

## 6. Conclusões e Trabalhos Futuros

### 6.1 Conclusões

Neste trabalho foi proposta uma ferramenta computacional, desenvolvida com base no sistema linearizado das equações de fluxo de carga, para a avaliação do efeito das ações de controle de tensão. O sistema linearizado de equações  $Ax=b$  relaciona as grandezas controladoras dos equipamentos de controle de tensão (vetor  $x$ ) com as tensões controladas da rede elétrica (vetor  $b$ ). A matriz de sensibilidade  $[A]$  foi denominada  $[VCS]$ , "*voltage control sensitivity matrix*", é constituída por elementos diagonais que relacionam a grandeza controladora de cada equipamento com a respectiva tensão controlada. Assim, através do sinal desses elementos sabe-se se uma determinada ação de controle será adequada ou não, isto é, se terá o efeito usual e esperado ou o oposto. Os elementos fora da diagonal de uma certa linha representam a sensibilidade das grandezas controladoras dos outros equipamentos com a tensão controlada em análise. Por outro lado, os elementos fora da diagonal de uma coluna qualquer representam a sensibilidade da grandeza controladora do equipamento em foco com a tensão controlada em todas as outras barras. Assim, a matriz também permite avaliar a interdependência existente entre os controles de tensão em um sistema elétrico.

O programa computacional usado para determinação da matriz de sensibilidade dos controles de tensão a princípio foi desenvolvido no ambiente Matlab e, somente então, em linguagem Fortran, sendo denominado AdeConT. Os resultados obtidos pelos dois programas foram comparados e comprovaram a coerência entre os dois casos com aqueles obtidos pela resolução (analítica, iterativa por Newton ou iterativa continuada) das equações de fluxo de carga. A análise de casos de grande porte foi realizada unicamente através da utilização do programa desenvolvido em Fortran.

A dimensão da matriz  $[VCS]$  depende do número de barras de tensão controlada na área do sistema em análise. Como, por construção, é uma matriz cheia, pode ser complexa a análise dos elementos dessa matriz. Assim, a análise modal com

base nos autovalores e autovetores associados à matriz de sensibilidade dos controles de tensão pode ser recomendada. Quando a análise foi utilizada, foi capaz de identificar as barras com tensão controlada apresentando efeito reverso, ou seja, contrário ao esperado.

O cálculo da matriz de sensibilidade dos controles de tensão foi executado de forma extremamente rápida. Portanto, o programa AdeConT, pode ser utilizado de forma eficiente durante a operação em tempo real.

A matriz de sensibilidade permitiu que ações de controle fossem determinadas para mover sistemas de uma região de operação instável, ou próxima à região de instabilidade do controle de tensão, para um ponto de operação seguro. Para isto, no sistema linearizado  $Ax = b$ , o vetor  $b$  foi considerado como sendo o vetor das variações de tensão desejadas nas barras com tensão controlada, enquanto que  $x$  como sendo o vetor contendo as variações necessárias nos controles. A formação explícita da matriz de [VCS] não é necessária, uma vez que a determinação do vetor  $x$  pode ser realizada de forma implícita por meio da matriz Jacobiana expandida ( $J$ ), conforme foi efetuado em [21, 42].

## 6.2 Originalidade

Na literatura, o problema estabilidade de tensão está sempre associado à máxima carga que pode ser alimentada pela rede elétrica. Raramente a questão do controle de tensão ter efeito oposto ao esperado é mencionada.

Assim, existem centenas de artigos que lidam com barras de carga, enquanto que a análise de barras de tensão controlada só é feita em "método da matriz  $[D]$ " [20], resultado de pesquisas do grupo onde essa tese se insere, e o conhecido "método da curva VQ" [3], usado por engenheiros no caso de dificuldade de convergência do algoritmo de fluxo de carga, muito antes do problema de estabilidade de tensão ser conhecido. O grupo de pesquisa citado relatou pela primeira vez a possibilidade de ações de controle de tensão poderem ter efeito

oposto ao esperado em 1990 [23], utilizando gráficos associados a um simplório sistema de 2 barras.

Por outro lado, contraditoriamente, a necessidade de análise de barras de tensão controlada foi reconhecida tão cedo quanto 1978 e 1980 [44, 45]. Traduzindo Tiranuchit e Thomas [32] em 1988: "Os casos reais de blecaute caracterizados por depressões na tensão de acordo com relatos na literatura indicam que os procedimentos práticos usuais como troca de tapes em LTCs, chaveamento de capacitores, ajustes em compensadores síncronos e corte de carga podem agravar um perfil de tensão já instável". Talvez o que tenha retardado a compreensão da importância dessas barras na ocorrência do fenômeno foi o exemplo dado na importante referência [7] de 1989 por Brownell e Clark: "o afundamento da tensão no primário de um LTC, após sucessivas atuações aumentando a tensão no secundário, e assim levando o sistema ao colapso, é um evento normal e não tem a ver com o novo fenômeno em debate".

O grupo de pesquisa citado apresentou um caso real de um compensador estático no NE do sistema brasileiro. No artigo de 2002 (submetido em fevereiro de 1999) [8], os autores listaram a admitância equivalente do compensador e a potência reativa gerada para vários valores de tensão de referência. Observaram-se relações opostas às usuais. Assim, fazia-se necessário um método para verificar o efeito de ações de controle de tensão. Pela primeira vez surgia a idéia de relacionar a grandeza controladora de tensão do equipamento e a tensão controlada.

É interessante notar que em [34] está claramente explicitada a necessidade de uma ferramenta computacional que verifique a eficácia das ações de controle de tensão. No entanto, é uma frase no texto, sem explicações.

Em [38, 43] foram propostos índices que relacionam as grandezas controladoras e as respectivas tensões controladas. As idéias usadas e os principais resultados em sistemas-teste foram apresentados no Capítulo 3. Como era o início da pesquisa, ficou faltando a avaliação de geradores e compensadores síncronos operando juntamente com os outros tipos de equipamentos usados para controlar a tensão e, principalmente, a análise da metodologia de avaliação quando

aplicada a sistemas complexos e de grande porte, como é o caso do SIN (Sistema Interligado Nacional). Além disso, não se tratou da interdependência entre os diversos controles de tensão. Conforme exposto nos Capítulos 4 e 5, a ferramenta computacional desenvolvida neste trabalho, o programa AdeConT, veio a complementar todo o procedimento de avaliação, determinando se uma certa ação de controle de tensão é adequada ou não entre outras aplicações.

O trabalho relatado em [42], de novembro de 2005, analisa com sucesso a interdependência entre as equações que modelam controles e limites no sistema linearizado de equações resolvido a cada iteração do método de Newton para a solução do problema de fluxo de carga. O objetivo é diagnosticar controles conflitantes que possam dificultar ou impedir a convergência do método. Uma matriz de sensibilidade de controles também é obtida a partir da redução do sistema de equações do problema de fluxo de carga aumentado incorporando controles e limites. Nesse trabalho, o método de análise da matriz de sensibilidade de controles tem base no cálculo de autovalores críticos, mais próximos de zero.

O trabalho desta tese e o de [42] têm semelhanças e diferenças nos objetivos, na modelagem e no método de análise. A diferença é que nesta tese deseja-se conhecer o resultado de ações de controle de tensão (após trajetória dinâmica), como ocorreria em situação real. Utilizam-se as equações que relacionam as grandezas controladoras dos diversos equipamentos e as tensões controladas. Em [42] deseja-se estudar se as estratégias de controle de tensão definidas pelos operadores estão corretas ou se há possibilidade de conflito. Utilizam-se as equações que modelam o controle de tensão no problema do fluxo de carga. Assim, as matrizes de sensibilidade dos dois estudos são diferentes. Em ambos os casos, a análise modal pode ser utilizada.

### **6.3 Trabalhos Futuros**

O procedimento realizado neste trabalho consistiu em adotar valores de variação de tensão discretos em conformidade com o valor mínimo possível dos

equipamentos de controle. Porém, falta estabelecer critérios para se determinar o valor máximo do incremento da variação de controle considerando-se a margem de carregamento disponível, segundo o critério de estabilidade de tensão, de forma a evitar que um determinado dispositivo de controle de tensão venha a apresentar controle de tensão reverso, de forma contrária à usual.

A análise do comportamento de outros tipos de equipamentos usados para o controle de tensão deve ser realizada, como por exemplo, o chaveamento de capacitores / reatores por faixa de tensão.

Neste trabalho considera-se somente o caso de um equipamento controlando a tensão em uma barra. Daí a dimensão de [VCS] ser  $(nc \times nc)$ , onde  $nc$  é o número de barras de tensão controlada na área do sistema em análise. Assim,  $nc$  é também o número de equipamentos existentes. O caso de mais de um equipamento controlando a tensão em uma única barra, através da coordenação dos controles, é uma extensão a ser considerada.