

# Locação automática de capacitores estáticos em redes

Egon Palma da Rosa

*A finalidade deste trabalho é apresentar um Processo de otimização quanto a locação e quantidade de capacitores em redes, regulando as tensões em todas as barras, operacionalizado por meio de computador*

## 1. OBJETIVO

O escopo deste trabalho é apresentar um processo para determinar o local de instalação e a quantidade ótima de capacitores em redes, com o objetivo de regular as tensões em todas as barras da rede, ou seja, definido um intervalo para as tensões nas barras, o método loca os capacitores de modo que as tensões em todas as barras situem-se dentro deste intervalo. O processo de locação automática é feito através de um programa de computador para este fim.

## 2. GENERALIDADES

Escolher os locais para os bancos de capacitores em uma rede é um problema que os engenheiros de planejamento enfrentam com frequência.

Devido a configuração das redes é impossível prever por simples inspeção do sistema as quantidades e localizações dos capacitores estáticos requeridos para elevar a tensão acima de um certo mínimo. No passado, tentativas tinham sido as técnicas usadas, contando com experiências passadas combinadas com estudos completos de fluxo de carga, para verificar se o resultado desejado poderia ser alcançado. Obter uma solução desta maneira é cara, consome tempo e provavelmente não é a mais econômica.

Muitos métodos computacionais têm sido apresentados recentemente para locação automática de capacitores, um deles, por exemplo, proposto por Maliszewski (1), resolve o problema usando a combinação de programação linear e fluxo de carga, supondo que os capacitores possam gerar qualquer quantidade de quilovars. A grande desvantagem deste método é que o valor dos reativos capacitivos fornecidos como resposta do processamento não é padronizado, ou seja, haverá necessidade de uma aproximação para um valor de capacitor comercializado o que poderá acarretar um valor de tensão não desejado para a barra em que será instalado este capacitor, ou também, poderão surgir valores de tensões indesejáveis nas outras barras da rede.

Outro método para a locação de capacitores, proposto por Pretelt (2), reduz a um mínimo a tentativa e o erro, elimina múltiplos estudos de fluxo de carga e loca capacitores de tamanhos padronizados. Os bancos são locados com apenas uma unidade de cada vez a fim de que a representação linear do sistema seja adequada, desde que os distúrbios provocados por essa unidade sejam muito pequenos. Iterações parciais são usadas em lugar de completos fluxos de carga para melhorar a exatidão com um pequeno sacrifício de tempo computacional.

Um fluxograma geral para a locação de capacitores é apresentado na figura 2.1.

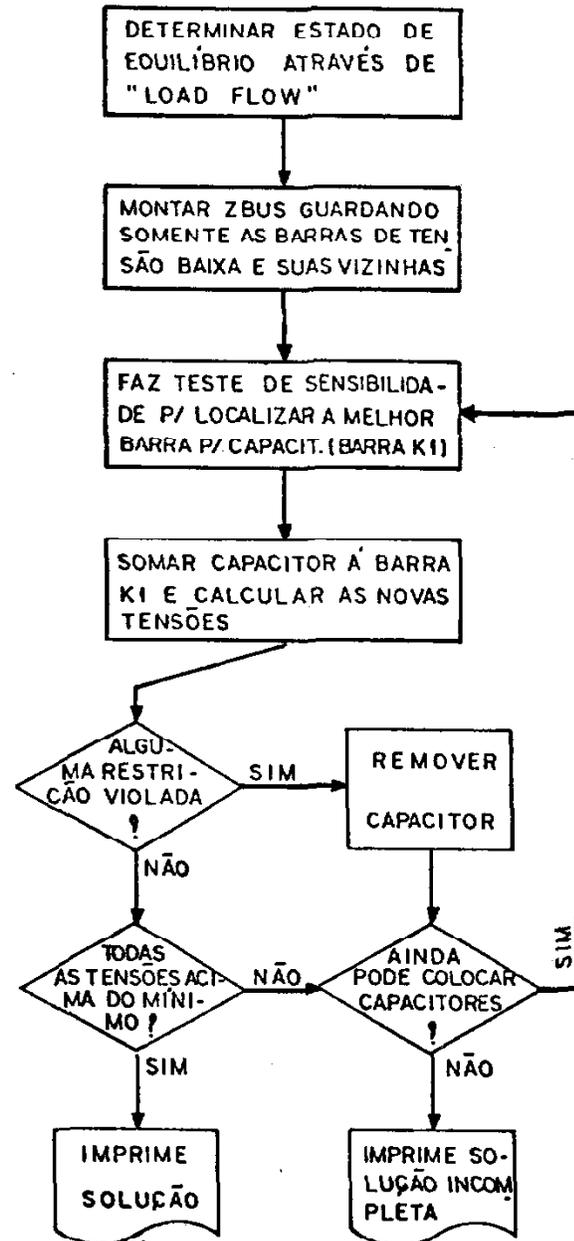


Figura 2.1. — Lógica Geral de Locação de Capacitor

### 3. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

É desejado encontrar um mínimo valor de capacitância para a rede tal que o valor da tensão em cada barra, situe-se entre um mínimo e um máximo previamente especificados. Estes valores de capacitância são limitados e obedecem as seguintes restrições:

1.) A quantidade de reativos capacitivos acrescentados à uma determinada barra, deve ser menor ou igual ao limite máximo de reativos permitido nessa barra.

2.) A soma dos reativos capacitivos acrescentados à rede deve ser menor ou igual ao limite máximo de reativos capacitivos permitido na rede.

3.) As tensões em todas as barras devem estar entre um determinado máximo e um mínimo após a adição dos capacitores.

4.) A total elevação de tensão em uma determinada barra devido ao capacitor conectado a essa barra não deve exceder a 5,0%.

A restrição (4) é para evitar problemas de chaveamento em operações normais; para emergências esta restrição pode ser aumentada.

### 4. MODELO DO SISTEMA

A análise do sistema é baseada na matriz de impedâncias nodais, tomando a barra swing como sendo a barra de referência. O método para a análise da rede é o método de Gauss-Seidel, descrito sucintamente como se segue.

A equação que descreve o estado de equilíbrio de uma rede é:

$$\bar{E}_{BUS} = Z_{BUS} \bar{I}_{BUS} \quad (4.1)$$

Tomando a barra "swing" como a barra de referência temos:

$$\bar{E}_{BUS} = Z_{BUS} \bar{I}_{BUS} + E_R \quad (4.2)$$

onde

$E_R$  — é a tensão da barra de referência

As equações das tensões nas barras (4,2) são resolvidas uma a uma, na ordem fixada pela codificação das barras. Depois que cada equação foi resolvida e que se obteve uma nova estimativa para a queda de tensão nas diversas barras, recalcula-se a correspondente.

A equação para uma rede qualquer será:

$$E_p^{k+1} = E_R + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq R}}^{p-1} Z_{pq} I_q^{k+1} + \sum_{\substack{q=p \\ q \neq R}}^n Z_{pq} I_q^k \quad (4.3)$$

onde

$p = 1, 2, 3, \dots, n$

$n = n^\circ$  de barras da rede

$R = n^\circ$  da barra de referência (barra swing)

$I_q^{k+1}$  é calculado, partindo-se da equação de potência na barra:

$$P_q - jQ_q = E_q^* I_q \quad (4.4)$$

Sendo  $I_q$  positivo, se estiver entrando no sistema.

Quando é formulada a equação para a rede, se os elementos shunt com respeito à terra se incluem na matriz paramétrica, a equação (4.4) fornece a corrente total na barra. Por outro lado se os elementos shunt não estiverem incluídos na matriz paramétrica, a corrente total na barra  $q$  será:

$$I_q = \frac{P_q - jQ_q}{E_q^*} - Y_q E_q$$

logo  $I_q^{k+1}$  será:

$$I_q^{k+1} = \frac{P_q - jQ_q}{(E_q^{k+1})^*} - Y_q E_q^{k+1}$$

onde

$Y_q$  — é a admitância shunt total na barra

$qE_q$  — é a corrente shunt fluindo na barra  $q$  para a terra.

### 5. SELEÇÃO DA BARRA

Selecionar a barra do sistema na qual o capacitor deverá ser introduzido, requer um critério que ditará a escolha.

Desde que o propósito de introduzir capacitor é para elevar o nível de tensão, um critério seguro seria o de definir como sendo a melhor barra, aquela em que quando um capacitor teste é adicionado a esta barra, cause uma elevação de tensão em todas as barras com tensão baixa. Quando acrescentado tal capacitor (ΔQ) na barra  $q$ , a expressão para a potência torna-se:

(5.1)

$$P_q - jQ_q + j\Delta Q_q = (E_q^* + \Delta E_q^*) (I_q + \Delta I_q)$$

Assumindo ΔQ como sendo muito pequeno de tal forma que ΔE<sub>q</sub> seja desprezível, temos:

(5.2)

$$P_q - jQ_q + j\Delta Q_q = E_q^* (I_q + \Delta I_q)$$

Portanto

$$j\Delta Q = E_q^* \Delta I_q$$

ou

$$\Delta I_q = \frac{j\Delta Q_q}{E_q^*} \quad (5.3)$$

Esta corrente injetada na barra "q" causará uma mudança na tensão em todas as outras barras que pode ser aproximada pela equação:

$$\Delta \bar{E}_{BUS} = \bar{Z}_{BUS} \Delta \bar{I}_{BUS} \quad (5.4)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta E_1 \\ \vdots \\ \Delta E_q \\ \vdots \\ \Delta E_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_{1,1} & \dots & z_{1,q} & \dots & z_{1,n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ z_{q,1} & \dots & z_{q,q} & \dots & z_{q,n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ z_{n,1} & \dots & z_{n,q} & \dots & z_{n,n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ \Delta I_q \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

ou

$$\Delta E_i = z_{i,q} \Delta I_q = z_{i,q} \left( \frac{j\Delta Q_q}{E_q^*} \right)$$

A medida de sensibilidade pode agora ser associada a cada barra, definida como a soma das mudanças na tensão de todas as barras com tensão baixa:

$$ZTES(q) = \sum \Delta E_i = \sum z_{i,q} \left( \frac{j\Delta Q_q}{E_q^*} \right)$$

Onde a soma é para ser feita sobre todas as barras com tensão baixa.

Note que esta medida de sensibilidade é dinâmica, desde que o número de barras com tensão baixa decresça à medida que capacitores são incluídos no sistema. Para todo perfil de tensão, o teste é realizado e a barra com o mais alto ZTES é escolhida para a próxima inclusão de capacitores. Essa barra é referenciada como a barra NBS pelo programa. Entretanto, nem todas as barras são escolhidas por este teste de sensibilidade. A medida que o programa avança, barras são marcadas por IMP (barras em que não se pode localizar capacitores e/ou mais capacitores).

A marca IMP em uma barra mostra que alguma restrição foi violada. Inicialmente todas as barras são elegíveis exceção feita àquelas que não se quer considerar, ou seja, tomando o reativo capacitivo permitido na barra menor que a unidade padrão adotada.

Este método de selecionar barras otimiza o uso de capacitores estáticos numa forma dinâmica, convergindo à solução que fornece um valor de tensão adequada com a mínima quantidade de capacitores instalados.

## 6. CORREÇÃO DO NÍVEL DE TENSÃO

Uma vez escolhida a barra mais sensível, uma unidade capacitiva é incorporada a ela. Esta unidade é de tamanho discreto de acordo com os padrões comercializados.

O sistema está em equilíbrio antes da inclusão dos capacitores. Da solução do fluxo de carga todas as tensões são conhecidas. A tensão de referência (barra swing), permanecerá constante, independentemente das mudanças de tensão causadas pelos capacitores.

É feita a inclusão da unidade capacitiva à barra NBS e novamente é rodado o fluxo de carga. Após a determinação do novo nível de tensão, todas as barras serão testadas pelas restrições 3 e 4.

Se qualquer uma das duas restrições é violada a unidade capacitiva que foi acrescentada por último é removida do sistema e as condições anteriores à sua adição retornam. A barra NBS é marcada com IMP e uma nova pesquisa da barra ótima é iniciada.

Quando as restrições 3 e 4 são satisfeitas, o limite mínimo de tensão é verificado, se todas as barras tem uma tensão igual ou maior do que um mínimo especificado, o problema está resolvido e a solução é impressa. Se uma ou mais barras estão ainda abaixo de uma tensão mínima uma nova rotina de instalação de capacitores é iniciada.

Se uma ou mais barras ficam com suas tensões abaixo do limite mínimo, e apenas uma delas pode ser selecionada, se na inclusão da unidade capacitiva alguma restrição é violada, o problema é resolvido selecionando uma barra cuja tensão não esteja acima do limite máximo de tensão permitida, ou seja, poderá ser selecionada uma barra na qual sua tensão já esteja dentro dos limites de regulação, obviamente esta barra não pode ter sido selecionada anteriormente, pois alguma restrição deve ter sido violada.

## 7. CONCLUSÕES

○ método apresentado neste trabalho, seleciona automaticamente uma das soluções mais econômicas para o problema de locação de bancos de capacitores em redes, visando o problema de regulação da tensão.

○ uso de uma medida dinâmica de sensibilidade para selecionar barras com o propósito de incluir capacitores a estas barras, substitue as pesquisas randômicas de locação de capacitores através de um sistemático estudo da topologia da rede combinado com análise do perfil de tensão.

## 8. BIBLIOGRAFIA

1. Maliszewski, Raymond M., "Linear Programming as an Aid in Planning Kilovar Requirements", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems. Vol. PAS — 87 n° 12, pp. 1963 — 1968, Dezembro/1968.
2. Pretelt, A.M., "Automatic Allocation of Network Capacitors", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems. Vol. PAS — 90, n° 1 Janeiro/Fevereiro/1971.
3. Rosa, Egon P., "Locação de Bancos de Capacitores em Redes de Sub-Transmissão", dissertação de mestrado apresentada a E.P.U.S.P./1980.