

5

Controle de Tensão através de Transformador com *Tap* Variável no Problema de Fluxo de Potência

5.1

Introdução

Em sistemas elétricos de potência, os módulos das tensões sofrem grande influência das variações das cargas. Caso não haja atuação de dispositivos de controle, na medida em que se aumenta o carregamento, os valores das tensões podem alcançar níveis inaceitáveis, causando vários prejuízos para equipamentos, cargas e consumidores. As tensões em uma rede elétrica, que opera sob condições confiáveis, não podem variar significativamente em relação a seus valores nominais.

O tratamento dispensado aos dispositivos de controle de tensão é um problema de suma importância na solução do fluxo de potência. Os *taps* dos transformadores são frequentemente utilizados para controlar a tensão de uma barra. Por outro lado, deve-se também considerar nos métodos de solução do fluxo de potência os limites operacionais dos *taps*, de modo a se obter um ponto de operação que corresponda à operação real do sistema.

A incorporação de dispositivos de controle de tensão e limites em um programa de fluxo de potência pode ser feita utilizando-se a técnica dos ajustes alternados [39], onde após cada iteração as correções nas variáveis de controle são obtidas externamente à matriz Jacobiana. Essa estratégia não funciona adequadamente quando o sistema opera próximo do seu ponto de máximo carregamento, tendo como consequência um elevado número de iterações e, até mesmo, a divergência no processo. Em [40] é apresentada uma forma alternativa, adotada neste trabalho, que consiste em modificar a matriz Jacobiana, incluindo as equações do controle desejado, de modo a obter as variáveis de controle via solução direta.

5.2

Modelagem Matemática

Considere que o *tap* de um transformador situado entre as barras k e m , controle a tensão de uma barra i , conforme Figura 5.1. O controle será terminal se $i=k$ ou $i=m$, ou remoto se $i \neq k$ e $i \neq m$.

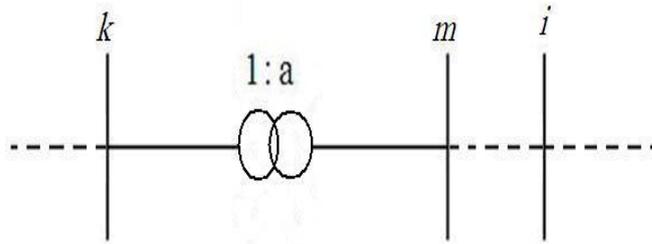


Figura 5.1: Controle de Tensão Através de Transformador com *Tap* Variável

De acordo com [40], o sistema de equações a ser resolvido a cada iteração do método de Newton Raphson será:

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \vdots \\ \Delta P_m \\ \Delta Q_m \\ \vdots \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \\ \vdots \\ \Delta V_i \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \dots & H_{kk} & N_{kk} & \dots & H_{km} & N_{km} & \dots & H_{ki} & N_{ki} & \dots & \frac{\partial P_k}{\partial a_{km}} & \dots \\ \dots & M_{kk} & L_{kk} & \dots & M_{km} & L_{km} & \dots & M_{ki} & L_{ki} & \dots & \frac{\partial Q_k}{\partial a_{km}} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots \\ \dots & H_{mk} & N_{mk} & \dots & H_{mm} & N_{mm} & \dots & H_{mi} & N_{mi} & \dots & \frac{\partial P_m}{\partial a_{km}} & \dots \\ \dots & M_{mk} & L_{mk} & \dots & M_{mm} & L_{mm} & \dots & M_{mi} & L_{mi} & \dots & \frac{\partial Q_m}{\partial a_{km}} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots \\ \dots & H_{ik} & N_{ik} & \dots & H_{im} & N_{im} & \dots & H_{ii} & N_{ii} & \dots & 0 & \dots \\ \dots & M_{ik} & L_{ik} & \dots & M_{im} & L_{im} & \dots & M_{ii} & L_{ii} & \dots & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots \\ \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & 0 & \dots \\ \ddots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta \theta_k \\ \Delta V_k \\ \vdots \\ \Delta \theta_m \\ \Delta V_m \\ \vdots \\ \Delta \theta_i \\ \Delta V_i \\ \vdots \\ \Delta a_{km} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

onde:

$$\frac{\partial P_k}{\partial a_{km}} = \frac{\partial P_{km}}{\partial a_{km}} \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial a_{km}} = \frac{\partial Q_{km}}{\partial a_{km}} \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial P_m}{\partial a_{km}} = \frac{\partial P_{mk}}{\partial a_{km}} \quad (5.4)$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial a_{km}} = \frac{\partial Q_{mk}}{\partial a_{km}} \quad (5.5)$$

As expressões (5.2), (5.3), (5.4), e (5.5), além dos elementos H, N, M e L, apresentados em [39], e dos resíduos de potência, dependem do modelo de transformador utilizado, conforme será detalhado.

5.2.1

Controle de Tensão no Modelo Usual

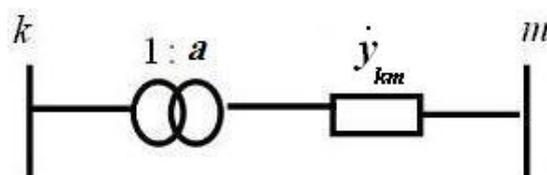


Figura 5.2: Modelo Usual com Admitância

Na Figura 5.2, tem-se o modelo usual de transformador com *tap* variável, com admitância entre o transformador ideal e a barra *m*. Desse circuito tem-se:

$$\dot{I}_{km}^{usual} = a_{km} \dot{y}_{km} (a_{km} V_k - V_m) \quad (5.6)$$

O fluxo de potência complexo é dado por:

$$\left(\dot{S}_{km}^{usual}\right)^* = P_{km}^{usual} - jQ_{km}^{usual} = \dot{V}_k^* \dot{I}_{km}^{usual} \quad (5.7)$$

Substituindo (5.6) em (5.7) e separando-se as partes real e imaginária, tem-se as expressões para os fluxos de potência ativa e reativa, conforme apresentado em [39]:

$$P_{km}^{usual} = (a_{km} V_k)^2 g_{km} - a_{km} V_k V_m g_{km} \cos \theta_{km} - a_{km} V_k V_m b_{km} \text{sen} \theta_{km} \quad (5.8)$$

$$Q_{km}^{usual} = -(a_{km} V_k)^2 b_{km} + a_{km} V_k V_m b_{km} \cos \theta_{km} - a_{km} V_k V_m g_{km} \text{sen} \theta_{km} \quad (5.9)$$

Analogamente, pode-se deduzir os valores para P_{mk}^{usual} e Q_{mk}^{usual} , que são dados por:

$$P_{mk}^{usual} = g_{km} V_m^2 - a_{km} V_k V_m g_{km} \cos \theta_{km} + a_{km} V_k V_m b_{km} \text{sen} \theta_{km} \quad (5.10)$$

$$Q_{mk}^{usual} = -b_{km} V_m^2 + a_{km} V_k V_m b_{km} \cos \theta_{km} + a_{km} V_k V_m g_{km} \text{sen} \theta_{km} \quad (5.11)$$

Assim, (5.2), (5.3), (5.4), e (5.5) podem ser escritas, para o modelo usual:

$$\frac{\partial P_k}{\partial a_{km}} = \frac{\partial P_{km}^{usual}}{\partial a_{km}} = 2a_{km} V_k^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos \theta_{km} - V_k V_m b_{km} \text{sen} \theta_{km} \quad (5.12)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial a_{km}} = \frac{\partial Q_{km}^{usual}}{\partial a_{km}} = -2a_{km} V_k^2 b_{km} + V_k V_m b_{km} \cos \theta_{km} - V_k V_m g_{km} \text{sen} \theta_{km} \quad (5.13)$$

$$\frac{\partial P_m}{\partial a_{km}} = \frac{\partial P_{mk}^{usual}}{\partial a_{km}} = -V_k V_m g_{km} \cos \theta_{km} + V_k V_m b_{km} \text{sen} \theta_{km} \quad (5.14)$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial a_{km}} = \frac{\partial Q_{mk}^{usual}}{\partial a_{km}} = V_k V_m b_{km} \cos \theta_{km} + V_k V_m g_{km} \text{sen} \theta_{km} \quad (5.15)$$

Montada a matriz Jacobiana, pode-se resolver (5.1) e atualizar os valores das tensões (módulo e ângulo) e do $\text{tap } a_{km}$. Verifica-se, então, a convergência do

processo iterativo. Caso não tenha sido obtida a convergência, é necessário iniciar outra iteração ($h+1$), atualizando-se a matriz Jacobiana. No cálculo dos elementos H, N, M e L, dos valores apresentados em (5.12), (5.13), (5.14) e (5.15), e dos resíduos de potência, deve ser observado que, além de serem utilizados novos valores para as tensões, o *tap* também foi modificado, passando a valer:

$$a_{km}^{h+1} = a_{km}^h + \Delta a_{km}^h$$

Conseqüentemente, a matriz admitância nodal deve ser atualizada, seguindo a estrutura detalhada na Seção 3.1.3.4. Observa-se que o elemento (m,m) não varia com o *tap* e, assim, não precisa ser atualizado.

$$Y_{\text{Barra}}(k, k) = Y_{\text{Barra}}(k, k) - (a_{km}^h)^2 y_{km} + (a_{km}^{h+1})^2 y_{km}$$

$$Y_{\text{Barra}}(k, m) = Y_{\text{Barra}}(k, m) + a_{km}^h y_{km} - a_{km}^{h+1} y_{km}$$

$$Y_{\text{Barra}}(m, k) = Y_{\text{Barra}}(k, m)$$

5.2.2

Controle de Tensão no Modelo Proposto

A partir dos circuitos apresentados nas Figuras 4.3 e 4.4, obtém-se modelos equivalentes representados através de admitância, conforme Figuras 5.3 e 5.4, respectivamente.

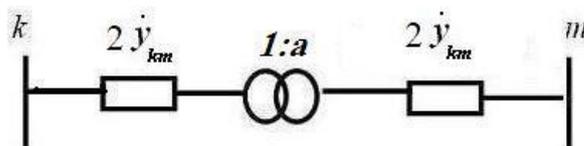


Figura 5.3: Modelo Proposto Representado Através de Admitâncias

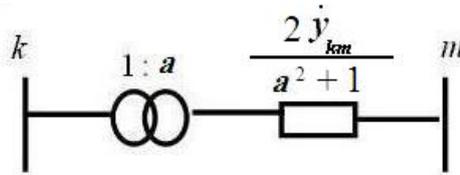


Figura 5.4: Modelo Proposto com Reflexão de Admitância

Comparando-se as Figuras 5.4 e 5.2, modifica-se (5.6), para o modelo proposto:

$$\dot{j}_{km}^{proposto} = \frac{2a_{km}\dot{y}_{km}(a_{km}V_k - V_m)}{a_{km}^2 + 1} = \frac{2}{a_{km}^2 + 1} \dot{j}_{km}^{usual} \quad (5.16)$$

O fluxo de potência complexo será:

$$\left(\dot{S}_{km}^{proposto}\right)^* = P_{km}^{proposto} - jQ_{km}^{proposto} = \dot{V}_k^* \dot{j}_{km}^{proposto} \quad (5.17)$$

Substituindo-se (5.16) em (5.17), tem-se:

$$\left(\dot{S}_{km}^{proposto}\right)^* = \frac{2\dot{V}_k^* \dot{j}_{km}^{usual}}{a_{km}^2 + 1} = \frac{2}{a_{km}^2 + 1} \left(\dot{S}_{km}^{usual}\right)^* \quad (5.18)$$

Separando-se as partes real e imaginária, tem-se

$$P_{km}^{proposto} = \frac{2}{a_{km}^2 + 1} P_{km}^{usual} \quad (5.19)$$

$$Q_{km}^{proposto} = \frac{2}{a_{km}^2 + 1} Q_{km}^{usual} \quad (5.20)$$

$$P_{mk}^{proposto} = \frac{2}{a_{km}^2 + 1} P_{mk}^{usual} \quad (5.21)$$

$$Q_{mk}^{proposto} = \frac{2}{a_{km}^2 + 1} Q_{mk}^{usual} \quad (5.22)$$

Assim, (5.2), (5.3), (5.4), e (5.5) podem ser escritas, para o modelo proposto:

$$\frac{\partial P_k}{\partial a_{km}} = \frac{2 \left(\frac{\partial P_{km}^{usual}}{\partial a_{km}} \right) (a_{km}^2 + 1) - 4 P_{km}^{usual} a_{km}}{(a_{km}^2 + 1)^2}$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial a_{km}} = \frac{2 \left(\frac{\partial Q_{km}^{usual}}{\partial a_{km}} \right) (a_{km}^2 + 1) - 4 Q_{km}^{usual} a_{km}}{(a_{km}^2 + 1)^2}$$

$$\frac{\partial P_m}{\partial a_{km}} = \frac{2 \left(\frac{\partial P_{mk}^{usual}}{\partial a_{km}} \right) (a_{km}^2 + 1) - 4 P_{mk}^{usual} a_{km}}{(a_{km}^2 + 1)^2}$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial a_{km}} = \frac{2 \left(\frac{\partial Q_{mk}^{usual}}{\partial a_{km}} \right) (a_{km}^2 + 1) - 4 Q_{mk}^{usual} a_{km}}{(a_{km}^2 + 1)^2}$$

Desenvolvendo as expressões anteriores tem-se:

$$\frac{\partial P_k}{\partial a_{km}} = \frac{2V_k V_m (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \operatorname{sen} \theta_{km})(a_{km}^2 - 1) + 4a_{km} V_k^2 g_{km}}{(a_{km}^2 + 1)^2} \quad (5.23)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial a_{km}} = \frac{-2V_k V_m (b_{km} \cos \theta_{km} - g_{km} \operatorname{sen} \theta_{km})(a_{km}^2 - 1) - 4a_{km} V_k^2 b_{km}}{(a_{km}^2 + 1)^2} \quad (5.24)$$

$$\frac{\partial P_m}{\partial a_{km}} = \frac{2V_k V_m (g_{km} \cos \theta_{km} - b_{km} \operatorname{sen} \theta_{km})(a_{km}^2 - 1) - 4a_{km} V_m^2 g_{km}}{(a_{km}^2 + 1)^2} \quad (5.25)$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial a_{km}} = \frac{-2V_k V_m (b_{km} \cos \theta_{km} + g_{km} \operatorname{sen} \theta_{km})(a_{km}^2 - 1) + 4a_{km}^2 V_m^2 b_{km}}{(a_{km}^2 + 1)^2} \quad (5.26)$$

Montada a matriz Jacobiana, pode-se resolver (5.1) e atualizar os valores das tensões (módulo e ângulo) e do *tap* a_{km} . Verifica-se, então, a convergência do processo iterativo. Caso não tenha sido obtida a convergência, é necessário iniciar outra iteração ($h+1$), atualizando-se a matriz Jacobiana. No cálculo dos elementos H, N, M e L, dos valores apresentados em (5.23), (5.24), (5.25) e (5.26), e dos resíduos de potência, deve ser observado que, além de serem utilizados novos valores para as tensões, o *tap* também foi modificado, passando a valer:

$$a_{km}^{h+1} = a_{km}^h + \Delta a_{km}^h$$

Conseqüentemente, a matriz admitância nodal deve ser atualizada, seguindo a estrutura detalhada na Seção 4.3:

$$Y_{\text{Barra}}(k, k) = Y_{\text{Barra}}(k, k) - \frac{2(a_{km}^h)^2 y_{km}}{(a_{km}^h)^2 + 1} + \frac{2(a_{km}^{h+1})^2 y_{km}}{(a_{km}^{h+1})^2 + 1}$$

$$Y_{\text{Barra}}(k, m) = Y_{\text{Barra}}(k, m) + \frac{2a_{km}^h y_{km}}{(a_{km}^h)^2 + 1} - \frac{2a_{km}^{h+1} y_{km}}{(a_{km}^{h+1})^2 + 1}$$

$$Y_{\text{Barra}}(m, k) = Y_{\text{Barra}}(k, m)$$

Conforme mencionado na Seção 4.3, usando o modelo proposto, o elemento (m, m) da matriz admitância nodal varia, ao contrário do que ocorre com o modelo usual, sendo atualizado da seguinte forma:

$$Y_{\text{Barra}}(m, m) = Y_{\text{Barra}}(m, m) - \frac{2y_{km}}{(a_{km}^h)^2 + 1} + \frac{2y_{km}}{(a_{km}^{h+1})^2 + 1}$$

Pode ser observado então que, comparando-se os modelos usual e proposto de transformador com *tap* variável, há modificações tanto nas expressões para se calcular as colunas adicionais da matriz Jacobiana, referentes a cada transformador com *tap* variável que controla tensão de barra terminal ou remota do transformador, quanto na atualização da matriz admitância nodal após atualização do *tap* do transformador em cada iteração no método de Newton Raphson. Com relação ao fluxo de potência continuado [15] e [16] tais modificações são notadas a cada carregamento, tanto nas etapas de estimação quanto de correção. Essas alterações levam a diferenças nas análises de estabilidade de tensão, conforme será apresentado no Capítulo 6.

5.3

Limites dos Taps

Os transformadores com *tap* variável possuem limites operacionais mínimo e máximo para a faixa de operação do *tap*. A verificação dos limites de *taps* dos transformadores, para um dado carregamento, tem início assim que os controles automáticos de *tap* para se controlar tensões de barras terminais ou remotas dos transformadores começam a atuar no problema de fluxo de potência.

Se o limite é atingido, o transformador tem seu *tap* fixado no limite violado e, portanto, a barra de tensão controlada é convertida de PQV para PQ, deixando de ter o módulo de tensão especificado no problema de fluxo de potência. Após um transformador ter seu *tap* fixo, deve-se testar, a cada iteração posterior, a possibilidade de voltar a ter *tap* variável. Isso é feito através da verificação do sinal do resíduo de tensão da barra de tensão controlada, conforme detalhado em [41].