial LP_{ks}}{\partial I_{c_i}} = \begin{cases} -2r(x_{fs} - x_{ss}) I_{c_k} B_{sk} & , \text{ para } k > i \\ 0 & , \text{ para } k < i \end{cases} \quad (4.34)$$

$$\frac{\partial LE_{ij}}{\partial Ic_i} = 2rT_{u_i} F_{c_{u_i}} \int_{x_{sj}}^{h_i} F(j, x) dx - 2r(h_i - x_{sj}) [T_{u_i} (Ic_i + \sum_{k=1}^{i-1} B_{jk} Ic_k)] + \sum_{k=1}^m T_k \sum_{l=1}^{i-1} B_{jl} Ic_l \quad (4.35)$$

$$\frac{\partial LE_{kj}}{\partial Ic_i} = \begin{cases} -2rT_{u_i} Ic_k (h_i - x_{sj}), & \text{para } k > i \text{ e } u_k \leq u_i \\ 0, & \text{para } k < i \\ -2rT_{u_k} Ic_k (h_i - x_{sj}) B_{ji}, & \text{para } k < i \text{ e } u_k > u_i \end{cases} \quad (4.36)$$

$$\frac{\partial LE_{is}}{\partial Ic_i} = 2rT_{u_i} F_{c_{u_i}} \int_{x_{ss}}^{x_{fs}} F(s, x) dx - 2r(x_{fs} - x_{ss}) [T_{u_i} (Ic_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \in \bar{A}(u_i)}}^{i-1} B_{sk} Ic_k)] + \sum_{j=1}^m T_j \sum_{l=1}^{i-1} B_{sl} Ic_l \quad (4.37)$$

$$\frac{\partial LE_{ks}}{\partial Ic_i} = \begin{cases} -2rT_{u_i} Ic_k (x_{fs} - x_{ss}), & \text{para } k > i \text{ e } u_k \leq u_i \\ 0, & \text{para } k < i \\ -2rT_{u_k} Ic_k (x_{fs} - x_{ss}), & \text{para } k < i \text{ e } u_k > u_i \end{cases} \quad (4.38)$$

A equação (4.29) pode ser rescrita do seguinte modo:

$$\frac{\partial S}{\partial Ic_i} = K_p \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_s} LP_{ij} B_{ji} + K_e \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_s} LE_{ij} B_{ji} - K_{ci} = 0 \quad (4.39)$$

Substituindo as equações (4.31)-(4.38) na eq.(4.39) e rearrumando os termos comuns, obtém um sistema de equações algébricas lineares, que na forma matricial é dado por:

$$[H] = [I_c] [D] \quad (4.40)$$

onde $[I_c] = [I_{c1}, I_{c2}, \dots, I_{cn}]$ é o vetor n-dimensional das capacidades nominais dos capacitores, e as matrizes H e D, definidas por:

$$[H] = \begin{cases} h_{ij} (K_p + K_e T_{u_i}) & \text{se } j \leq i \text{ e } u_j \leq u_i \\ h_{ij} (K_p + K_e T_{u_j}) & \text{se } j < i \text{ e } u_j > u_i \\ h_{ij} (K_p + K_e T_{u_i}) & \text{se } j > i \text{ e } u_j \leq u_i \\ h_{ij} (K_p + K_e T_{u_j}) & \text{se } j > i \text{ e } u_j > u_i \end{cases} \quad (4.41)$$

$$D_i = \begin{cases} (K_p + K_e T_{u_i} F_{c_{u_i}}) \int_0^{h_i} F_p(K_i, x) dx - \frac{k_{cf}}{2r} & , \text{ se } u_i = 0 \\ (K_p + K_e T_{u_i} F_{c_{u_i}}) \int_0^{h_i} F_p(K_i, x) dx - \frac{k_{cs}}{2r} & , \text{ se } u_i \neq 0 \end{cases} \quad (4.42)$$

onde:

u_i = tipo do i-ésimo capacitor.

h_{ij} = distância medida da subestação, que é comum às localizações dos capacitores i e j.

$F_p(K_i, x)$ = função distribuição de carga reativa normalizada ao longo do caminho aberto k_i no qual o i -ésimo capacitor está localizado.

4.7.2 - Subproblema B: Otimização do tempo de operação.

Considerando que, ao longo de um alimentador radial provido de ramais são instalados, n capacitores de capacidades I_{c1} , I_{c2} , ... I_{cn} , localizados respectivamente às distâncias h_1 , h_2 , ... h_n , a partir da subestação, então o tempo T_j sob o qual deverão operar os capacitores do tipo j , ($j=1, 2, \dots, m$), de modo a reduzir as perdas, e assim, maximizar a economia líquida global em um período de tempo pré-estabelecido, é determinado como segue:

Desde que o tempo de operação dos capacitores tem efeito apenas na redução das perdas de energia, a condição necessária de otimização do tempo de duração T_j , $j=1, 2, \dots, m$, é definida por:

$$\frac{\partial S}{\partial T_j} = k \cdot \frac{\partial LE}{\partial T_j} = 0, \text{ para } j \neq 0 \quad (4.43)$$

onde:

$$\frac{\partial LE}{\partial T_j} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial LE}{\partial T_j} \quad (4.44)$$

A redução das perdas de energia através do caminho aberto K_i , no qual será instalado o i -ésimo capacitor, é calculada por:

$$LE_i = \sum_{j=u_i}^{m-1} \int_{T_{j+1}}^{T_j} \int_0^{h_i} \left\{ 2rI_{c_i} [I'_s(t)F_p(K_i, x) - \bar{F}_p^j(K_i, x)] - rI_{c_i}^2 \right\} dx dt \quad (4.45)$$

onde $I'_s(t)$ é a variação da carga reativa com o tempo, representada pela curva de duração de carga, e $\bar{F}_p^j(K_i, x)$ representa a função distribuição de carga capacitiva ao longo do caminho aberto K_i , devido aos capacitores do tipo 0, 1, 2, ... j, que já se encontram instalados. Para uma seção s ao longo do caminho aberto K , definimos:

$$\bar{F}_p^j(K_i, x) = \bar{F}^j(s, x) = - \sum_{\substack{k=1 \\ k \in A(j)}}^{i-1} B_{sk} I_{c_k} \quad (4.46)$$

derivando a eq.(4.45) em relação a T_j , $j=1, 2, \dots, m$, tem-se:

$$\frac{\partial LE_i}{\partial T_j} = \begin{cases} \int_0^{h_i} \left\{ 2rI_{c_i} [I'_s(T_j) \bar{F}_p^j(K_i, x) - \bar{F}_p^j(K_i, x)] - rI_{c_i}^2 \right\} dx, & \text{para } j=u_i \\ 2rI_{c_i} \int_0^{h_i} \bar{F}_p^j(K_i, x) dx, & \text{para } j > u_i \\ 0, & \text{para } j < u_i \end{cases} \quad (4.47)$$

onde $F_p^j(K_i, x)$, representa a função distribuição de carga capacitiva ao longo do caminho aberto K_i , devido aos capacitores do tipo j , $j \neq 0$, que já então instalados. Para uma seção s ao longo do caminho aberto K , definimos:

$$F_p^j(K_i, x) = F_p^j(s, x) = - \sum_{\substack{k=1 \\ k \in A(j)}}^{i-1} B_{sk} I_{c_k} \quad (4.48)$$

Substituindo a eq.(4.48) na eq.(4.44), obtém-se:

$$\sum_{i \in A(j)}^n \int_0^{h_i} \left\{ 2r I_{c_i} [I'_s(T_j) F_p^j(K_i, x) - \bar{F}_p^j(K_i, x)] - r I_{c_i}^2 \right\} dx$$

$$+ \sum_{i \in A(j-1)}^n 2I_{c_i} \int_0^{h_i} F_p^j(K_i, x) dx = 0 \quad (4.49)$$

$$I'_s(T_j) \sum_{i \in A(j)}^n I_{c_i} \int_0^{h_i} F_p^j(K_i, x) dx = \sum_{i \in A(j)}^n I_{c_i} \left[h_i \frac{I_{c_i}}{2} + \int_0^{h_i} \bar{F}_p^j(K_i, x) dx \right]$$

$$+ \sum_{i \in A(j-1)}^n I_{c_i} \int_0^{h_i} F_p^j(K_i, x) dx \quad (4.50)$$

Resolvendo a eq.(4.50) para $I'_s(T_j)$, obtém-se:

$$I'_s(T_j) = \frac{\sum_{i \in A(j)} \int_0^{h_i} I_{c_i} \left[h_i \frac{I_{c_i}}{2} + \int_0^{h_i} F_P^j(k_i, x) dx \right] + \sum_{i \in \bar{A}(j-1)} \int_0^{h_i} F_P^j(K_i, x) dx}{\sum_{i \in A(j)} I_{c_i} \int_0^{h_i} F_P^j(K_i, x) dx} \quad (4.51)$$

onde o segundo membro desta equação, corresponde ao nível de carga reativa no qual deverá operar o capacitor do tipo j , durante o tempo T_j . Este mesmo nível, determina o tempo t_j^s , no qual os capacitores do tipo j devem entrar em operação, e aquele no qual devem sair de operação, t_j^f , isto é:

$$I_s(t_j^s) = I_s(t_j^f) = I'_s(T_j) \quad (4.52)$$

onde $I_s(t)$ é a representação da variação de demanda reativa, através da curva de demanda diária.

4.7.3 - Subproblema C: Otimização da localização

Se n capacitores de capacidades I_{c1} , I_{c2} , ... I_{cn} , estão disponíveis para serem instalados ao longo de um alimentador radial com ramais, e se o tempo de operação T_j ($j=1, 2, \dots, m$) para os capacitores chaveados são conhecidos, a localização ótima do

i -ésimo capacitor que resulta em máxima economia com perdas, é obtida através da avaliação da função custo S (eq.4.27), considerando a presença deste capacitor ao longo de cada um dos caminhos abertos do alimentador, e que o $(i-1)$ -ésimo, $(i-2)$ -ésimo, ... , capacitores, já se encontram em suas localizações ótimas.

Se x_{ik} é a distância normalizada entre a subestação e o ponto de instalação do i -ésimo capacitor, que está localizado em uma seção S do k -ésimo caminho aberto, a redução das perdas de potência e das perdas de energia, através deste caminho são expressas do seguinte modo:

$$LP_{ik} = \int_0^{x_{ik}} r I_{ci} \left[2F(s,x) - \sum_{j=1}^{i-1} B_{sj} I_{cj} \right] - I_{ci} dx \quad (4.53)$$

$$LE_{ik} = \int_0^{x_{ik}} r I_{ci} \left[2(T_{u_i} F_{c_{u_i}} F(s,x) - \sum_{k=1}^{i-1} T_M \sum_{j=1}^{i-1} B_{sj} I_{cj}) - T_{u_i} I_{ci} \right] dx \quad (4.54)$$

$j \in A(M)$

onde M é dada pela eq.(4.20).

Como se pode observar, através das eqs.(4.53) e (4.54), a redução das perdas de potência, LP_{ik} , e das perdas de energia, LE_{ik} , não dependem das localizações x_{jk} , $j \neq i$. Para determinar a localização ótima de um determinado capacitor ao longo de um

alimentador radial provido de ramais, é necessário avaliar os valores da função S, conhecendo-se as localizações ótimas deste capacitor ao longo de cada um dos caminhos abertos.

A condição necessária para que a localização do i-ésimo capacitor ao longo do k-ésimo caminho aberto, seja ótimo, é expressa pela seguinte equação.

$$\frac{\partial S}{\partial X_{ik}} = K_p \frac{\partial LP_{ik}}{\partial X_{ik}} + K_e \frac{\partial LE_{ik}}{\partial X_{ik}} = 0 \quad (4.55)$$

onde:

da eq.(4.53), tem-se:

$$\frac{\partial LP_{ik}}{\partial X_{ik}} = 2rIc_i \left[F(s, x) - \sum_{j=1}^{i-1} B_{sj} Ic_j \right] - rIc_i^2 \quad (4.56)$$

e da eq.(4.54),

$$\frac{\partial LE_{ik}}{\partial X_{ik}} = 2rIc_i \left[T_{u_i} F_{c_{u_i}} F(s, x) - \sum_{k=1}^{i-1} T_M \sum_{\substack{j=1 \\ j \in A(M)}}^{i-1} B_{sj} Ic_j \right] - rIc_i^2 T_{u_i} \quad (4.57)$$

onde s é uma seção do caminho aberto K_i .

Substituindo as eqs.(4.56) e (4.57) na eq.(4.55), obtém-se:

$$K_p \left[F(s, x) - \sum_{j=1}^{i-1} B_{s_j} I_{c_j} \right] + K_e \left[T_{u_i} F_{c_{u_i}} F(s, x) - \sum_{k=1}^{i-1} T_M \sum_{\substack{j=1 \\ j \in A(M)}}^{i-1} B_{s_j} I_{c_j} \right] = \\ (K_p + K_e T_{u_i}) \frac{I_{c_i}}{2} \quad (4.58)$$

Definindo:

$$\hat{F}_k(x) = F(s, x) - \sum_{j=1}^{i-1} B_{s_j} I_{c_j} \quad (4.59)$$

$$\bar{F}_k(x) = T_{u_i} F_{c_{u_i}} F(s, x) - \sum_{k=1}^{i-1} T_M \sum_{\substack{j=1 \\ j \in A(M)}}^{i-1} B_{s_j} I_{c_j} \quad (4.60)$$

onde s é uma seção que pertence ao caminho aberto K_i , a eq.(4.58) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\tilde{F}_k(x_{ik}) = (K_p + K_e T_{u_i}) \frac{I_{c_i}}{2} \quad (4.61)$$

onde:

$$\tilde{F}_k(x) = K_p \hat{F}_k(x) + K_e \bar{F}_k(x) \quad (4.62)$$

Portanto, a localização ótima X_{ik} do i -ésimo capacitor ao longo do k -ésimo caminho aberto é obtida através da função distribuição de carga reativa $\tilde{F}_k(x)$, de modo que X_{ik} satisfaça a eq.(4.61).

Após serem conhecidas as localizações X_{ik} , referentes ao i -ésimo capacitor ao longo de todos os caminhos abertos, determina-se os correspondentes valores da função objetivo S , eq.(4.27), e atribui-se à localização ótima do capacitor, aquela que proporcionar o maior valor para S .

A localização dos capacitores subsequentes é feita, considerando que os capacitores que já foram instalados, encontram-se em suas respectivas localizações ótimas. É de se esperar portanto que, após a adição de um novo capacitor, haja um acréscimo da economia líquida resultante, em decorrência do aumento da redução das perdas. Após a instalação do último capacitor, obtém-se a máxima redução das perdas e consequentemente, máxima economia líquida.

Como se pode observar através da eqs.(4.40), (4.41) e (4.61), a resolução de um subproblema particular depende dos valores conhecidos das variáveis que são determinadas nos subproblemas restantes. Portanto, um procedimento iterativo de resolução dos

subproblemas A, B e C descritos acima, é utilizado para resolver o problema geral de otimização da função objetivo S. A fig.4.6 mostra o diagrama de blocos estrutural, semelhante ao da fig.3.6, para a resolução do problema geral de otimização da economia líquida proveniente da redução das perdas de alimentadores radiais providos de ramais.

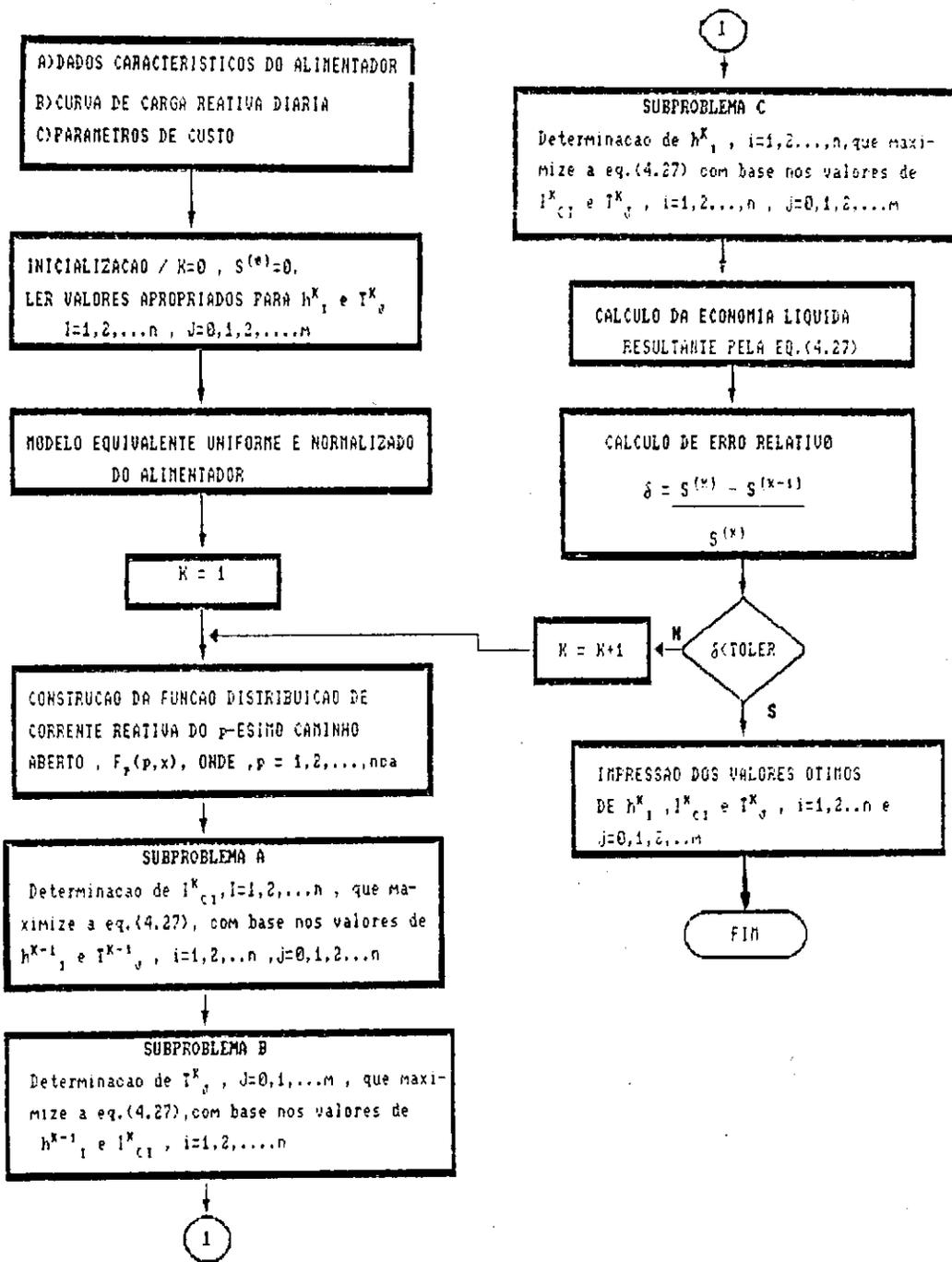


Fig.4.6 - Fluxograma do procedimento iterativo de resolução dos subproblemas A,B e C

4.8 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Para aplicar a metodologia de planejamento e controle da compensação reativa em alimentadores radiais constituídos de ramais, escolhemos o alimentador radial de 30(trinta) barras, tensão 23KV, cujo diagrama unifilar está representado na fig.(4.7). Os parâmetros característicos deste alimentador, estão resumidos na tab.4.1. A curva de carga reativa diária e a correspondente curva de duração de carga estão mostradas, respectivamente nas figs.4.8a e 4.8b.

Deseja-se fazer o planejamento da compensação reativa através da instalação de 3(três) bancos de capacitores, sendo um do tipo fixo e dois do tipo chaveado, de modo que a economia líquida anual, obtida com a redução das perdas de potência e das perdas de energia, seja máxima. Para o período de planejamento, são especificados os seguintes parâmetros econômicos:

- Custo anual do KW de perda de pico de potência:
 $K_p = \text{US\$}120/\text{KW}/\text{ano}$
- Custo anual do KWh de perda de energia: $K_e = \text{US\$}15/\text{KWh}/\text{ano}.$
- Custo anual do KVAR de capacitor fixo: $K_{cf} = \text{US\$}3.5/\text{KVAR}$
- Custo anual do KVAR de capacitor chaveado: $K_{cs} = \text{US\$}6.0/\text{KVAR}.$

Localizando inicialmente os capacitores ao longo das seções 5, 4 e 3, que fazem parte do caminho principal, o procedimento iterativo representado na fig.4.6, termina após 7 iterações. Os valores ótimos de localização, capacidade e tempo de operação dos capacitores, para diferentes combinações de sequência de operação dos capacitores, estão contidos na tab.4.2. Os valores de redução das perdas de potência e de energia para cada caso, e a economia líquida anual resultante também são mostrados. Como se pode observar, as localizações ótimas dos capacitores não estão necessariamente ao longo das seções de um mesmo caminho aberto. A presença de algum capacitor ao longo de um ramo lateral, nos faz concluir que no modelo estrutural do alimentador, os ramos laterais não podem ser ignorados. Como era de se esperar os barramentos correspondentes as localizações dos três capacitores, pertencem às seções com maior concentração de carga reativa. Embora os valores ótimos de capacidade nominal (KVAR) não sejam implementáveis, a análise de sensibilidade descrita no capítulo 3, mostra que se forem escolhidos valores comerciais próximos dos respectivos valores teóricos, o valor da economia líquida resultante não sofre grande variação com relação ao valor da economia ótima. A razão pela qual os valores da economia líquida resultante serem comparáveis, deve-se ao fato que os níveis de compensação reativa sejam aproximadamente iguais (60% da carga reativa máxima) em todos os casos.

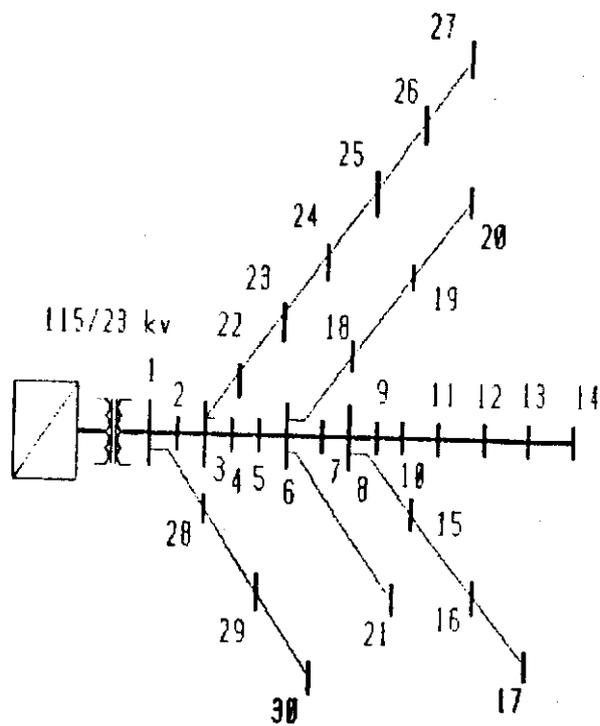


Fig.4.7 - Alimentador primário de 30 (trinta) barras, 23 kv

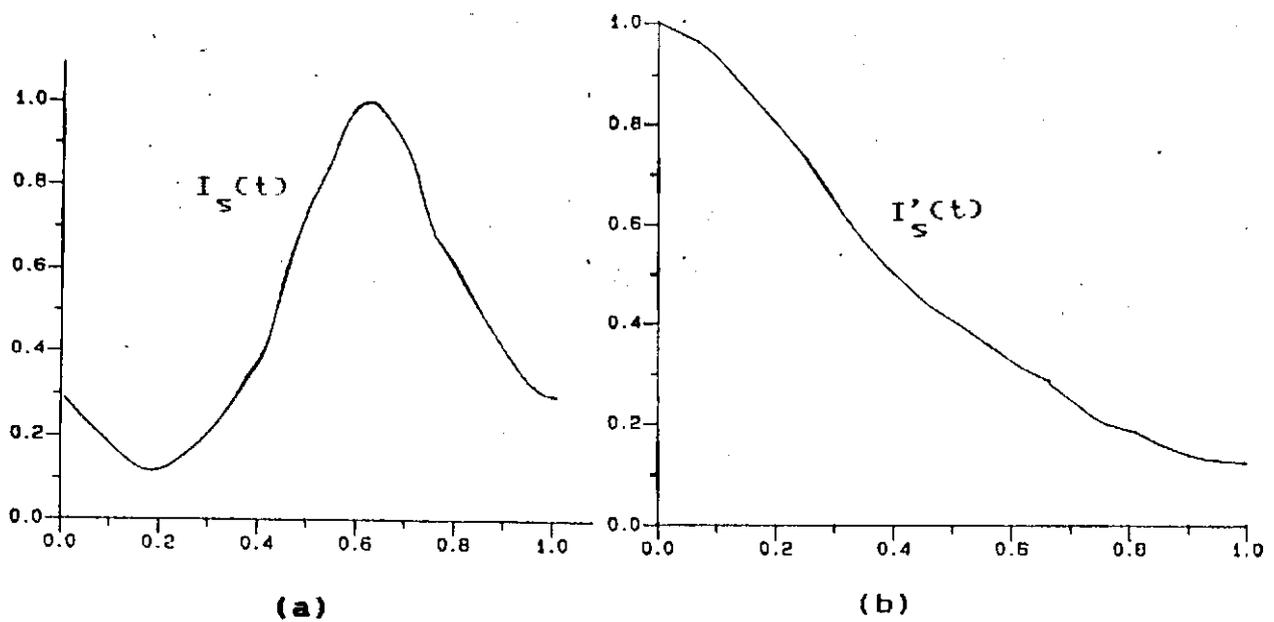


Fig.4.8 - Variação da carga reativa com o tempo, para o alimentador da fig.4.7. a) curva de carga reativa diária; b) curva de duração de carga reativa.

TRECHO	CABO	RESISTENCIA (OHMS/MI)	COMPRIMENTO (MI)	CARGA REATIVA (KVAR)
0 - 1	300 Cu	0.1966	2.600	0.
1 - 2	336 Al	0.279	0.785	174.
2 - 3	2/0 Cu	0.444	0.785	0.
3 - 4	2 Cu	0.864	1.360	312.
4 - 5	2 Cu	0.864	0.640	0.
5 - 6	4 Cu	1.374	1.210	0.
6 - 7	4 Cu	1.374	0.983	0.
7 - 8	4 Cu	1.374	0.983	0.
8 - 9	4 Cu	1.374	0.965	63.
9 -10	4 Cu	1.374	0.965	0.
10 -11	4 Cu	1.374	2.890	112.
11 -12	4 Cu	1.374	1.350	219.
12 -13	4 Cu	1.374	0.550	261.
13 -14	4 Cu	1.374	1.120	243.
8 -15	2 Cu	0.864	0.550	159.
15 -16	4 Cu	1.374	0.530	183.
16 -17	4 Cu	1.374	0.950	159.
6 -18	2 Cu	0.864	0.560	144.
18 -19	2 Cu	0.864	1.840	224.
19 -20	4 Cu	1.374	1.200	165.
6 -21	2 Cu	0.864	0.700	69.
3 -22	2/0 Cu	0.44	1.270	174.
22 -23	2/0 Cu	0.444	0.773	639.
23 -24	2 Cu	0.864	0.663	0.
24 -25	2 Cu	0.864	1.690	372.
25 -26	2 Cu	0.864	1.230	183.
26 -27	4 Cu	1.374	1.100	264.
1 -28	336 Al	0.279	1.670	294.
28 -29	2/0 Cu	0.444	1.200	294.
29 -30	4 Cu	1.374	0.811	294.

Tab.4.1 - Dados do alimentador primário de 30 (trinta) barras da fig.4.7

TIPO DE CAPAC.	CAPAC. OTIMA (KVAR)	LOCAL. OTIMA (BARRA)	TEMPO OTIMO DE OPERACAO (HOR./ANO)	NIVEL DE REATIVO P/CHAV. (KVAR)	RED. DAS PERDAS DE POTENCIA (KW/ANO)	RED. DAS PERDAS DE ENERGIA (KVAR)	ECONOMIA ANUAL (US\$/ANO)
0	580.	13	8760.				
0	811.	8	8760.	-	82.85	106227	10371
0	933.	25	8760.				
0	622.	13	8760.				
1	1093.	8	3428.	2660.	88.46	304695	13036
2	1047.	25	3624.	2500.			
0	616.	13	8760.				
2	1148.	8	2949.	3056.	88.57	293566	12867
1	1011.	25	4916.	1705.			
1	784.	13	3285.	2779.			
0	893.	8	8760.		88.68	245400	12296
2	1057.	25	3642.	2485.			
1	721.	13	2700.	1606.			
2	957.	15	5148.	3230.	88.84	270753	12583
0	1395.	23	8760.				
2	803.	13	2923.	3075.			
1	885.	8	5882.	1371.	88.37	220640	11955
0	1038.	25	8760.				
2	812.	13	2945.	3059.			
0	885.	8	8760.		88.74	243402	12268
1	1038.	25	4446.	1921.			

Tab.4.2- Resultados do planejamento da compensação reativa para o alimentador de 30(trinta) barras da fig.4.7

4.9 - CONCLUSÃO

Este capítulo apresenta uma abordagem mais ampla da metodologia introduzida no capítulo anterior, que trata da questão do planejamento e controle da compensação reativa em alimentadores primários constituídos de ramais. Para este tipo de alimentador, as equações que compõem o método iterativo de otimização das perdas de potência e de energia, são relativamente complexas e baseiam-se num modelo estrutural de alimentador constituído de ramais, definido por HAPP, 1980. Os resultados da aplicação do método ao planejamento e controle da compensação reativa em um alimentador primário de 30(trinta) barras, constituído por 5(cinco) ramais, mostram que a localização dos capacitores através dos ramos laterais está presente em todas as alternativas de planejamento.

CAPÍTULO 5

APLICAÇÕES

5.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo, mostraremos os resultados e análises da aplicação da estratégia de planejamento e controle da compensação reativa, descrita nos capítulos 3 e 4, a dois subsistemas radiais particulares. O primeiro deles, é o alimentador 01L2, de 16 barras, pertencente ao sistema da SAELPA (SOCIEDADE ANÔNIMA DE ELETRIFICAÇÃO DA PARAÍBA), que é suprido pela subestação 69/13.8KV de Mussure-I, e o segundo é o alimentador 01L5, de 26 barras, pertencente ao sistema da CELB (COMPANHIA DE ELETRICIDADE DA BORBOREMA), que é suprido pela subestação 69/13.8KV de Campina Grande-I. Estes dois casos estudados mostram-se bastante úteis para a avaliação do estudo a que nos propuzemos fazer.

5.2 - SUBSISTEMAS ANALISADOS

5.2.1 - O Alimentador 01L2 da S/E de Mussuré - I

O diagrama unifilar e as características físicas deste alimentador são apresentados na fig.5.1 e tab.5.1, respectivamente. Para este alimentador, a curva típica de demanda reativa diária mostrada na fig.5.3.a, foi obtida através das medições de tensão, corrente total e fator de potência médio

diário ocorridos no período Agosto/90 onde não existiam grandes variações de tensão e corrente entre os dias úteis e fins de semana. A correspondente curva de duração de demanda reativa é mostrada na fig.5.3.b.

5.5.2 - O Alimentador 01L5 da S/E Campina Grande - I

A fig.5.2 e tab.5.2 apresentam respectivamente, o diagrama unifilar e as características físicas deste alimentador. A sua curva típica de demanda reativa diária e a correspondente curva de duração de demanda reativa, são mostradas nas figs.5.4.a e 5.4.b, respectivamente.

5.3 - DADOS DE PLANEJAMENTO

Admitindo que o planejamento da compensação reativa é para um horizonte de 5 anos, são especificados os seguintes parâmetros econômicos:

a) custo médio anual do KW de perda de potência:

$$K_p = \text{US\$ } 80/\text{KW/ano}$$

b) custo médio anual do KWh de perda de energia:

$$K_e = \text{US\$ } 15/\text{MWh/ano}$$

c) custo médio anual da unidade de banco de capacitor fixo:

$$K_{cf} = \text{US\$ } 1.0/\text{KVAR/ano}$$

d) custo médio anual da unidade de banco de capacitor chaveado:

$$K_{cs} = \text{US\$ } 3.0/\text{KVAR/ano}$$

A taxa anual de investimento, que é aplicada ao custo dos capacitores é de 14% .

Tendo em vista, que o nível de tensão em ambos os alimentadores é inferior a 15kV, ficará estabelecido que a adição de bancos de capacitores deve ser feita, enquanto o montante de reativos for inferior ou igual a 70% da carga reativa máxima obtida na subestação (GONEN, 1987).

A potência dos capacitores fixos e chaveáveis, que estão disponíveis para serem instalados ao longo dos alimentadores são de 300 KVAR, 600 KVAR, 900 KVAR, 1200 KVAR, 1800 KVAR e 3600 KVAR.

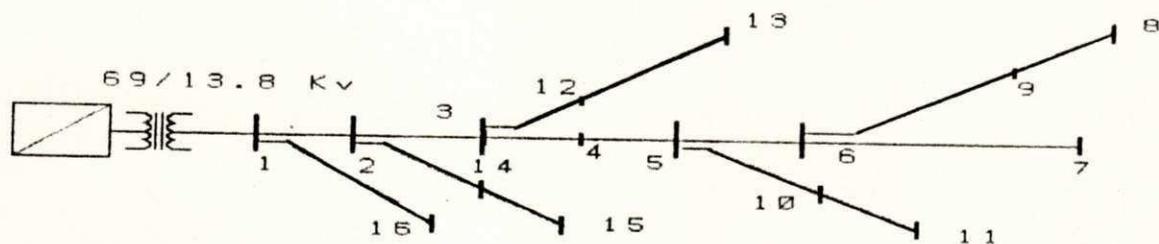


Fig.5.1 - Diagrama unifilar do alimentador primário 01L2 da S/E Mussure-I, 13.8 KV .

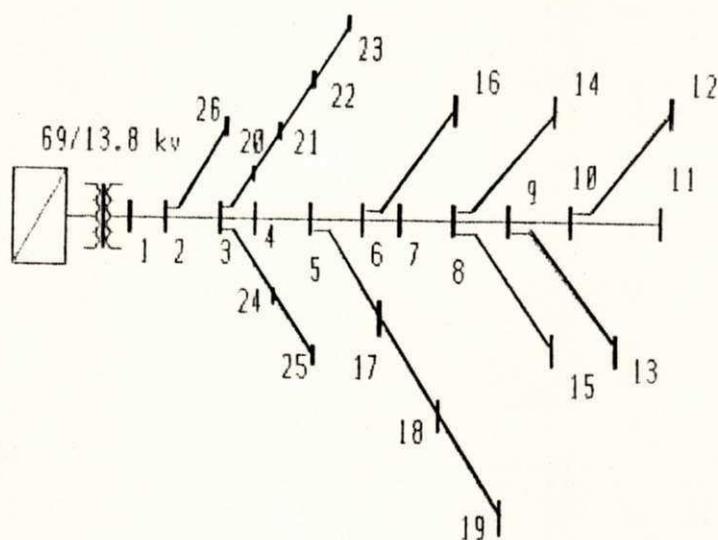


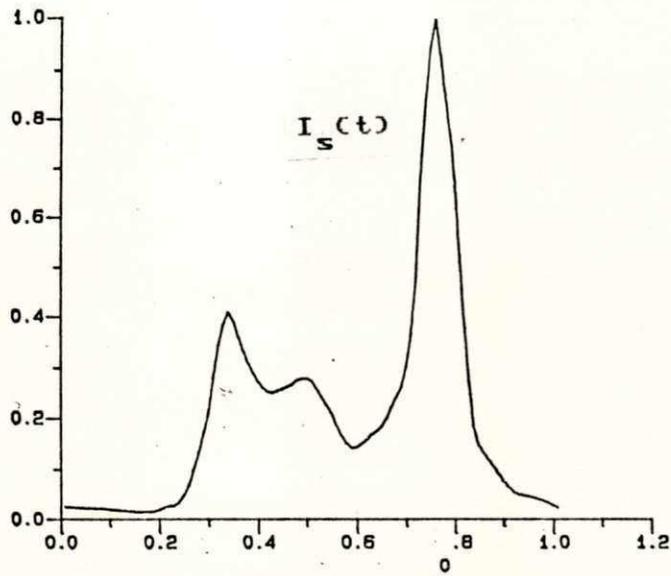
Fig.5.2 - Diagrama unifilar do alimentador primário 01L5 da S/E Campina Grande I, 13.8 kv

TRECHO	CABO	RESISTÊNCIA (Ω /Km)	COMPRIMENTO (Km)	CARGA REATIVA (KVAR)
0-1	4/0	0.2747	1.24	0.
1-2	4/0	0.2747	0.15	0.
2-3	4/0	0.2747	0.52	112.
3-4	4/0	0.2747	0.58	223.
4-5	4/0	0.2747	0.41	0.
5-6	4/0	0.2747	0.44	70.
6-7	4/0	0.2747	0.40	1426.
6-8	4/1	0.550	0.40	70.
8-9	4/1	0.550	0.54	5.
5-10	4/0	0.2747	0.35	70.
10-11	4/0	0.2747	0.59	122.
3-12	4/0	0.2747	0.78	500.
12-13	4/0	0.2747	1.11	1132.
2-14	4/0	0.2747	0.30	294.
14-15	4/0	0.2747	0.30	107.
1-16	4.	1.3921	0.27	22.

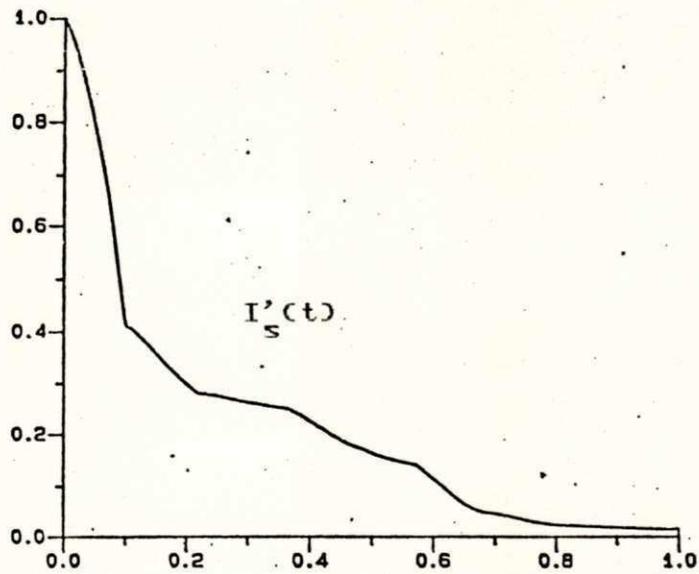
Tab.5.1 - Dados característicos do alimentador da fig.5.1

TRECHO	CABO	RESISTÊNCIA (Ω /Km)	COMPRIMENTO (Km)	CARGA REATIVA (KVAR)
0-1	4/0	0.37	1.495	189.6
1-2	4/0	0.37	0.530	0.
2-3	4/0	0.37	0.320	0.
3-4	4/0	0.37	0.250	342.4
4-5	4/0	0.37	1.365	0.
5-6	1/0	0.7	1.395	0.
6-7	4.	1.58	4.0	234.
6-8	4.	1.58	1.50	0.
8-9	4.	1.58	0.50	0.
9-10	4.	1.58	0.20	0.
10-11	4.	1.58	1.40	263.
10-12	4.	1.58	1.50	275.
9-13	4.	1.58	4.30	182.
8-14	4.	1.58	2.40	287.
8-15	4.	1.58	1.30	216.
6-16	1/0	0.70	0.060	405.
5-17	1/0	0.37	1.930	446.
17-18	4/0	0.37	0.360	0.
18-19	2/0	0.556	0.720	474.
3-20	4.	1.58	0.420	229.
20-21	4.	1.58	10.00	326.
21-22	4.	1.58	7.70	243.
22-23	4.	1.58	7.30	184.
3-24	4.	1.58	5.70	453.
24-25	4.	1.58	5.0	334.
2-26	4.	1.58	0.385	376.

Tab.5.2 - Dados característicos do alimentador da fig.5.2

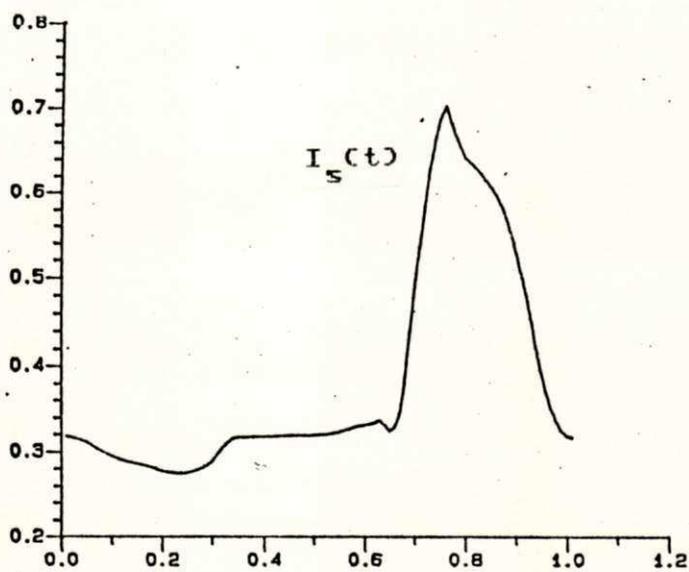


(a)

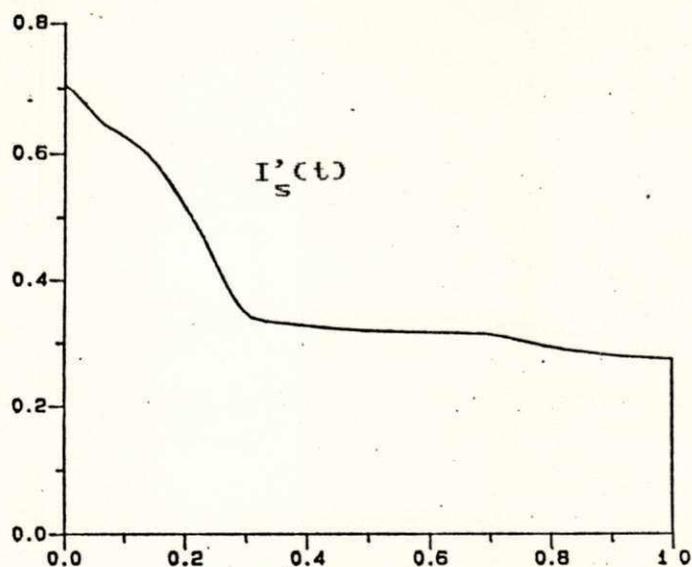


(b)

Fig.5.3- Variação da carga reativa com o tempo, no alimentador da fig.5.1. (a) curva de carga reativa diária; (b) curva de duração de carga reativa



(a)



(b)

Fig.5.4- Variação da carga reativa com o temp, no alimentador da fig.5.2. (a) curva de carga reativa diária ; (b) curva de duração de carga reativa

5.4 - RESULTADOS OBTIDOS

As tabs.5.3 e 5.4 contêm, respectivamente os resultados do planejamento da compensação reativa para os alimentadores das figs.5.1 e 5.2, através da instalação de 3(três) bancos de capacitores, sendo pelo menos um deles do tipo fixo. Para cada sequência de operação especificada, é mostrada a solução ótima correspondente.

TIPO DE CAPAC.	CAPAC. OTIMA (KVAR)	LOCAL. OTIMA (BARRA)	TEMPO OTIMO DE OPERAÇÃO (HOR./ANO)	NIVEL DE REATIVO P/CHAV. (KVAR)	RED. DAS PERDAS DE POTENCIA (KW/ANO)	RED. DAS PERDAS DE ENERGIA (KWH/ANO)	ECONOMIA ANUAL (US\$/ANO)
0	906.	7	8760.				
0	736.	13	8760.	-	67.10	21470	4124.
0	314.	13	8760.				
0	964.	7	8760.				
0	112.	13	8760.		83.12	26688	6112.
1	1859.	7	607.	2200.			
1	1422.	7	606.	2202.			
1	1313.	13	606.	2202.	92.13	25173.	6445.
0	897.	3	8760.				
1	1790.	7	643.	2066.			
0	493.	13	8760.		90.28	35916.	6512.
1	957.	13	643.	2066.			
0	505.	7	8760.				
1	1439.	13	805.	1500.	90.41	62076.	6900.
2	1377.	7	466.	2732.			
0	500.	7	8760.				
2	1471.	13	522.	2517	90.37	54812.	6798.
1	1284.	7	755.	1668			
1	1775.	7	762.	1643.			
0	485.	13	8760.		90.41	52424.	6757.
2	1000.	13	423.	2896.			
1	1448.	7	759.	1653.			
2	1324.	13	491.	2837.	91.55	51581.	6817.
0	638.	4	8760.				
2	1692.	7	542.	2443.			
1	1069.	13	807.	1494.	91.50	42373.	6682.
0	613.	12	8760.				
2	1800.	7	565.	2355.			
0	479.	13	8760.		90.35	47947.	6689.
1	966.	13	810.	1484.			

Tab.5.3 - Resultados do planejamento e controle da compensação reativa para o alimentador da fig.5.1

TIPO DE CAPAC.	CAPAC. OTIMA (KVAR)	LOCAL. OTIMA (BARRA)	TEMPO OTIMO DE OPERACAO (HOR./ANO)	NIVEL DE REATIVO P/ CHAV. (KVAR)	RED. DAS PERDAS DE POTENCIA (KW/ANO)	RED. DAS PERDAS DE ENERGIA (KWH/ANO)	ECONOMIA ANUAL (US\$/ANO)
Ø	943.	8	8760.				
Ø	413.	22	8760.	-	214.76	84683.	17946.
Ø	2141.	2	8760.				
1	1252.	9	2084.	2462.			
1	537.	22	2984.	2462.	202.00	112421	17985.
Ø	1910.	4	8760.				
1	1357.	9	2185.	2335.			
Ø	405.	22	8760.		213.00	133400	18122.
1	735.	24	2185.	2335.			
Ø	855.	9	8760.				
1	558.	22	2217.	2295.	233.42	265474	21622.
2	1565.	6	1168.	3288.			
Ø	852.	9	8760.				
2	562.	22	2046.	2511.	232.80	267232.	21625.
1	1500.	6	1591.	2974.			
1	1232.	9	2360.	2129.			
Ø	406.	22	8760.		241.46	200429.	21116.
2	1445.	17	1363.	3166.			
1	1228.	9	2000.	1967.			
2	555.	22	1375.	2546.	248.50	193585.	21792.
Ø	1579.	5	8760.				
2	1284.	9	1904.	2667.			
1	550.	22	2169.	2356.	248.63	187550.	21694.
Ø	1557.	5	8760.				
2	1257.	9	1951.	2616.			
Ø	394.	22	8760.		238.55	233250.	21386.
1	1400.	5	2235.	1231.			

Tab.5.4 - Resultados do planejamento e controlada compensação reativa para o alimentador da fig.5.2.

5.5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

De acordo com as soluções ótimas mostradas nas tabs.5.3 e 5.4, pode-se dizer que a instalação de três capacitores, sendo um tipo fixo e dois do tipo chaveado, programados para operarem em tempos diferentes, proporcionam uma economia líquida anual significativamente superior em relação àquela obtida quando apenas capacitores fixos são instalados. Independentemente da escolha para a sequência de operação dos capacitores chaveados, nota-se que a redução nas perdas de energia atingem um valor superior ao dobro daquela que é obtida para o caso de capacitores fixos, indicando assim que, dentro dos limites de tensão e carga, a alternativa de instalação de dois capacitores chaveados e um fixo é, do ponto de vista de redução das perdas, a mais viável. A partir desta alternativa, atribui-se como fator decisivo para a escolha mais econômica, a sequência de operação dos capacitores chaveados.

De acordo com o número da barra indicado para cada capacitor, conclui-se que as suas respectivas localizações ao longo do alimentador estão de acordo com o que era de se esperar, ou seja, junto às seções com maior concentração de carga reativa. Os correspondentes valores ótimos de capacidade nominal, servem de referência para a escolha da respectiva potência dos bancos de

capacitores que estão disponíveis. A solução ótima contida na tab.5.3, indica que no alimentador 01L2 da S/E Mussure-I, deverão ser instalados um capacitor de fixo de 600 kvar na barra 7 e dois capacitores chaveados de 1200 kvar localizados nas barras 13 e 7. Por outro lado, a solução ótima contida na tab.5.4, indica que no alimentador 01L5 da S/E Campina Grande-I, deverão ser instalados um capacitor fixo de 1800 kvar na barra 5 e dois capacitores chaveados de 600 kvar e 1200 kvar nas barras 22 e 9, respectivamente.

A economia líquida anual que é obtida, considerando os valores comerciais de potência dos capacitores, não difere muito do correspondente valor obtido pela solução ótima. De fato, o valor de economia anual para o alimentador 01L2 é U\$\$ 6800 (valor ótimo, U\$\$ 6908), enquanto que para o alimentador 01L5, a economia anual é U\$\$ 21688 (valor ótimo, U\$\$ 21792).

5.6 - CONCLUSÃO

Neste capítulo, apresentamos as aplicações da metodologia descrita nos capítulos 3 e 4, ao planejamento da compensação reativa de dois sistemas reais, com base em dados reais de curvas de carga reativa e limites de compensação reativa, e considerando a disponibilidade de bancos de capacitores fixos e chaveados com

potências de 300, 600, 900, 1200, 1800 e 3600kvar. As alternativas de planejamento que foram analisadas, baseiam-se em diferentes sequências de chaveamento para três bancos de capacitores, e de acordo com os valores de economia líquida anual obtidos em cada caso, tem-se a alternativa desejada.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES.

Apesar de existirem métodos mais simples para o planejamento e controle da compensação reativa em alimentadores primários, um método iterativo tal como o que foi descrito neste trabalho, é mais eficiente, do ponto de vista econômico das perdas, pois permite que seja feita uma melhor distribuição da quantidade de reativos necessários ao sistema.

Como foi visto, o procedimento geral de otimização da redução das perdas, através da instalação de bancos de capacitores fixos e/ou chaveados, visando maximizar a economia líquida resultante (função objetivo), depende fundamentalmente da escolha apropriada de valores iniciais para duas das três variáveis de decisão: localização, capacidade nominal e/ou tempo de operação dos capacitores. Tendo em vista que a função objetivo S , não possui necessariamente um único máximo local, a solução obtida pode não representar a solução ótima global. Portanto, com base em um conjunto de valores iniciais para duas das três variáveis de interesse, é determinado um conjunto de diferentes soluções ótimas locais, dentre as quais elege-se a solução ótima global.

A representação do alimentador físico por um modelo uniforme normalizado, simplifica bastante o desenvolvimento das equações que determinam os parâmetros ótimos, além de ser independente do tipo de configuração.

Considerando que o método escolhido não faz uso de restrições de operação tais como: capacidade máxima de carregamento e limites de tensão ao longo do sistema, a solução ótima global que é obtida pelo procedimento iterativo, serve de base para as tomadas de decisão dentro das fases de planejamento.

Com base nos resultados obtidos para os exemplos que foram estudados, concluímos que:

a) A conveniência da instalação de bancos de capacitores ao longo de alimentadores primários é justificada pelos benefícios econômicos obtidos com a redução das perdas, quando eles estão adequadamente localizados, dimensionados e programados para operar.

b) A presença de capacitores chaveados que operam em tempos diferentes, proporciona uma economia em perdas significativamente superior àquela que é obtida quando apenas capacitores fixos são instalados, muito embora a sequência de chaveamento seja um fator

decisivo na escolha da alternativa mais econômica. Em alguns casos, porém, a presença de capacitores chaveados, ao invés de apenas capacitores fixos, pode proporcionar uma economia relativamente inferior devido a seu elevado custo.

c) Embora os valores ótimos de capacidade nominal (KVAR) dos capacitores não sejam implementáveis, a análise de sensibilidade mostrou que se valores comerciais são escolhidos apropriadamente, o valor da economia líquida resultante não sofre grande variação com relação ao valor obtido pela solução ótima. Esta mesma análise mostrou também que, para pequenas variações em torno da localização ótima de um determinado capacitor, a economia líquida resultante é praticamente invariável em relação à economia ótima, garantindo assim que a estratégia escolhida, tem importância significativa no auxílio ao planejamento e controle da compensação reativa em sistemas reais.

É importante salientar que a metodologia que foi abordada neste trabalho, pode ser estendida e ampliada para considerar aspectos mais realistas do alimentador e dos dados de planejamento, o que pode ser feito via trabalhos posteriores. Dentre estes aspectos, citamos:

- a) variação de tensão ao longo do alimentador.
- b) desequilíbrio entre fases.

c) variação da curva de carga reativa do alimentador no período de planejamento, e possibilidade de obtenção desta curva, através de um tratamento estatístico dos dados de carga medidos junto às barras do alimentador.

d) variação não-linear dos parâmetros de custo, no horizonte estabelecido para o planejamento .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A.A.El-Kib. "Capacitive-Compensation Planning and Operation for Primary Distribution Feeders", Ph.D Dissertacion, 1984. North Carolina State University.
- ADBY, P.R AND DEMPSTER, M.A.H. "Introduction to Optimization Methods", Chapman and Hall Mathematics Series,1974
- CHANG, N.E. " Determination of Primary-Feeder Losses ",IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.87, pp.1991-1994, December 1968.
- CHANG, N.E. " Locating Shunt Capacitors on Primary Feeder for Voltage Control and Loss Reduction", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.88, pp. 1574-1577, October 1969.
- CHANG, N.E. " Generalized Equations on Loss Reduction with Shunt Capacitor ", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.91, pp. 2189-2195, 1972.
- COOK, R.F. " Analysis of Capacitor Application as affected by Load Cycle", AIEE Transactions, vol. 79, pp. 353-359, 1960.
- COOK, R.F. " Optimizing The Application of Shunt Capacitors for Reative-Volt-Ampere Control and Loss Reduction",AIEE Transactions, vol.80, pp. 430-444, August 1961.

- COOK, R.F. "Calculating Loss Reduction Afforded by Shunt Capacitor Application", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.83, pp 1227-1230, 1964.
- DURAN, H. "Optimum Number, Location and Size of Shunt Capacitors in Radial Distribution Feeders: A Dynamic Programming Approach", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 87, pp. 1769-1774, September 1968.
- GRAINGER, J.J. and LEE, S.H. "Optimum Size and location of Shunt Capacitors for Reduction of Losses on Distribution Feeders", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 100, pp. 1105-1118, March 1981.
- GRAINGER, J.J., LEE, S.H., BYRD, A.M. and CLINARD, K.N. " Proper Placement of Capacitors for Losses Reduction on Distribution Primary Feeders", Proceedings of the American Power Conference, vol 42, pp. 593-603, 1980.
- GRAINGER, J.J., LEE, S.H. and EL-KIB, A.A. "Desing of a Real - Time Swithing Control Scheme for Capacitive Compensation of Distribution Feeders", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 101, pp. 2420-2428, August, 1982.
- GRAINGER, J.J and CIVANLAR, S. " Volt/Var Control on Distribution Systems with Laterals Branches using Switched Capacitors and Voltage Regulators : PART I, PART II and PART III", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 104, pp. 3278-3297, November, 1985.

- GONEN, T. "Electric Power Distribution Systems Engineering". New York, McGraw-Hill Book Company, cap.8, pp. 378-351, 1987.
- HAPP, H.H. "Piecewise Methods and Applications to Power Systems", Wiley-Interscience Publication, John Wiley, New York, 1980.
- LEE, S.H. and GRAINGER, J.J. "Optimum Placement of Fixed and Switched Capacitors on Primary Distribution Feeders", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 100, pp. 345-351, January, 1981.
- MAXWELL, M. "The Economic Application of Capacitors to Distribution Feeders", AIEE Transactions, vol. 79, pp.353-359, 1960.
- NEAGLE, N.M. and SAMSON, D.R. "Loss Reduction from Capacitors Installed on Primary Feeders", AIEE Transactions, vol.75, PART III, pp. 950-959, 1956.
- SCHMILL, J.V. "Optimal Size and Location of Shunt Capacitors on Distribution Feeders", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 84, pp. 825-832, September, 1965.
- WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION. "Electrical Transmission and Distribution East Pittsburgh, 1965.