

## 4 Chaveamento Automático de Banco de Capacitores

### 4.1 Introdução

Problemas relacionados com a incapacidade do sistema em manter as tensões nas barras em níveis seguros de operação após um distúrbio tornaram-se mais freqüentes.

Capacitores e reatores *shunt* são permanentemente conectados à rede ou ligados e desligados de acordo com as condições de operação do sistema.

A potência reativa fornecida por bancos de capacitores ou reatores é função do quadrado da tensão terminal do equipamento e, portanto, varia durante a operação do sistema.

O objetivo deste capítulo é representar o chaveamento automático de compensação *shunt* variável, através da inclusão de uma equação de controle adicional à matriz Jacobiana, onde a susceptância *shunt* é considerada uma nova variável dependente, no cálculo dos índices de avaliação das condições de estabilidade de tensão [Passos Filho, J.A., Martins, N., Ferraz, J.C.R., Falcão, D.M., Pinto, H.J.C., 2002].

### 4.2 Modelo Matemático

Uma representação flexível dos controles na resolução do problema do fluxo de potência é obtida acrescentando-se ao sistema original de equações linearizadas utilizadas pelo método de Newton, as equações que descrevem a ação de cada controle e a variável controlada associada [Passos Filho, J.A., Martins, N., Zambroni de Souza, A.C., Ferreira, L.C.A., 2003]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \dots \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} & \dots & \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} & \dots & \frac{\partial Q}{\partial x} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial y}{\partial \theta} & \frac{\partial y}{\partial V} & \dots & \frac{\partial y}{\partial x} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \dots \\ \Delta x \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Para uma barra genérica k:

$$\Delta P_k = P_k^{\text{esp}} - P_k^{\text{calc}} \quad (4.2)$$

$$\Delta Q_k = Q_k^{\text{esp}} - Q_k^{\text{calc}} \quad (4.3)$$

$$P_k^{\text{calc}} = G_{kk} \cdot V_k^2 + V_k \cdot \sum_{m=1 \neq k}^n V_m \cdot (G_{km} \cdot \cos \theta_{km} + B_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km}) \quad (4.4)$$

$$Q_k^{\text{calc}} = -B_{kk} \cdot V_k^2 + V_k \cdot \sum_{m=1 \neq k}^n V_m \cdot (G_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \cdot \cos \theta_{km}) \quad (4.5)$$

Para a representação do elemento *shunt* chaveável no problema de fluxo de potência, considera-se sua susceptância como uma variável dependente adicional ao problema. Para tornar o sistema de equações possível e determinado, insere-se uma nova equação relativa ao controle de tensão. A formulação utiliza um sistema de equações lineares aumentado, a fim de representar as relações entre a ação de controle e as variáveis controladas. A estrutura da matriz Jacobiana do fluxo de potência é preservada.

É importante destacar que, neste tipo de dispositivo, o controle de tensão é feito através de uma faixa de tensão e não de um valor fixo. Desta forma, a estrutura de controle somente faz parte do processo de solução quando o valor atual da tensão controlada estiver fora de sua região de controle.

Para uma barra m cuja tensão deve ser controlada através do chaveamento de dispositivos *shunt* localizados na barra k, onde a variável de controle é a susceptância *shunt*, tem-se em (4.1):

$$\Delta x = \Delta b_k^{\text{sh}} \quad (4.6)$$

Também em (4.1), o erro da equação é dado por:

$$\Delta y = \Delta V_m = V_m^{\text{esp}} - V_m^{\text{calc}} \quad (4.7)$$

e a convergência do algoritmo é obtida quando o erro torna-se menor que uma determinada tolerância.

O sistema de equações linearizadas (4.1) fica:

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \vdots \\ \Delta P_m \\ \Delta Q_m \\ \vdots \\ \Delta V_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots \\ \cdots & H_{kk} & N_{kk} & \cdots & H_{km} & N_{km} & \cdots & 0 & \vdots \\ \cdots & J_{kk} & L_{kk} & \cdots & J_{km} & L_{km} & \cdots & a & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ \cdots & H_{mk} & N_{mk} & \cdots & H_{mm} & N_{mm} & \cdots & 0 & \vdots \\ \cdots & J_{mk} & L_{mk} & \cdots & J_{mm} & L_{mm} & \cdots & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & b & \cdots & 0 & \Delta b_k^{sh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta \theta_k \\ \Delta V_k \\ \vdots \\ \Delta \theta_m \\ \Delta V_m \\ \vdots \\ \Delta b_k^{sh} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

onde:

$$\begin{bmatrix} H_{ij} & N_{ij} \\ J_{ij} & L_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} & \frac{\partial P_i}{\partial V_j} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$a = \frac{\partial Q_k}{\partial b_k^{sh}} = -V_k^2 \quad (4.10)$$

$$b = \frac{\partial V_k}{\partial V_k} = 1 \quad (4.11)$$

A variável dependente acrescida ao sistema original é atualizada, numa iteração genérica (h+1), da forma seguinte:

$$b_k^{sh(h+1)} = b_k^{sh(h)} + \Delta b_k^{sh(h)} \quad (4.12)$$

No caso do chaveamento feito através dos bancos de capacitores fixos, e que corresponde ao caso real, a tensão na barra controlada apresenta valores ligeiramente fora da faixa operativa normal (p.ex. entre 0,95 e 1,05 pu). Isto acontece pelo fato dos capacitores inseridos serem de tamanho fixo e torna-se mais evidente com a proximidade do ponto de carregamento máximo, onde a sensibilidade de tensão em relação à injeção de potência reativa é maior. Pode-se conseguir que a tensão fique rigorosamente dentro da faixa com o chaveamento feito através de bancos de capacitores de tamanho variável.

A tolerância de tensão adotada no critério de convergência para as equações de controle pode absorver estes desvios de valores.

### 4.3 Implementação Computacional

#### 4.3.1 Cálculo da Potência Injetada e das Matrizes A, B, C, D

O carregamento da rede de transmissão é representado por condições nodais associadas ao máximo fluxo de potência ativa e reativa que pode ser transmitida dos geradores para as cargas e avaliado através de uma ferramenta analítica. A consistência do índice de carregamento da rede de transmissão obtido através desta ferramenta é dependente da configuração da matriz Jacobiana, devendo por isso ser criteriosa a forma de inclusão dos controles e limites relacionados com a tensão caso for necessário. O controle de tensão influi diretamente nas condições de operação e, portanto deve ser incluído na modelagem do problema. Os controles são restritos pelos limites de injeção de potência reativa e limites de tensão.

Neste tipo de controle por faixa de tensão através de banco de capacitores chaveáveis, não é necessário incluir as linhas e colunas correspondentes às equações de controle de tensão na matriz Jacobiana para calcular os índices de avaliação do carregamento da rede, tal qual mostra-se em (4.13). Isso por que o controle está presente no algoritmo de fluxo de carga somente quando se atinge o limite inferior de tensão. Uma vez que a tensão de referência é atingida e o novo capacitor é determinado, retira-se as equações de controle, p. ex. para o cálculo de outro ponto de operação após um aumento de carga. Em outras palavras, como os índices de estabilidade de tensão são calculados em pontos de operação (após convergência do algoritmo de fluxo de carga), e nesses pontos o banco de capacitores é fixo é a tensão variável, não há por que incluir o mecanismo matemático (equações durante a convergência do algoritmo) que determinou o tamanho do banco de capacitores. Em (4.13), a matriz Jacobiana pode ser convenientemente particionada para o cálculo dos índices de estabilidade de tensão (ver Seção 2.5) nas sub-matrizes A, B, C, D destacando-se as equações referentes ao balanço de potência ativa e reativa na barra em análise.

$$\begin{bmatrix} \Delta P' \\ \Delta Q' \\ \dots \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & \vdots & B \\ \dots & \dots & \dots \\ C & \vdots & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta' \\ \Delta V' \\ \dots \\ \Delta \theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

No caso de controle de tensão por outros dispositivos, como por geradores, LTCs e compensadores, o procedimento é [Prada, R.B., Seelig, B.H.T., dos Santos, J.O.R., Bianco, A., Pilotto, L.A.S., 2002]:

- quando a barra em análise não é uma barra de tensão controlada, os índices de segurança de tensão nessa barra são calculados considerando-se as equações de controle de tensão das outras barras.
- quando a barra em análise é uma barra de tensão controlada, os índices de segurança de tensão nessa barra são calculados simplesmente tirando-se o controle de tensão nessa barra e mantendo-se o controle nas outras barras.

Esse procedimento é justificado através da análise da Figura 4.1. Tem-se uma barra com controle de tensão em um valor fixo  $V_2=1,0$  pu. Se os índices de avaliação das condições de segurança de tensão para a barra 2 são calculados considerando-se o controle existente de tensão nesta barra, os resultados refletem o estudo de variações infinitesimais da carga na barra 2 com a tensão fixa. Na figura isso corresponderia a variações paralelas ao eixo horizontal em torno dos pontos de operação A, B e C. Não seria uma informação relevante. É muito mais importante determinar qual seria a região de operação caso o controle de tensão deixasse de existir, p.ex. devido aos limites do equipamento controlador. Então, é preciso retirar o controle de tensão para cálculo dos índices e, assim, determinar se o ponto de operação pertence à região superior (como o ponto de operação A), à fronteira (ponto C) ou à região inferior (ponto B).

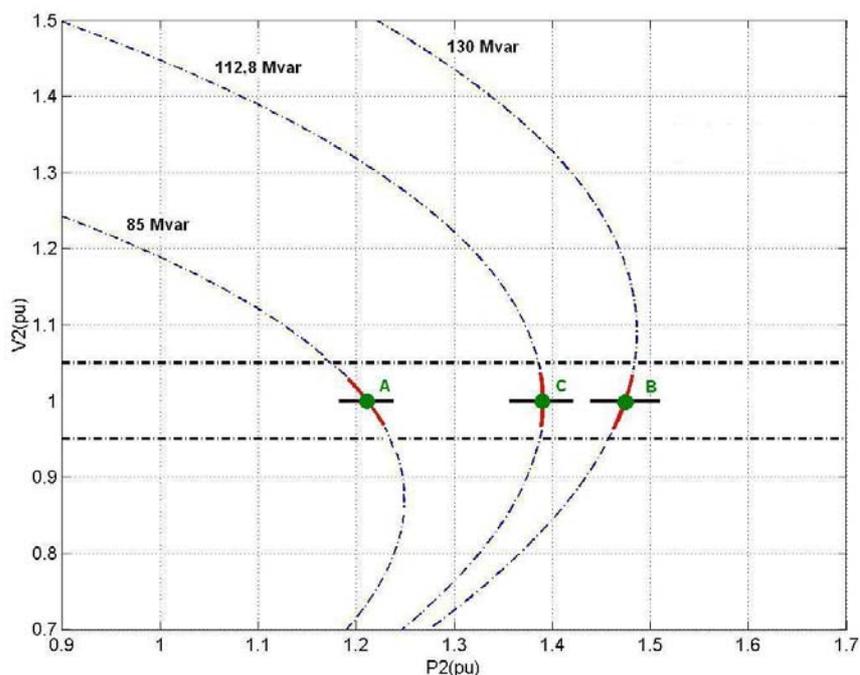


Figura 4.1 - Barra com Controle de Tensão em um Valor Fixo

## 4.4 Resultados

### 4.4.1 Sistema do Exemplo

Com o sistema cujo diagrama unifilar é mostrado na Figura 4.2, simulou-se variações de carga com fator de potência unitário constante. O tamanho dos bancos de capacitores varia de um teste para outro.

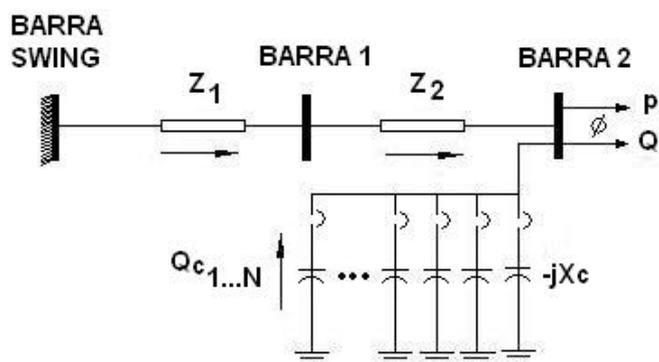


Figura 4.2 - Sistema de 3 Barras com Chaveamento de Capacitores na Barra 2

Os valores das impedâncias de linha usados neste exemplo numérico são:

$$Z_1 = 0,2 \angle 70^\circ \text{ pu}$$

$$Z_2 = 0,2 \angle 70^\circ \text{ pu}$$

#### 4.4.2 Chaveamento dos Capacitores

As curvas pontilhadas na Figura 4.3 são as curvas PxV para fator de potência constante. O fator de potência da carga é constante (unitário), mas a rede de transmissão varia com a conexão de sucessivos capacitores. Um outro raciocínio seria considerar o capacitor como parte da carga e, então, o conjunto teria fator de potência variável com a conexão sucessiva de capacitores.

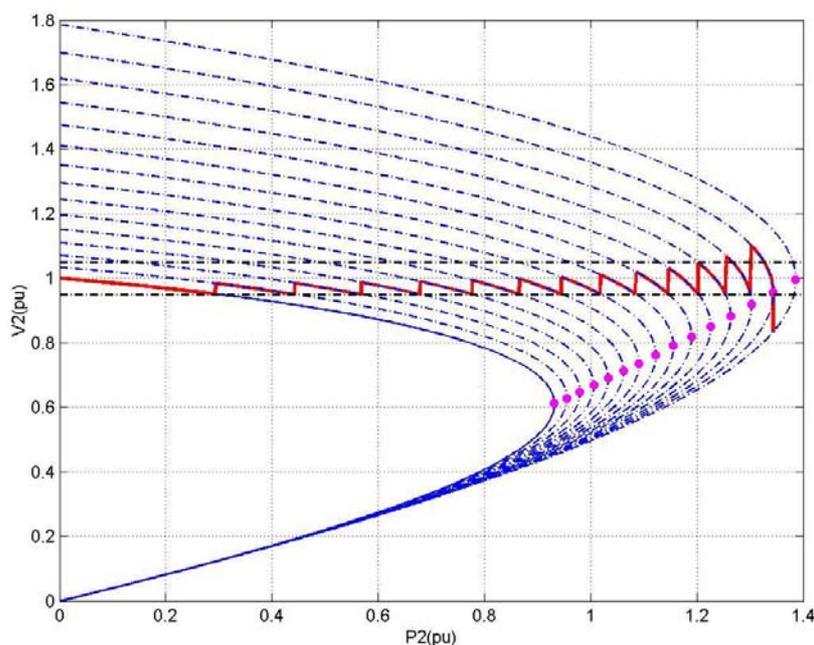


Figura 4.3 - Perfil de Tensão na Barra 2 com Compensação com Bancos de 8 MVar

A linha contínua "serrilhada" na figura é o lugar geométrico dos pontos de operação à medida que a carga ativa vai sendo incrementada, a tensão na carga vai decrescendo e, cada vez que o limite inferior da faixa normal de operação de tensão é atingido, chavea-se um capacitor (de 8 MVar) com a finalidade de manter a tensão dentro da faixa de operação.

Observa-se no extremo direito da figura que, ao conectar-se um capacitor quando o ponto de operação está na parte inferior da curva PxV ocorre um decréscimo de tensão, o que é oposto ao esperado. Esse mecanismo de controle automático de tensão com

respostas opostas ao esperado, fazendo com que a tensão decresça cada vez mais com cada atuação do controle, é uma forma possível de levar o sistema ao colapso de tensão.

Observando-se a linha contínua, verifica-se que, à medida que a carga cresce e capacitores são incluídos, os picos de tensão na barra de carga aumentam cada vez mais, enquanto que o incremento na margem de potência diminui cada vez mais. Ou seja, quando o sistema se aproxima do máximo carregamento, a sensibilidade da tensão com a injeção de potência reativa aumenta, enquanto que a sensibilidade da margem com a injeção de potência reativa diminui. De fato, foi visto na Seção 2.4 e o Apêndice A que a inclusão de capacitores aumenta a máxima capacidade de transmissão até um certo limite (quando o limite de estabilidade de tensão e o limite estático de estabilidade angular coincidem).

Com capacitores de tamanho variável é possível fazer com que a tensão na barra de carga fique rigorosamente dentro da faixa normal de operação.

#### **4.4.3 Índices Avaliados**

Os índices de estabilidade de tensão na barra de carga 2 da Figura 4.2 foram calculados para avaliar o carregamento da rede. Considerou-se o chaveamento de 14 capacitores de 8 MVAR cada um.

Na Figura 4.4 observa-se que com a conexão de treze capacitores pode-se operar na parte inferior da curva e ainda na faixa normal de operação. De fato, o ponto c' está sobre a parte inferior da curva, como pode ser melhor visualizado na Figura 4.5. Portanto, quando chavea-se um outro capacitor, a tensão decresce e o novo ponto de operação corresponde ao ponto d'. Este ponto está sobre a parte inferior da curva correspondente a catorze capacitores conectados. Caso se continue conectando capacitores, o afundamento da tensão será cada vez maior.

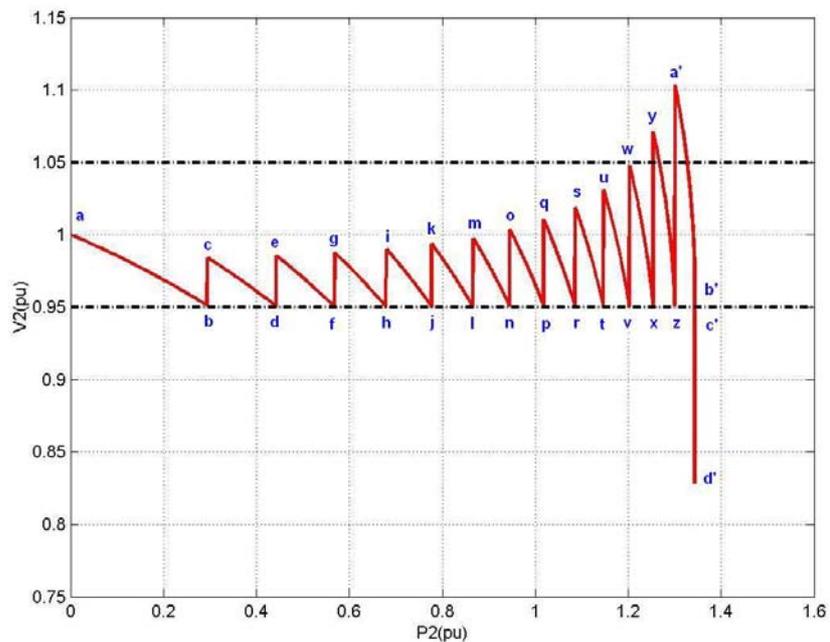


Figura 4.4 - Faixa Normal de Operação na Barra 2

Deve-se notar que, quando se passa de uma curva para outra, devido à conexão de um capacitor, a potência da carga não se altera. No entanto, na Figura 4.5 parece que essa potência diminui ligeiramente, mas essa impressão é somente devido ao procedimento de construção das curvas.

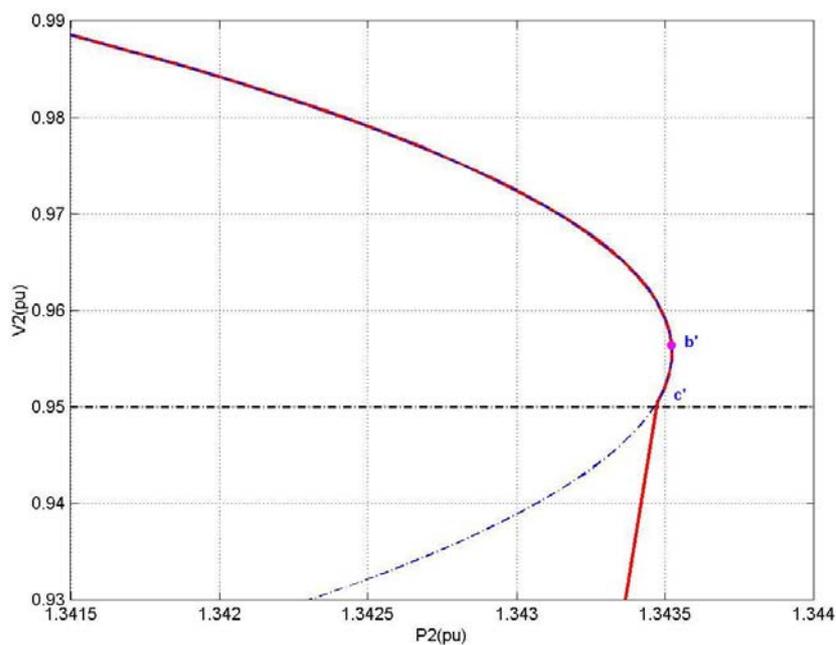


Figura 4.5 - Detalhe da Curva PxV com Treze Capacitores Conectados

Na Tabela 4.1 são apresentados índices de estabilidade de tensão para os pontos destacados da Figura 4.4, e que representam os pontos de operação antes e depois do chaveamento de cada um dos capacitores.

Tabela 4.1 - Índices de Estabilidade de Tensão Avaliados na Barra 2

| Ponto de Operação | Compensação (MVar) | $P_2$ (pu) | $V_2$ (pu) | $\det_2[D']$ | $\beta_2$ (graus) | $M_2$ (%) |
|-------------------|--------------------|------------|------------|--------------|-------------------|-----------|
| a                 | 0                  | 0,00000    | 1,00000    | 6,2500       | 90,0000           | 100,0000  |
| b                 | 0                  | 0,29344    | 0,95104    | 5,2857       | 102,1641          | 87,0226   |
| c                 | 8                  | 0,29483    | 0,98401    | 5,4772       | 102,8801          | 87,4016   |
| d                 | 8                  | 0,44269    | 0,95037    | 4,8080       | 109,8491          | 79,7208   |
| e                 | 16                 | 0,44275    | 0,98544    | 5,6406       | 110,1815          | 80,4675   |
| f                 | 16                 | 0,56852    | 0,95025    | 4,3349       | 116,7721          | 73,0267   |
| g                 | 24                 | 0,56895    | 0,98748    | 4,5554       | 116,7678          | 74,0906   |
| h                 | 24                 | 0,67870    | 0,95025    | 3,8667       | 123,2452          | 66,6232   |
| i                 | 32                 | 0,67958    | 0,99007    | 4,1044       | 122,8605          | 68,0545   |
| j                 | 32                 | 0,77705    | 0,95020    | 3,4052       | 129,4279          | 60,3434   |
| k                 | 40                 | 0,77714    | 0,99372    | 3,6746       | 128,5087          | 62,3274   |
| l                 | 40                 | 0,86558    | 0,95016    | 2,9550       | 135,3972          | 54,1050   |
| m                 | 48                 | 0,86690    | 0,99725    | 3,2472       | 133,9822          | 56,5996   |
| n                 | 48                 | 0,94492    | 0,95073    | 2,5275       | 141,1196          | 47,9507   |
| o                 | 56                 | 0,94528    | 1,00358    | 2,8693       | 138,9126          | 51,3362   |
| p                 | 56                 | 1,01798    | 0,95085    | 2,1078       | 146,8132          | 41,6201   |
| q                 | 64                 | 1,01849    | 1,01033    | 2,5015       | 143,6994          | 46,0554   |
| r                 | 64                 | 1,08494    | 0,95078    | 1,7022       | 152,4730          | 35,1107   |
| s                 | 72                 | 1,08574    | 1,01889    | 2,1623       | 148,1868          | 40,9610   |
| t                 | 72                 | 1,14614    | 0,95079    | 1,3157       | 158,0863          | 28,4299   |
| u                 | 80                 | 1,14676    | 1,03103    | 1,8711       | 152,1714          | 36,3321   |
| v                 | 80                 | 1,20253    | 0,95011    | 0,9403       | 163,8026          | 21,3796   |
| w                 | 88                 | 1,20258    | 1,04792    | 1,6343       | 155,5472          | 32,3362   |
| x                 | 88                 | 1,25379    | 0,95003    | 0,5914       | 169,4469          | 14,1696   |
| y                 | 96                 | 1,25413    | 1,07097    | 1,4594       | 158,1887          | 29,1779   |
| z                 | 96                 | 1,30053    | 0,95098    | 0,2715       | 174,9773          | 6,8561    |
| a'                | 104                | 1,30123    | 1,10332    | 1,3713       | 159,7847          | 27,3291   |
| b'                | 104                | 1,34352    | 0,95639    | 0,0054       | 179,8970          | 0,1426    |
| c'                | 104                | 1,34347    | 0,95055    | -0,0405      | -179,2189         | -1,0726   |
| d'                | 112                | 1,34288    | 0,83464    | -1,0214      | -156,2805         | -27,3876  |

Na medida em que se acrescenta carga, os índices refletem o maior carregamento da rede, já que o determinante  $\det_2[D']$  e a margem  $M_2$  diminuem, e o ângulo  $\beta_2$  aumenta. Quando o ponto de operação está na parte superior da curva e chavea-se um capacitor, o sistema se torna mais robusto e, portanto, o determinante  $\det_2[D']$  e margem  $M_2$  aumentam e o ângulo  $\beta_2$  diminui (exceto nos pares de pontos de operação: b-c, d-e). Por exemplo, nos pares de pontos de operação: b-c o  $\det_2[D']$  passa de 5,2857 a 5,4772,  $M_2$  de 87,0226 % a 87,4016 % e  $\beta_2$  de 102,1641° a 102,8801°; d-e o  $\det_2[D']$  passa de 4,8080 a 5,6406,  $M_2$  de 79,7208 % a 80,4675 % e  $\beta_2$  de 109,8491° a 110,1815°; f-g o

$\det_2[D']$  passa de 4,3349 a 4,5554,  $M_2$  de 73,0267 % a 74,0906 % e  $\beta_2$  de 116,7721° a 116,7678°; h-i o  $\det_2[D']$  passa de 3,8667 a 4,1044,  $M_2$  de 66,6232 % a 68,0545 % e  $\beta_2$  de 123,2452° a 122,8605°; j-k o  $\det_2[D']$  passa de 3,4052 a 3,6746,  $M_2$  de 60,3434 % a 62,3274 % e  $\beta_2$  de 129,4279° a 128,5087°; l-m o  $\det_2[D']$  passa de 2,9550 a 3,2472,  $M_2$  de 54,1050 % a 56,5996 % e  $\beta_2$  de 135,3972° a 133,9822°; n-o o  $\det_2[D']$  passa de 2,5275 a 2,8693,  $M_2$  de 47,9507 % a 51,3362 % e  $\beta_2$  de 141,1196° a 138,9126°; p-q o  $\det_2[D']$  passa de 2,1078 a 2,5015,  $M_2$  de 41,6201 % a 46,0554 % e  $\beta_2$  de 146,8132° a 143,6994°; r-s o  $\det_2[D']$  passa de 1,7022 a 2,1623,  $M_2$  de 35,1107 % a 40,9610 % e  $\beta_2$  de 152,4730° a 148,1868°; t-u o  $\det_2[D']$  passa de 1,3157 a 1,8711,  $M_2$  de 28,4299 % a 36,3321 % e  $\beta_2$  de 158,0863° a 152,1714°; v-w o  $\det_2[D']$  passa de 0,9403 a 1,6343,  $M_2$  de 21,3796 % a 32,3362 % e  $\beta_2$  de 163,8026° a 155,5472°; x-y o  $\det_2[D']$  passa de 0,5914 a 1,4594,  $M_2$  de 14,1696 % a 29,1779 % e  $\beta_2$  de 169,4469° a 158,1887°; z-a' o  $\det_2[D']$  passa de 0,2715 a 1,3713,  $M_2$  de 6,8561 % a 27,3291 % e  $\beta_2$  de 174,9773° a 159,7847°. Finalmente o máximo carregamento é atingido em b' com  $\det_2[D']=0,0054$ ,  $M_2=0,1426$  % e  $\beta_2=179,8970^\circ$ .

Por outro lado, quando o ponto de operação está na parte inferior da curva e chavea-se um capacitor, o sistema se torna menos robusto e, portanto, o determinante  $\det_2[D']$  e margem  $M_2$  diminuem e o ângulo  $\beta_2$  aumenta. Por exemplo, no par de pontos de operação: c'-d' o  $\det_2[D']$  passa de -0,0405 a -1,0214,  $M_2$  de -1,0726 % a -27,3876 % e  $\beta_2$  de -1,0726° a -27,3876°.

Neste teste numérico verifica-se que não se deve conectar mais de doze capacitores, já que com treze deles, a parte inferior da curva está na faixa normal de tensão. Como dito, o chaveamento de outros capacitores afundariam cada vez mais a tensão.

#### 4.4.4 Índice Susceptância versus Tensão Controlada

É útil ter-se um índice que indique a adequação ou não da conexão de um capacitor, sem a necessidade de executar um algoritmo de fluxo de carga com o capacitor conectado. Muitas vezes pode haver problemas de convergência e o ponto de operação fica indeterminado. Esse índice deve ser baseado na sensibilidade da susceptância do capacitor e a tensão monitorada, mas levando em conta todo o sistema.

Deseja-se verificar somente as variações da tensão  $V_m$  na barra controlada “m” e a variação da susceptância do capacitor  $b_k^{sh}$  instalado na barra “k”. O sistema linearizado das equações de fluxo de carga deste sistema, considerando a estrutura da matriz Jacobiana é mostrada em (4.14).

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \vdots \\ \Delta P_m \\ \Delta Q_m \\ \vdots \\ \Delta V_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & H_{kk} & N_{kk} & \cdots & H_{km} & N_{km} & \cdots \\ \cdots & J_{kk} & L_{kk} & \cdots & J_{km} & L_{km} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & H_{mk} & N_{mk} & \cdots & H_{mm} & N_{mm} & \cdots \\ \cdots & J_{mk} & L_{mk} & \cdots & J_{mm} & L_{mm} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta \theta_k \\ \Delta V_k \\ \vdots \\ \Delta \theta_m \\ \Delta V_m \\ \vdots \\ \Delta b_k^{sh} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Fazendo-se  $\Delta P_m = \Delta P_k = \Delta Q_m = \Delta Q_k = 0$  já que não há interesse nessas variações e usando-se (2.70), o sistema é reduzida a:

$$[\Delta V_m] = [D'] \cdot [\Delta b_k^{sh}] \quad (4.15)$$

Conclui-se que:

- na região normal de operação, a conexão de um capacitor deve elevar a tensão e, portanto, o índice de adequação deve ser positivo.
- na região anormal de operação, a remoção de um capacitor deve elevar a tensão e, portanto, o índice de adequação deve ser negativo.

#### 4.4.5 Exemplo Numérico

A linha contínua representa os pontos de operação com 10 capacitores de 10 MVar cada um conectados em paralelo na barra 2, vê-se na Figura 4.6 que se atinge o limite inferior de tensão de 0.95 pu na região superior da curva (ponto de operação a). Com a conexão de um pequeno capacitor, o ponto de operação passa de “a” para “a’”, Por outro lado, se

houvessem 11 capacitores conectados em paralelo, atinge-se o limite inferior de tensão de 0.95 pu na região inferior da curva (ponto de operação b). Com a remoção de um pequeno capacitor, o ponto de operação passa de “b” para “b’”.

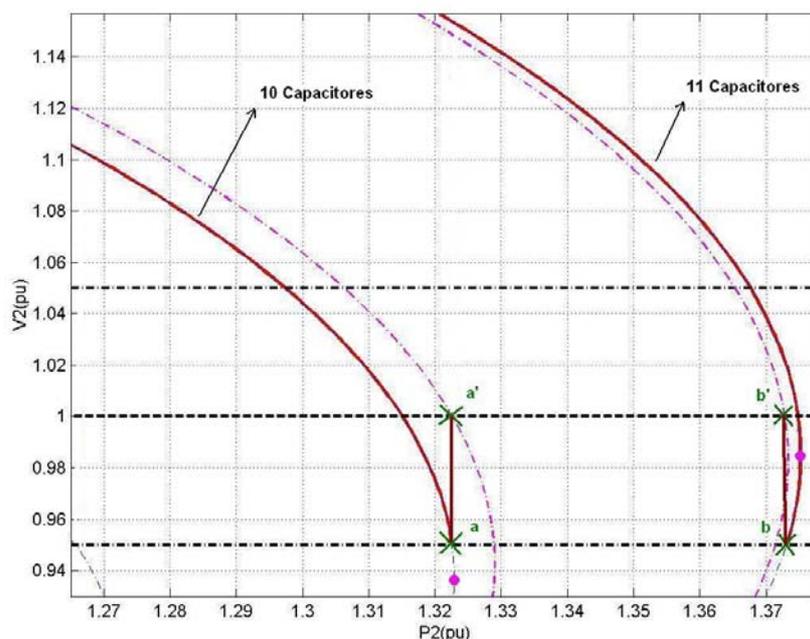


Figura 4.6 - Atuação do Controle de Tensão

Na Tabela 4.2 mostram-se os pontos de operação a e a' da Figura 4.6, respectivamente antes e depois da atuação do controle de tensão.

#### a) Ponto da região normal de operação

Tabela 4.2 - Pontos de Operação da Região Normal de Operação Antes e Depois da Conexão de um Capacitor

| Carga Barra 2       |                     | Início da atuação do controle (a) |                      |                     |                      |                      | Término da atuação do controle (a') |                      |                     |                      |                      |
|---------------------|---------------------|-----------------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|-------------------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| P <sub>2</sub> (pu) | Q <sub>2</sub> (pu) | V <sub>1</sub> (pu)               | θ <sub>1</sub> (rad) | V <sub>2</sub> (pu) | θ <sub>2</sub> (rad) | b <sub>sh</sub> (pu) | V <sub>1</sub> (pu)                 | θ <sub>1</sub> (rad) | V <sub>2</sub> (pu) | θ <sub>2</sub> (rad) | b <sub>sh</sub> (pu) |
| 1,3226              | 0                   | 0,9101                            | -0,3555              | 0,9489              | -0,7311              | 1,1080               | 0,9379                              | -0,3541              | 1                   | -0,7082              | 1,1212               |

Substituindo o ponto de operação “a” da Tabela 4.2 em (4.15), obtém-se:

$$\frac{\Delta V_2}{\Delta b_2^{sh}} = D'' = 10,2563$$

O índice D'' sempre é positivo quando o controle de tensão atua na região normal de operação e o programa computacional sempre determina o chaveamento de um ou mais

capacitores para recuperar a tensão. Na Tabela 4.2 verifica-se que a susceptância do capacitor  $b_{sh}$  antes da atuação do controle de tensão é 1,1080 pu e que mudou ao término da atuação do controle de tensão para 1,1212 pu, e então  $\Delta b_{sh}=+0,0132$  pu. Conclui-se que na região normal de operação  $\Delta b_{sh}$  e  $D''$  são positivos, e portanto  $\Delta V_2 > 0$ .

Na Tabela 4.3 mostram-se os pontos de operação b e b' da Figura 4.6, respectivamente antes e depois da atuação do controle de tensão.

### b) Ponto da região anormal de operação

Tabela 4.3 - Pontos de Operação da Região Anormal de Operação Antes e Depois da Conexão de um Capacitor

| Carga Barra 2 |               | Início da atuação do controle (b) |                     |               |                    |                  | Término da atuação do controle (b') |                     |               |                    |                  |
|---------------|---------------|-----------------------------------|---------------------|---------------|--------------------|------------------|-------------------------------------|---------------------|---------------|--------------------|------------------|
| $P_2$<br>(pu) | $Q_2$<br>(pu) | $V_1$<br>(pu)                     | $\theta_1$<br>(rad) | $V_2$<br>(pu) | $\theta_2$<br>(pu) | $b_{sh}$<br>(pu) | $V_1$<br>(pu)                       | $\theta_1$<br>(rad) | $V_2$<br>(pu) | $\theta_2$<br>(pu) | $b_{sh}$<br>(pu) |
| 1,3729        | 0             | 0,9018                            | -0,3783             | 0,9493        | -0,7780            | 1,2188           | 0,9303                              | -0,3754             | 1             | -0,7509            | 1,2152           |

Substituindo o ponto de operação “b” da Tabela 4.3 em (4.15), obtém-se:

$$\frac{\Delta V_2}{\Delta b_2^{sh}} = D'' = -3,4391$$

O índice  $D''$  sempre é negativo quando o controle de tensão atua na região anormal de operação e o programa computacional determina a remoção de um ou mais capacitores para recuperar a tensão. Na Tabela 4.3 verifica-se que a susceptância do capacitor  $b_{sh}$  antes da atuação do controle de tensão era 1,2188 pu e mudou ao término da atuação do controle de tensão para 1,2152 pu, e então  $\Delta b_{sh}=-0,0036$  pu. Conclui-se que na região anormal de operação  $\Delta b_{sh}$  e  $D''$  são negativos, e portanto  $\Delta V_2 > 0$ .

Cada vez que o limite inferior de tensão é ultrapassado o controle de tensão é ativado para recuperar a tensão até  $V_{esp}$ . A ação pode ser conectar ou remover capacitores, dependendo da região de operação. A variação da tensão  $V_2$  na barra que se quer controlar sempre será positiva para poder levar a tensão do limite inferior ultrapassado até o valor de tensão especificado.

#### 4.4.6 Efeito da Remoção de Capacitores

Com 110 MVar de compensação reativa na barra 2 através de bancos de capacitores, tal qual se mostra na Figura 4.7, vê-se que se atinge o limite inferior de tensão de 0.95 pu na região inferior da curva (ponto de operação 1). Então, a conexão de mais um capacitor fará com que a tensão diminua ainda mais. A única alternativa para manter o controle na faixa de tensão seria a retirada de capacitores. Pode-se verificar na figura que quando se retira um capacitor é possível passar da região inferior à região superior da curva (ponto de operação 2). Logo, no que diz respeito à magnitude da tensão, poderia-se aumentar a carga. No entanto, a remoção de um capacitor implica na redução da capacidade máxima de transmissão (de 1,3752 para 1,3735 pu).

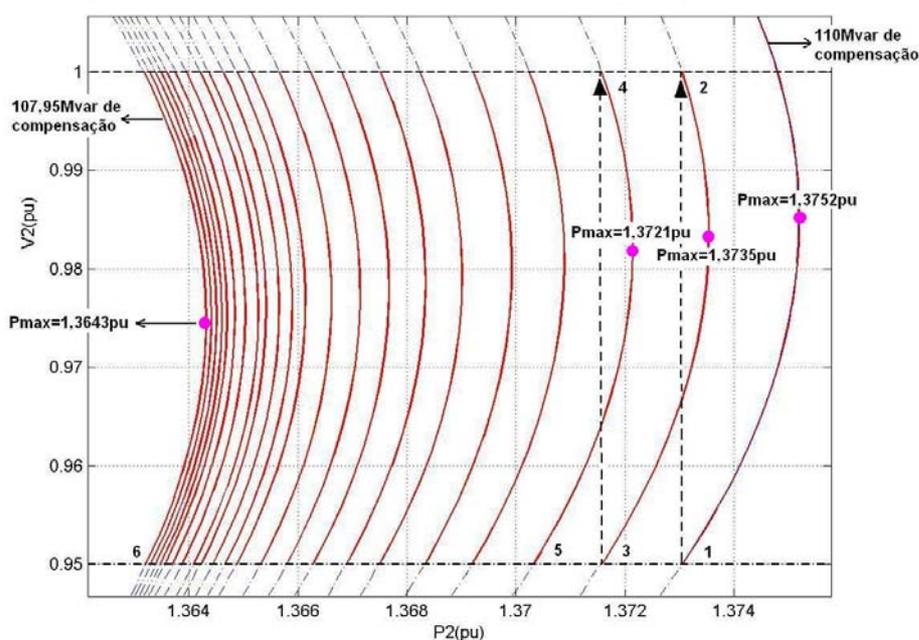


Figura 4.7 - Efeito da Remoção de Capacitores

Pode-se concluir o seguinte:

- caso o limite inferior de tensão seja num ponto que está na parte superior da curva, é possível chavear um ou mais capacitores com a finalidade de manter a tensão dentro da faixa normal de operação e aumentar a capacidade de transmissão do sistema. Se o valor do capacitor a ser conectado for grande, existe a possibilidade de sobretensão na barra controlada. Caso o número máximo de capacitores seja ultrapassado (ver Sessão 2.4), a inclusão de outro

capacitor faz com que a tensão e a capacidade máxima de potência transmitida diminuam, e pode ser que a carga não possa ser atendida.

- caso o limite inferior de tensão seja num ponto que está na parte inferior da curva, a única alternativa é a retirada de capacitores para manter a tensão dentro da faixa normal de operação, embora isso signifique reduzir a capacidade de transmissão do sistema. Por exemplo, na Tabela 4.4, quando  $b_{sh}=1,2188$  pu a máxima potência que pode ser transmitida é 1,3752 pu e quando se retira o primeiro capacitor a susceptância passa ser  $b_{sh}=1,2154$  pu e a nova potência máxima que pode ser transmitida seria 1,3735 pu e, portanto, nota-se a redução da capacidade de transmissão. É possível que a carga não possa ser atendida com a retirada de um ou mais capacitores.

Na Tabela 4.4 são mostrados os índices de estabilidade de tensão avaliados considerando a retirada de capacitores do sistema. Com a análise dos índices pode-se conferir que se passa da região inferior para a região superior, isso se nota na mudança de sinal do  $\det_2[D']$ , ângulo  $\beta_2$  e a margem  $M_2$ . Por exemplo, nos pares de pontos de operação: 1-2 o  $\det_2[D']$  passa de -0,2595 a 0,1092,  $M_2$  de -6,7839 % a 2,7603 % e  $\beta_2$  de  $-174,8318^\circ$  a  $177,9830^\circ$ ; e 3-4 o  $\det_2[D']$  passa de -0,2473 a 0,1246,  $M_2$  de -6,4285 % a 3,1313 % e  $\beta_2$  de  $-175,0862^\circ$  a  $177,7031^\circ$ .

O controle de tensão pára no ponto 6, tal qual se mostra na Tabela 4.4, com tensão  $V_2=0,9501$  pu,  $b_{sh}=1,1962$  pu,  $\det_2[D']=-0,1887$ ,  $\beta_2=-176,2820^\circ$  e  $M_2=-4,9391$  %, pois não é mais possível retirar capacitores para elevar a tensão. A nova curva desconectando mais um capacitor coincide com a curva onde está o ponto 6 e, portanto, o pretendido ponto 7 coincide com o ponto 6.

Tabela 4.4 - Índices de Estabilidade de Tensão Considerando a Remoção de Capacitores.

| Nº | $b_{sh}$ (pu) | $\det_2[D']$ | $\beta_2$ (graus) | $M_2$ (%) |
|----|---------------|--------------|-------------------|-----------|
| 1  | 1,2188        | -0,2595      | -174,8318         | -6,7839   |
| 2  | 1,2154        | 0,1092       | 177,9830          | 2,7603    |
| 3  | 1,2154        | -0,2473      | -175,0862         | -6,4285   |
| 4  | 1,2125        | 0,1246       | 177,7031          | 3,1313    |
| 5  | 1,2125        | -0,2327      | -175,3882         | -6,0676   |
| 6  | 1,1962        | -0,1887      | -176,2820         | -4,9391   |

Existe também um limite até onde se podem retirar capacitores. O último capacitor que pode ser desconectado é aquele que faz com que a nova máxima potência transmitida seja exatamente igual à carga que está sendo atendida e/ou a tensão esperada ( $V_{esp}$ ) não

possa ser atendida mais. Na Figura 4.7 percebe-se que no ponto de operação com carga  $P_2=1,3632$  pu, tensão  $V_2=0,9501$  pu e com compensação reativa de 107,95 MVar (ponto 6), já não é mais possível retirar um capacitor com a intenção de se alcançar a tensão esperada de 1,0 pu.

Nas Figuras 4.8 e 4.9 é mostrada a análise do ponto de operação 6 da Figura 4.7. Verifica-se que somente seria possível retirar um capacitor (a partir do ponto 6 da Figura 4.7) atingindo então a tensão  $V_2=0,9990$  pu, mantendo a mesma potência transmitida de  $P_2=1,3632$  pu. A condição de  $V_{esp}=1$  pu não pode ser mais cumprida.

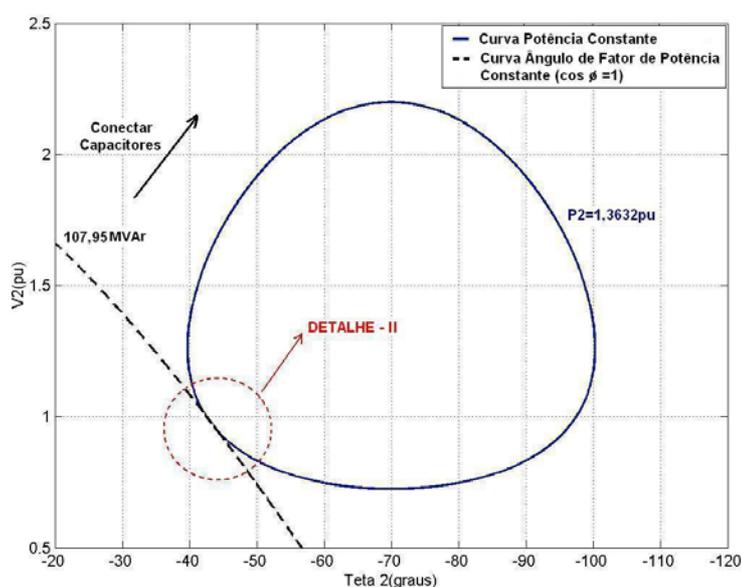


Figura 4.8 - Limite até Onde se Pode Retirar Capacitores

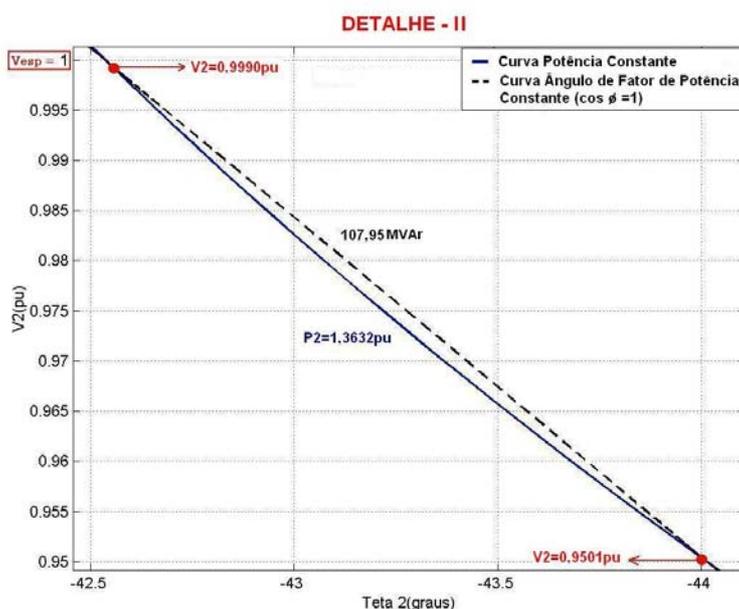


Figura 4.9 - O Controle de Tensão Não Atinge mais à Tensão Esperada  $V_{esp}=1$  pu

## 4.5 Conclusões do Capítulo

O chaveamento automático de capacitores, abordado neste capítulo, representa uma estratégia usada na operação onde é necessário controlar a tensão nas barras de transmissão. Um excesso de capacitores pode levar a região inferior da curva PxV à faixa normal de operação e o chaveamento de outros capacitores poderia levar ao colapso de tensão.

No problema do fluxo de carga, o modelo matemático adotado para representação do chaveamento automático da compensação *shunt* variável, consiste na adição de uma equação de controle ao sistema de equações original. A susceptância do capacitor é considerada uma nova variável de estado.

A tensão controlada deve permanecer dentro de uma faixa de operação permitida, e não mantida em um valor fixo. A estrutura de controle adicional à matriz Jacobiana, somente fará parte do processo de solução do fluxo de carga enquanto o valor da tensão controlada estiver fora de seu limite inferior da faixa de operação.

Para calcular os índices de avaliação das condições de estabilidade de tensão na presença de controle por faixa de tensão através de banco de capacitores chaveáveis, não é necessário incluir as linhas e colunas correspondentes às equações de controle de tensão na matriz Jacobiana. Isso por que o controle está presente no algoritmo de fluxo de carga somente quando se atinge o limite inferior de tensão. Uma vez que a tensão de referência é atingida e o novo capacitor é determinado, retira-se as equações de controle. Os índices de avaliação das condições de estabilidade de tensão são calculados para o ponto de operação com a tensão na faixa pré-estabelecida e com o capacitor já determinado e conectado.

Dependendo da localização do ponto de operação, parte superior ou inferior da curva PxV, o algoritmo de fluxo de carga decide, respectivamente, sobre a conexão ou desconexão de capacitores, sempre com o objetivo de obter uma variação positiva da tensão na barra controlada até o valor da tensão esperada.

Existe um limite até onde se pode retirar capacitores. O último capacitor que pode ser desconectado é aquele que faz com que a nova máxima potência transmitida seja exatamente igual à carga que está sendo atendida e/ou a tensão esperada não possa mais ser atendida.