

# 1 Introdução

## 1.1 Considerações Gerais

A energia elétrica tem sido ao longo dos anos, a base do desenvolvimento da humanidade. O conforto da população e os processos industriais e comerciais exigem cada vez mais o fornecimento de energia com elevado grau de continuidade, qualidade e segurança, os quais estão sujeitos a regulamentações e penalidades por descumprimentos de metas verificadas pelas agências reguladoras, no caso brasileiro representado pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL.

O aumento do consumo, associado ao aumento da população e da ocupação de grandes áreas, tem conduzido à expansão dos sistemas elétricos e ao aumento da complexidade nas rotinas de controle, proteção e operação desses sistemas. Dentre os problemas que apresentam grandes desafios está o controle de tensão e de potência reativa [Pavão, R.K., 2006].

Nas últimas décadas, o controle de tensão e de potência reativa ganhou maior atenção em virtude do aumento das ocorrências relacionadas aos problemas de instabilidade de tensão nos sistemas elétricos de potência. Estes problemas são produto do uso intensivo das redes existentes de transmissão, sub-transmissão e distribuição de energia elétrica [Henriques, R.M., 2009 e de Souza, L.J., 2007].

Vários incidentes relacionados à instabilidade de tensão ocorreram em todo mundo, sendo que alguns resultaram em colapso [Kundur, P., 1994]. Assim, uma melhor coordenação das ações de controle pode oferecer alternativas para se prevenir este fenômeno. Com a finalidade de contribuir de forma significativa tanto para a segurança quanto para a qualidade da operação, o sistema pode ser dividido em áreas de controle satisfatoriamente desacopladas em termos da influência do controle de tensão das vizinhas, onde cada área é regulada por um conjunto de máquinas e dispositivos de controle específicos [Henriques, R.M., 2009].

Esquemas que permitam controlar o perfil de tensão em uma determinada área do sistema, de forma automática, podem contribuir para evitar este tipo de problemas [Henriques, R.M., 2009]. Dentre os esquemas de controle necessários, o de controle

de tensão e potência reativa possui destaque por sua importância na manutenção de níveis de operação seguros (estabilidade de tensão e geração de potência reativa) e econômicos (perdas, suporte de potência reativa, fator de potência). Desse modo, um sistema de controle coordenado de tensão, baseado no controle das fontes de potência reativa (geradores, compensadores, capacitores) e em dispositivos, tais como transformadores com mudança de tape sob carga, atua no sentido de manter o perfil de tensão dentro de intervalos seguros e econômicos no sistema de transmissão [Pavão, R.K., 2006].

Assim é necessário um método capaz de identificar, de maneira consistente e automática, quais são as áreas de controle de tensão existentes no sistema elétrico de potência e quais as fontes de potência reativa que tem influência sobre esta porção do sistema [Henriques, R.M., 2009].

## 1.2 Objetivo

Em [de Souza, L.J., 2007] foi desenvolvida uma ferramenta computacional com base no sistema linearizado das equações de fluxo de carga e de todas as outras equações de controles e limites, julgadas pertinentes, para avaliação do efeito das ações de controle de tensão.

Determina-se uma matriz de sensibilidade [VCS], "*Voltage Control Sensitivity Matrix*", através da qual se pode estabelecer a relação existente entre as tensões controladas e as grandezas controladoras. Os elementos diagonais relacionam a grandeza controladora de cada equipamento com a respectiva tensão controlada (variável controlada). A análise do sinal desses elementos estabelece se uma determinada ação de controle será adequada ou não, isto é, se terá efeito esperado ou oposto. Os elementos fora da diagonal representam a interdependência existente entre os equipamentos controladores de tensão.

Em [Henriques, R.M., 2009] foi desenvolvido um método para identificar áreas de controle de tensão através da matriz de sensibilidade QV, definida como  $[J_{SQV}]$ , obtida a partir da matriz Jacobiana do sistema linearizado das equações de fluxo de carga.

Neste trabalho, o objetivo é determinar áreas de controle de tensão com base na matriz de sensibilidade [VCS] e comparar com aquelas obtidas através da matriz de sensibilidade QV.

### 1.3 Estrutura da Dissertação

No Capítulo 2 é apresentado o cálculo da matriz [VCS] para dois modelos de gerador. O primeiro é o modelo clássico, onde o gerador é modelado por uma tensão variável  $E$  na barra interna  $g$  atrás da reatância síncrona  $X_s$  controlando a tensão  $V$  na barra terminal  $i$ , e o segundo é um modelo de gerador baseado nas equações de equilíbrio na forma de balanço de potência [Van Cutsem, T., 1998]. Para cada modelo de gerador é obtida uma matriz [VCS] considerando pontos de operação com e sem problemas de estabilidade de tensão. As matrizes são comparadas e avaliadas através de testes numéricos. Finalmente, são obtidos os autovalores e autovetores da matriz [VCS] com modelo clássico de gerador e sua análise é aplicada à determinação de áreas de controle de tensão. Além, são obtidas áreas de controle de tensão diretamente da matriz [VCS] e são comparadas com as áreas obtidas da análise dos autovalores e autovetores.

No Capítulo 3, apresenta-se a formulação do problema de fluxo de potência para calcular a matriz de sensibilidade QV, definida como  $[J_{SQV}]$ . É obtida a matriz  $[J_{SQV}]$  para sistemas-teste de pequeno (10 barras, 18 barras e *New England*), médio (IEEE 118 barras) e grande porte (S/SE Brasileiro 730 barras). Os autovalores e autovetores associados, de cada matriz  $[J_{SQV}]$ , são analisados com a finalidade de determinar áreas de controle de tensão. Também, são obtidas áreas de controle de tensão diretamente da matriz  $[J_{SQV}]$  e são comparadas com as áreas obtidas da análise dos autovalores e autovetores.

No Capítulo 4, comparam-se os métodos de determinação de áreas de controle de tensão apresentados nos Capítulos 2 e 3, através de critérios de comparação que expõem suas características principais.

Por último, no Capítulo 5, são expostas as conclusões finais do trabalho.

No Apêndice A é apresentada uma breve revisão do método de *Newton-Raphson* aplicado ao problema de fluxo de carga [Passos Filho, J. A., 2005]. Este apêndice

serve de fonte de consulta aos aspectos relacionados à solução do problema de fluxo de carga.

No Apêndice B estão os dados dos sistemas de pequeno e médio porte utilizados nos testes do Capítulo 2. Todos os dados estão no formato do Programa de Análise de Redes – ANAREDE [CEPEL, 2009], de propriedade do CEPEL.

No Apêndice C são mostrados os dados dos sistemas de pequeno e médio porte utilizados nos testes do Capítulo 3. Todos os dados estão no formato do Programa de Análise de Redes – ANAREDE [CEPEL, 2009], de propriedade do CEPEL.