OTIMIZAÇÃO DE ALOCAÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES NA REDE DE MÉDIA TENSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Alexandre A. A. Souza[1], Carlos César Barioni de Oliveira[1], Klaus de Geus[2]
[1] Universidade de São Paulo
Avenida Prof. Luciano Gualberto, travessa 3 nº 380. CEP - 05508-970 - São Paulo, SP
{alexandre.augusto.souza, barioni}@usp.br
[2] Universidade Federal do Paraná
Centro Politécnico - Bloco Lame/Cesec - Jd Américas, CEP 81531-990 – Curitiba, PR
{klaus}@copel.com

RESUMO

Este artigo apresenta o desenvolvimento de um modelo matemático voltado ao planejamento da rede de média tensão de energia elétrica para auxiliar o estudo de alocação de banco de capacitores. Para esse objetivo, foi desenvolvido um modelo de programação linear inteira mista para determinar a localização e a potência do capacitor para melhorar o nível de tensão do sistema elétrico. Para validação dos resultados é realizado o fluxo de potência considerando o modelo corrente constante.

PALAVRAS CHAVE. Alocação de Banco de Capacitores. Média Tensão. Programação Linear Inteira Mista. AE – Aplicações a Energia.

ABSTRACT

This paper presents the development of a mathematical model applied to low voltage electrical network planning to give support for capacitor placement decision task. For this goal, a linear mathematical model was developed to determine the location and power of the capacitor to improve the voltage level of the electrical system. In order to evaluate voltage level, the model includes a power flow method based on constant current.

KEYWORDS. Capacitor Placement. Medium Voltage. Mixed Integer Linear Programming. AE – Energy Applications.

1. Introdução

As empresas de energia elétrica gastam hoje centenas de horas mensais em atividades de planejamento dos seus sistemas elétricos, seja para sua operação como para sua expansão. Os estudos realizados para o planejamento da rede elétrica exigem elevado grau de intervenção humana, bem como um tempo considerável para a sua análise. Os investimentos praticados no segmento de distribuição de energia elétrica constituem-se num percentual significativo dos orçamentos das concessionárias de distribuição. Os altos custos de investimento e de operação, somados ao fato de que o sistema de distribuição é o que se conecta diretamente aos consumidores, conferem uma importância destacada ao planejamento da expansão do sistema.

Ações derivadas do processo de planejamento podem acarretar ganhos substanciais nos custos de expansão e operação. Além dos ganhos financeiros, um planejamento adequado da rede de distribuição pode permitir a consideração de outras questões tais como qualidade de energia elétrica, confiabilidade da rede, limitações nos orçamentos e possibilidades de expansão. Diversas ferramentas têm sido propostas para a solução do problema do planejamento, envolvendo métodos analíticos e técnicas de otimização.

O problema a ser resolvido é de natureza combinatória e deve levar em consideração a topologia da rede em análise, bem como as cargas dispostas ao longo desta. Cada ponto da rede é candidato a receber um banco de capacitores, sendo necessária em cada validação a simulação do fluxo de potência para verificar o resultado obtido. A alocação de capacitores em sistemas de distribuição possibilita um melhor gerenciamento da potência reativa, trazendo benefícios como redução de perdas elétricas e melhoria do nível de tensão. Neste trabalho, procura-se fundamentalmente fazer o controle de nível de tensão com a utilização de capacitores. O aspecto da melhora no nível de reativa na rede não é levado em consideração, a função objetivo trata diretamente com a violação da tensão exigida em cada estudo realizado por alimentador. A instalação do capacitor acaba melhorando o reativo da rede, implicando diretamente em um aumento do nível de tensão, objetivo principal do trabalho.

A organização deste artigo é definida, a saber: seção 2 relaciona os trabalhos disponíveis na literatura sobre o assunto, na seção 3 detalha-se o modelo desenvolvido em programação linear inteira mista (PLIM). A seção 4 mostra um estudo realizado para a validação do modelo e, na seção 5, apresenta-se a conclusão do trabalho.

2. Revisão Literária

Técnicas computacionais para alocação de capacitores em sistemas de distribuição têm sido extensivamente pesquisadas, utilizando diversas técnicas. A determinação do local ótimo de instalação de bancos de capacitores corresponde a um problema de programação matemática combinatória – otimização sobre a qual diversas pesquisas têm sido elaboradas, e as quais usam os mais variados métodos de solução.

Em virtude de sua importância para os estudos de planejamento de redes, o problema de alocação de capacitores vem sendo estudado por muitas décadas, Neagle e Samson em (Neagle et al., 1956) assumem a carga uniformemente distribuída ao longo do alimentador para a determinação da localização ótima do capacitor. Cook em (Cook, 1959) também analisou a aplicação de bancos de capacitores fixos a uma carga uniformemente distribuída. Métodos analíticos para alocação de capacitores foram também apresentados por Bae (Bae, 1978), que reavaliou o trabalho de Neagle e Samson (Neagle et al., 1956) com a investigação do uso de capacitores sob uma grande gama de condições de carga reativa. Grainger e Lee em (Grainger et al., 1982) observaram que trabalhos prévios eram baseados em algumas considerações restritivas tais como casos de distribuição especial de cargas, e a utilização de comprimentos de cabos uniformes nos estudos dos alimentadores. Baran e Wu no trabalho (Baran et al., 1989) formulam o modelo como um problema de programação não linear inteira mista, sendo que o

método de solução é dividido em dois níveis. Para a solução, os custos dos bancos de capacitores são aproximados por uma função linear e a carga considerada fixa.

A partir dos anos 90 foram desenvolvidas diversas pesquisas utilizando Inteligência Artificial, em particular, Algoritmos Genéticos, Simulação de Resfriamento (Simulated Annealing), Sistemas Especialistas, Redes Neurais Artificiais e Teoria de Conjuntos Fuzzy. Chiang em (Chiang et al.,1990) desenvolveu uma formulação levando em consideração aspectos práticos dos capacitores, restrições de operação e de carga, utilizando simulação de resfriamento para determinar os pontos de instalação de capacitores, bem como seus tipos e tamanhos. No trabalho (Chin et al., 1994) é apresentada uma aproximação baseada em fuzzy para alocação de capacitores em um circuito de distribuição. Duas funções de pertinência são definidas para a sensibilidade de tensão e para as perdas de potência ativa. Chang em (Chang et al., 2000) apresenta uma solução baseada em Busca tabu, onde o cálculo dos lucros ótimos devido à alocação de capacitores em um sistema de distribuição é desenvolvido utilizando essa técnica. No trabalho (Milosevic *et al*.,2004) é apresentada uma formulação baseada na utilização de algoritmos genéticos e, em (Kim *et al*.,2003) estudam-se métodos híbridos envolvendo programação matemática e heurísticas.

Neste trabalho propõe-se um modelo PLIM que realiza a determinação do ponto de instalação do banco de capacitores e o valor de cada unidade proposta. Para a validação da solução é realizado um cálculo do fluxo de potência no próprio modelo, tendo como saída os valores finais de tensão em cada ponto da rede. Uma proposta para fluxo de potência voltado para a rede de média tensão em um modelo PLIM é mostrado em (Lara et al., 2009). O fluxo de potência adotado é o de corrente constante, considerando os valores de carga por fase. No caso da corrente constante, esta permanece constante, mesmo que a tensão mude. A potência é elevada com a tensão. Se a tensão decai, a corrente drenada continua constante, diminuindo-se a potência e não alterando a queda de tensão. Considerar a modelagem de todas as cargas como sendo de corrente constante é uma boa aproximação para os alimentadores com cargas predominantes residenciais e comerciais (Strauch, 2002).

3. Modelagem Proposta

Dado um alimentador, a alocação de capacitores consiste em indicar a localização e a capacidade de bancos de capacitores a serem instalados na rede. Tal solução deve ser aquela que contemple objetivos como: controle adequado do perfil de tensão e minimização de custos de investimentos na aquisição e instalação de capacitores. A formulação considera a topologia do alimentador e, através do fluxo de potência backwad-forward utilizando o modelo de corrente constante, faz-se a determinação dos valores de tensão em p.u. em cada ponto da rede.

Consideram-se as seguintes premissas:

1. A rede em análise é radial;
2. Cada ponto de conexão entre os cabos da rede são pontos candidatos a receberem bancos de capacitores;
3. Cada ponto de conexão entre os cabos só pode receber um tipo de banco de capacitor;
4. É considerada a carga individual por fase, sendo o cálculo trifásico determinando-se os valores de corrente e queda de tensão por fase;
5. A solução é relaxada para que, no caso do não atendimento da restrição de tensão, será fornecido à melhor solução possível.

3.1 Função Objetivo

O objetivo, dado pela equação 1, procura minimizar o valor da instalação de capacitores na rede, bem como os valores de penalização por extrapolar requisito de nível de tensão.

$$Min \sum_{i\,\epsilon Postes} \sum_{j\epsilon Capacitores} \{CiCap_{ij} \times CapP_{ij}\} + \frac{TensMinAjus}{10} + \frac{ExtTensx}{0.001} \qquad (1)$$

Conjuntos

· Postes	{1..np}	Postes
· Fase	{1..3}	Fases A, B e C
· Capacitores		Capacitores padrões

Parâmetros

· $DemAtivPos_{if}$	Demanda ativa no poste *i*, na fase *f* (kW)
· $DemReatPos_{if}$	Demanda reativa no poste *i*, na fase *f* (kVar)
· $CiCap_{ij}$	Custo de instalação do capacitor no poste *i* do tipo *j*
· $ResistCabo_{ij}$	Resistência do cabo instalado entres os postes *i* e *j* (Ω)
· $ReatnCabo_{ij}$	Reatância do cabo instalado entres os postes *i* e *j* (Ω)
· $Prox_j$	Ligação entre os postes, índice do poste que é fonte do poste *j*
· $CrPsRealF_{if}$	Corrente parte real do poste *i* na fase *f*
· $CrPsImgF_{if}$	Corrente parte imaginária do poste *i* na fase *f*
· $CrAcRealF_{if}$	Corrente acumulada parte real do poste *i* na fase *f*
· $CrAcImgF_{if}$	Corrente acumulada parte imaginária do poste *i* na fase *f*
· $QtPuF_{ifc}$	Queda de tensão no poste *i* na fase *f* com o condutor *c*
· $QtPuFinalF_{if}$	Queda de tensão final no poste *i* na fase *f*
· $TensFinalF_{if}$	Tensão final no poste *i* na fase *f*
· ZBase	Impedância base
· SBase	Potência base

Variáveis

· $CapP_{ij}$	$\in \{0,1\}$	Capacitor proposto no postes *i* do tipo *j*
· $TensMinAjus$	$\geq 0, \leq 1$	Tensão ajustada
· $ExtTens$	$\geq 0, \leq 1$	Extrapolação da tensão obtida.

3.2 Restrições

i) Cada trecho deve ter apenas um tipo de capacitor adotado:

$$\sum_{i\,\epsilon Postes} \sum_{j\,\epsilon Capacitores} CapP_{ij} <= 1 \qquad \forall i \in Postes, \forall j \in Capacitores$$

ii) Tensão mínima nos pontos da rede:

É realizado o cálculo de fluxo de potência, modelo corrente constante, baseado em uma iteração do método backward-forward sweep.

a) Calcula-se inicialmente a corrente parte real de cada poste:

$$CrPsRealF_{if} = {1000 * DemAtivPos_{if}}/{SBase}$$

$$\forall i \in Postes, \forall f \in Fase$$

b) Calcula-se a corrente parte imaginária de cada poste:

$$CrPsImgF_{if} = {1000 * DemReatPos_{if}}/{SBase} - \sum_{j \in Capacitores} CapP_{ij} \times {PotC_j}/{SBase}$$

$\forall i \in Postes, \forall f \in Fase, \forall j \in$ Capacitores

c) Calcula-se a corrente acumulada parte real em cada poste:

$$CrAcRealF_{if} = CrPsRealF_{if} + \sum_{j} CrAcRealF_{ij}$$

$$\forall i \in Postes, \forall f \in Fase, \forall j \in Poste \,|Prox_j = i$$

d) Calcula-se a corrente acumulada parte imaginária em cada poste:

$$CrAcImgF_{if} = CrPsImgF_{if} + \sum_{j} CrAcImgF_{ij}$$

$$\forall i \in Postes, \forall f \in Fase, \forall j \in Poste \,|Prox_j = i$$

e) Queda de tensão em cada poste:

$$QtPuF_{ifc} = \left(CrAcRealF_{if} \times \frac{ResistCabo_{ij}}{ZBase}\right) + \left(CrAcImgF_{if} \times \frac{ReatnCabo_{ij}}{ZBase}\right)$$

$$\forall i \in Postes, \forall f \in Fase, \forall c \in Cond, \forall j \in Poste \,|j = Prox_i$$

f) Queda de tensão relativa para cada poste:

$$QtPuFinalF_{if} = QtPuFinalF_{jf} + \sum_{c \in Cond} QtPuF_{if}$$

$$\forall i \in Postes, \forall f \in Fase, \forall j \in Poste \,|j = Prox_i$$

g) Tensão final em cada poste:

$$TensFinalF_{if} = 1 - QtPuFinalF_{if}$$

$$\forall i \in Postes, \forall f \in Fase$$

Tensão final calculada deve ser superior ao valor passado como referência do estudo, permitindo o relaxamento com a variável de extrapolação do nível de tensão.

$$TensFinalF_{if} \geq TensMinAjus \;\; \forall i \in Postes, \forall f \in Fase$$

$$TensMinAjus + ExtTens \geq TensMin$$

4. Resultados

A validação dos modelos propostos foi realizada por meio de estudos de caso sendo apresentado um caso simples para compreensão dos resultados obtidos. O modelo matemático foi desenvolvido para ser executado no solver livre GNU LP/MILP Solver Kit (GLPK). O alimentador em análise é apresentado na figura 1 e sua distribuição de carga nas barras é mostrada conforme tabela 1. Procura-se estabelecer o valor mínimo de tensão de 0,97 p.u. para ilustrar a utilização do modelo proposto.

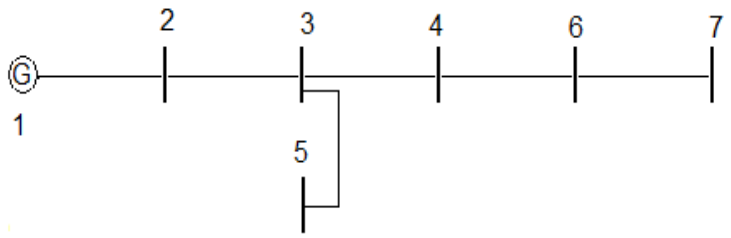

Figura 1 - Topologia da rede analisada

Tabela 1: Cargas instaladas nas barras

Barra	Cargas (kVA/Fase)		
	A	B	C
1	0 + j 0	0 + j 0	0 + j 0
2	0 + j 0	0 + j 0	0 + j 0
3	165,25+ j 13,11	0 + j 0	165,25+ j 13,11
4	0 + j 0	110,5+ j 13,11	110,5+ j 13,11
5	0 + j 0	0 + j 0	55,25+ j 13,11
6	130,29 + j 20,38	130,29 + j 20,38	0 + j 0
7	0 + j 0	55,25 + j 20,38	55,25 + j 20,38

Na tabela 2 é possível observar os valores de para a instalação de bancos de capacitores.

Tabela 2- Custos de Capacitores

Descrição	Custo Instalação (R$)
300 kVar	3070
600 kVar	3500
900 kVar	5600

1200 kVar	8200
1500 kVar	10200
1800 kVar	12000

O menor valor de tensão no sistema é de 0,91 p.u., realizando diversas simulações considerando um aumento nas restrições dos valores finais de tensão chega-se a tabela 3.

Tabela 3- Simulações realizadas

Menor Tensão Proposta (p.u.)	Menor Tensão Obtida (p.u.)	Pontos Selecionados / Capacitores	Custo Instalação (R$)
0.91	0,910	Nenhum	0,00
0,92	0,920	Ponto 2 / 300 kVar	3078.21
0,94	0,942	Ponto 7 / 600 kVar	3500,00
0,96	0,961	Ponto 7 / 1200 kVar	8200,00
0,98	0,980	Pontos 4, 5 e 6 / 600 kVar	10500,00

Pode-se constatar que à medida que os valores de tensão apresentam-se mais severos, a intervenção de capacitores situa-se em pontos mais distantes da fonte de saída do sistema em estudo. Isso acontece em virtude de que os menores valores de tensão, em geral, situam-se em pontos mais distantes da fonte. Na situação mais severa, observa-se que a intervenção no ponto 6 não foi suficiente, tendo que ser necessário a inclusão de capacitores nos pontos 4 e 5.

5. Conclusões

No presente artigo foi desenvolvido um modelo matemático PLIM que aborda o problema do planejamento de média tensão referente à atividade de alocação de banco de capacitores. O modelo permite minimizar os custos de investimentos além dos custos de violação do não atendimento do valor de tensão especificado. Para validar as alternativas propostas pelo modelo foi incluído um cálculo de fluxo de potência no próprio modelo para determinar o valor da tensão com a adoção da alocação dos bancos de capacitores.

Os testes realizados demonstraram que simulações exigindo índices muito rigorosos, nos alimentadores com um elevado número de trechos e transformadores, apresentam custo computacional elevado, demonstrando o aumento progressivo da complexidade do problema combinatório. Os estudos de caso demonstraram a validade da formulação adotada, apresentando desvios considerados adequados para atender o propósito do modelo.

Referências

Bae, Y. G. Analytical Methods of Capacitor Allocation on Distribution Primary Feeders, *ITPAS*, vol. PAS–97, no. 4, pp. 1232–1238, Jul./Ago. 1978.

Baran, M. E. e Wu, F. F. Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems, *ITPD*, vol. 4, no. 1, pp. 725–734, Jan. 1989.

Chang, C.S. e Lern, L. P. Application of Tabu Search Strategy in Solving Non-Differentiable Savings Function for the Calculation of Optimum Savings Due to Shunt Capacitor Installation in a Radial Distribution System, *Power Engineering Society Winter Meeting*, *2000. IEEE*, vol.

4, pp. 2323–2328, 23–27 Jan. 2000.

Chiang H.-D., Wang J.-C., Cockings O. e Shin H.-D. Optimal Capacitor Placements in Distribution Systems: Part I: A New Formulation and the Overall Problem, *ITPD*, vol. 5, no. 2, pp. 634–642, April 1990.

Chin, H. e Lin, W. Capacitor Placement for Distribution Systems with Fuzzy Algorithm, *Proceedings of 1994 IEEE Region 10's Ninth Annual International Conference*, vol. 2, pp. 1025–1029, 1994.

Cook, R. F. Analysis of Capacitor Application by Load Cycle, *AIEET*, vol. PAS–78, pp. 950–957, Out. 1959.

Grainger J. J., Lee S. H. e El-Kib A. A. Design of a Real-Time Switching Control Scheme for Capacitive Compensation of Distribution Feeders, *ITPAS*, vol. PAS– 101, no. 8, pp. 2420–2428, Ago. 1982.

Kim. S. N., You. S. K., Kim, K. H. e Rhee S. B. Application of esga hybrid approach for voltage profile improvement by capacitor placement, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 18, pp. 1865-1872, 2003.

Lara, L.G.; **Arruda, L.V.R.; Neves-Jr, F.** (2009) Modelo PLIM com fluxo de potência linear para troca de condutores em redes de energia elétrica. *Anais do XLI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, pp. 3375-3382.

Milosevic, B. e Begovic, M., Capacitor placement for conservative voltage reduction on distribution feeders, *IEEE Transactions on Power. Delivery*, Vol. 19, No. 3, pp. 1360 – 1367, Jul. 2004.

Neagle, N. M. e Samson, D. R. Loss Reduction From Capacitors installed on Primary Feeders, *IEEET*, vol. PAS–75, part III, pp. 950–959, 1956.

Strauch, M. T., (2002) Desenvolvimento de Metodologia de Cálculo de Perdas Elétricas em Redes de Distribuição de Baixa Tensão, *Dissertação de Mestrado*, Universidade Salvador.