

1. Introdução

1.1 Considerações Gerais

O tema “estabilidade de tensão” não é novo, mas ganhou maior importância após a ocorrência de uma série de incidentes em vários países. Este fenômeno está intimamente ligado à indisponibilidade de potência reativa junto aos centros consumidores de carga. Os grandes fluxos de potência reativa que percorrem os ramos de transmissão são causadores do problema. Por esta razão, os centros de carga compensados capacitivamente também podem levar o sistema ao colapso [1].

O fenômeno estabilidade de tensão veio a fazer parte do dia-a-dia de engenheiros de inúmeras empresas no mundo devido ao uso mais intenso das redes de transmissão, sub-transmissão e distribuição de energia elétrica existentes [2]. Os principais fatores que resultam em sistemas elétricos altamente carregados são: a falta de investimento em linhas de transmissão, limitados por restrições ambientais e/ou incertezas econômicas; e o próprio aumento na demanda de energia elétrica.

A necessidade de se operar os sistemas elétricos nessas condições faz com que sejam vulneráveis a problemas de estabilidade de tensão. Alguns exemplos de ocorrências de colapso de tensão são descritos em [3, 4]:

- 22 de setembro de 1970 em Nova York, EUA;
- 19 de dezembro de 1978 na França;
- 04 de agosto de 1982 na Bélgica;
- 28 de dezembro de 1982 na Flórida, EUA;
- 27 de dezembro de 1983 na Suécia;
- 30 de novembro de 1986 no SE Brasil / Paraguai;
- 12 de janeiro de 1987 na França;
- 23 de julho de 1987 no Japão;
- 05 de julho de 1990 em Baltimore e Washington, EUA;

- 17 de janeiro de 1994 na área do WSCC, EUA
- 14 de dezembro de 1994 na área do WSCC, EUA
- 02 de julho de 1996 na área do WSCC EUA
- 10 de agosto de 1996 na área do WSCC, EUA
- 24 de abril de 1997 no Sistema S-SE, Brasil

Como consequência, os termos “estabilidade de tensão”, “colapso de tensão” e “segurança de tensão” estão surgindo freqüentemente na literatura e em discussões de planejamento e operação do sistema.

Estabilidade de tensão é definida como sendo a capacidade de um sistema elétrico em manter tensões aceitáveis em todas as barras da rede sob condições normais e após ser submetido a distúrbios [5]. Um sistema entra num estado de instabilidade de tensão quando uma perturbação, um aumento na demanda de carga, ou outro tipo de alteração nas condições do sistema, causa um declínio progressivo e incontrolável na tensão.

O risco de colapso de tensão está ligado a distúrbios que enfraquecem o controle local de tensão, como por exemplo, a perda de geradores; problemas que tornam o sistema de transmissão vulnerável, como por exemplo, as faltas em linhas e em barras; perdas que provocam o aumento da potência transmitida na rede devido ao controle primário de potência ativa, perda de geradores e seções da rede. Qualquer um desses eventos pode levar a perda parcial ou total (blecaute) de uma rede propensa a problemas de estabilidade de tensão.

1.2 Relevância do Trabalho

A seguir, são reproduzidas algumas informações selecionadas da literatura que ilustram a relevância do tema do trabalho desenvolvido:

- Nas empresas onde tanto o pessoal responsável pelo planejamento como pela operação estão conscientes do risco de instabilidade de tensão, uma ou mais dentre várias técnicas analíticas são usadas para avaliar o risco de

colapso de tensão e a margem entre o ponto de operação pós-contingência e o ponto de colapso de tensão [6].

- Uma revisão dos problemas ocorridos no Japão, Canadá, Suécia, França e Estados Unidos indicam claramente que o problema de estabilidade de tensão é real e que o pior ainda está por vir [7].
- O desconhecimento de que o fenômeno estabilidade de tensão é mais uma restrição no dimensionamento e localização de novas fontes de geração de energia elétrica e de compensação de potência reativa, pode resultar em desperdício de investimentos, como, por exemplo, constroem-se fontes grandes demais, incompatíveis com o sistema de transmissão e / ou distribuição. Já se conhecem casos no Brasil [8].
- O problema de estabilidade de tensão não é restrito a sistemas de transmissão. Os resultados apresentados em [9] mostram a necessidade de se considerar esse fenômeno também em sistemas de distribuição de energia elétrica.
- Ações de controle de tensão mal sucedidas podem levar o sistema ao colapso. A referência [10] aponta o OLTC como um dos elementos com maior participação na instabilidade de tensão. Em [11] é investigado o colapso de tensão causado por OLTCs. Em [12] e [13], é estudado o controle reverso de OLTCs.
- O início do problema que ocasionou o blecaute no sistema elétrico brasileiro em abril de 1997 surgiu em uma barra com tensão controlada por compensadores síncronos. Esse evento é analisado neste trabalho.

A potência reativa requerida por um sistema elétrico é fornecida e / ou controlada por fontes reativas disponíveis que incluem geradores síncronos, compensadores estáticos (SVC), linhas de transmissão, transformadores, capacitores e reatores. Algumas vezes, entretanto, condições de operação atuais ou projetadas, assim como a ocorrência de uma variedade de contingências, pode causar violações nos limites de tensão, as quais não podem ser restabelecidas em consequência

da saída de fontes reativas existentes [14]. Nestas situações, novas fontes de energia reativa devem ser instaladas.

O uso de programas de fluxo de potência ótimo tem sido considerado, com o objetivo de buscar a utilização máxima das fontes reativas existentes, bem como para a seleção da melhor localização e dimensão das fontes reativas adicionais, minimizando custos. Outro importante objetivo no planejamento da operação associada à potência reativa é a melhor utilização dos sistemas de transmissão e distribuição existentes, devido ao seu grande nível de carregamento [8,14]. Portanto, a sustentação de um perfil de tensão aceitável no sistema como um todo, durante condições normais e após ser submetido a perturbações, é de importância fundamental. Sérios incidentes ocorridos em grandes sistemas elétricos têm dado uma indicação de como os desastres ocorrem quando a rede é propensa a condições de perturbação que conduzem à perda de estabilidade de tensão [15].

Um sistema é considerado inseguro quanto à tensão, se qualquer contingência possível causar violação de critérios de estabilidade de tensão (*VS – Voltage Stability*) [16]. Empresas diferentes têm critérios de VS diferentes e necessidades diferentes para a avaliação da estabilidade de tensão (*VSA – Voltage Stability Assessment*) em tempo-real. Estes critérios podem especificar as margens de segurança exigidas em termos de aumento de carga, aumento de transferência ou outro parâmetro-chave do sistema, assim como também reservas reativas exigidas em partes (zonas) diferentes do sistema. Os distúrbios ocorridos em 1996 na área da WSCC deram origem a definições de políticas e critérios para lidar com o problema [17].

O risco de instabilidade de tensão tem levado pesquisadores do mundo todo a desenvolver técnicas analíticas para se avaliar as condições de carregamento da rede de transmissão e assim poder evitar colapsos no fornecimento de energia elétrica. Algumas das ferramentas desenvolvidas para esta avaliação, estão presentes no uso diário da operação de sistemas complexos e de grande porte.

O pacote de *VSA on-line* deve determinar a segurança de tensão do sistema em sua dada condição. Se o sistema se encontra inseguro quanto à tensão para

qualquer contingência possível, devem ser buscadas ações de controle preventivas ou corretivas para melhorar a segurança de tensão do sistema. De acordo com a referência [16], onde são apresentados requisitos globais para a avaliação da estabilidade de tensão, a VSA *on-line* deve validar a eficácia das ações de controle.

Um sistema enquanto estável, sob o ponto de vista de tensão, pode ser analisado em regime permanente e, portanto, fica passível de uma análise estática. A referência [18] recomenda métodos de análise para o planejamento dos sistemas elétricos baseados em modelos estáticos. Em [19] é mostrada uma ferramenta de análise estática do carregamento da rede de transmissão para uso em estudos operacionais.

1.3 Objetivos do Trabalho

Um dos objetivos estabelecidos para o desenvolvimento deste trabalho foi a construção de um programa computacional capaz de determinar a adequação ou não de ações de controle de tensão, relacionando as grandezas efetivamente usadas para controlar a tensão com a tensão a ser controlada. Outro objetivo estabelecido foi que através da mesma ferramenta também seja possível avaliar a interdependência entre os controles, indicando além do efeito do controle sobre a tensão da própria barra controlada, a influência do mesmo controle sobre as outras barras com tensão controlada do sistema.

O principal objetivo do trabalho desenvolvido foi elaborar um programa computacional capaz de apontar as ações de controle de tensão necessárias para se obter um novo ponto de operação, onde a lógica de controle para cada equipamento, sentido usual ou oposto, fosse levada em consideração.

A eficiência computacional do programa para aplicação em tempo real a sistemas complexos e de grande porte, também constituiu um dos objetivos deste trabalho.

1.4 Estrutura do Trabalho

No Capítulo 2 é mostrada uma abrangente ferramenta de avaliação do carregamento da rede de transmissão [19], composta de índices obtidos a partir da matriz Jacobiana do sistema. Também são definidos índices, que estabelecem a margem de carregamento do sistema. Estes índices permitem identificar caminhos de transmissão críticos que são associados às barras consideradas como sendo críticas. O reforço das condições de estabilidade de tensão é realizado, considerando-se os ramos mais carregados entre os caminhos de transmissão críticos anteriormente determinados.

No Capítulo 3 são mostrados exemplos numéricos, nos quais ocorre o funcionamento usual e / ou reverso dos equipamentos de controle de tensão aplicados a sistemas de pequeno porte para fins demonstrativos. Neste mesmo capítulo, os índices que verificam a adequação das ações de controle de tensão são apresentados. Estes índices relacionam a grandeza física efetivamente usada para controlar a tensão e a tensão a ser controlada.

No Capítulo 4 apresenta-se a matriz de sensibilidade dos controles de tensão [VCS]. São realizados exemplos numéricos aplicados a sistemas testes de pequeno e médio porte, e sistema reais de grande porte. São considerados pontos de operação com e sem problemas de estabilidade de tensão. Neste capítulo, também se aplica uma análise modal à matriz [VCS]. A avaliação da eficiência computacional da aplicação do método proposto em tempo real também é feita neste capítulo.

No Capítulo 5 são feitos exercícios numéricos com sistemas testes de pequeno e médio porte, onde é demonstrada a capacidade de se obter um novo ponto de operação através da metodologia proposta neste trabalho. As considerações finais, originalidade da tese e, sugestões para desenvolvimento de trabalhos futuros, são apresentadas no Capítulo 6.