

2

Diretrizes e Critérios de Segurança Relativos à Estabilidade de Tensão

Um estudo de estabilidade de tensão deve contemplar os diversos aspectos característicos do sistema. As diretrizes e os critérios para estes estudos elétricos resultam da experiência em estudos elétricos realizados pelo operador e são constantemente revistos, ampliados e modificados com base na evolução das técnicas de planejamento, projeto e operação dos sistemas, bem como na legislação e regulamentação vigentes. Essas diretrizes e critérios devem ainda ser compatíveis com os padrões de desempenho e requisitos mínimos para instalações e gerenciamento de indicadores de desempenho, também requisitos técnicos mínimos para a conexão à rede básica. No caso do ONS [2] as diretrizes e critérios para estudos de segurança de tensão são:

- Os dados para os estudos de segurança de tensão são os constantes nos bancos de dados.
- Define-se a margem de segurança de tensão (MST) como a distância mínima para um ponto de operação do sistema onde há risco de instabilidade de tensão.
- Um sistema elétrico é considerado seguro em relação à tensão quando, para uma dada condição operativa, a MST e os níveis de tensão pré-contingência e pós-contingência encontram-se em conformidade com os critérios estabelecidos.
 - De forma geral, técnicas estáticas devem ser utilizadas na definição de margens de segurança, na seleção de contingências críticas e na identificação de áreas e controles críticos. Simulações no domínio do tempo devem confirmar as margens de segurança apontadas pela análise estática e estudar a interação entre controles.

- Para a avaliação de segurança de tensão, ferramentas estáticas e programas de simulação no domínio do tempo devem ser utilizados de forma complementar. O sucesso dessa avaliação depende não só do entendimento do mecanismo como também da proximidade da instabilidade de tensão.
- Deve-se observar a consistência entre critérios e métodos da avaliação de segurança de tensão, nas áreas de planejamento da operação e de tempo real. Enquanto as duas abordagens podem examinar diferentes cenários e requerer diferentes margens de segurança, é importante que os procedimentos e modelos estejam consolidados para que os resultados obtidos possam ser comparados.
- Durante o processo de incremento de carga em uma área estudada, o fator de potência deve ser mantido constante. Escolhe-se, então, o redespacho necessário, para fazer frente ao crescimento de carga, em grupos de geradores que provoquem carregamento no sistema de suprimento mais crítico.
- A carga do tipo motor de indução deve ser, sempre que possível representada nas análises estática e dinâmica de segurança de tensão. Na impossibilidade dessa modelagem, o percentual da barra de carga, estimado como motor de indução deve ter suas parcelas de carga ativa e reativa representadas, respectivamente, com corrente e impedância constantes.
- No âmbito do planejamento que envolve tanto os estudos de ampliações e reforços, a avaliação de segurança de tensão deve ter como finalidade principal propor soluções que desativem os esquemas de controle de segurança em operação.
- Os estudos de planejamento da operação devem definir limites operativos e avaliar a necessidade de SEP, a fim de garantir a segurança de tensão.
- Em tempo real, a avaliação de segurança de tensão deve cobrir situações não previstas na fase de planejamento da operação e evitar a operação na região onde esquemas de controle de emergência precisem ser ativados.

- No âmbito de planejamento que envolve tanto os estudos de ampliações e reforços quanto de planejamento da operação, os estudos de segurança de tensão devem determinar margens de segurança considerando rede completa e rede incompleta, seja pelas incertezas presentes nesses horizontes, seja pela necessidade de previsão de manutenção de elementos ou recursos importantes da rede. Em tempo real, uma vez que o estado e a topologia do sistema são conhecidos, pode ser necessário um número menor de cenários e uma menor margem de segurança de tensão.
- A segurança de tensão é tradicionalmente avaliada por meio de métodos determinísticos. Contudo, métodos de avaliação probabilísticos podem ser necessários em função do aumento da complexidade do sistema ou do grau de incertezas.
- As diferentes características de suprimento, de modelagem e de recursos entre as áreas do SIN podem implicar necessidades que justifiquem a adoção de critério particular para a definição de margens mais seguras nos estudos de segurança de tensão.
- Como critério geral, as margens de segurança de tensão para os estudos de ampliações e reforços e de planejamento da operação são de 7% e 4%, nas análises com rede completa e incompleta, respectivamente. Em tempo real, uma margem de 4% deve ser a meta.
- Na impossibilidade de avaliação da segurança de tensão em tempo real, as margens de segurança e as recomendações dos estudos de planejamento da operação devem ser adotadas, através de instruções de operação, a fim de possibilitar uma segura monitoração por parte dos operadores do sistema.

2.1. Modelagens de Carga nas Análises Estática e Dinâmica

O sistema deve ser analisado para as condições de carga e de geração que são pertinentes ao objetivo da avaliação, entre as quais, carga pesada, média, leve e mínima, e, quando seja necessário, podem ser analisadas outras condições de carga

para horários e/ou dias específicos. Em regime permanente, as cargas devem ser representadas, em regra geral, com 100% de potência constante para a parte ativa e reativa. Entretanto, podem ser representadas com percentuais variáveis de potência (P), impedância (Z) e corrente (I) constantes, para adequarem-se aos objetivos específicos de cada estudo. As cargas com características especiais, como as cargas da indústria de alumínio e de motores de indução, podem ser modeladas nos estudos de fluxo de potência, de modo a facilitar sua inicialização nos estudos de estabilidade eletromecânica.

Os estudos de fluxo de potência devem abranger, além da condição operativa normal, análise de contingências de linhas, transformadores e outros equipamentos do sistema elétrico, com o objetivo de se definirem ações para que o SIN opere sem perda de carga e sem violações inadmissíveis dos limites de tensão e de carregamento.

Na análise de contingências nos estudos de ampliações e reforços, o desempenho elétrico deve ser verificado nas seguintes situações:

- Imediatamente após o desligamento de elemento(s) do sistema, quando se considera a atuação da regulação de tensão em barras controladas por unidades geradoras, compensadores síncronos e estáticos, e após a atuação dos tapes de transformadores com comutação sob carga que operem no modo automático.
- Quando a situação antes da atuação dos tapes de transformadores com comutação sob carga que operem no modo automático implicar em corte de carga, essa situação deverá ser considerada na análise; e após a atuação dos controles automáticos, quando deve ser considerada a viabilidade de adoção de medidas operativas que dependem da ação humana, tais como:
 - o chaveamento de capacitores e/ou reatores;
 - a alteração de tensão de referência de unidades geradoras, compensadores síncronos e estáticos;
 - a alteração de ângulo nos transformadores defasadores;
 - o redespacho de potência ativa em unidades geradoras;
 - o remanejamento da carga.

Na análise de contingências nos estudos de planejamento e programação da operação elétrica, pré-operacionais e de comissionamento, o desempenho elétrico deve ser verificado nas seguintes situações:

- Imediatamente após o desligamento de elemento(s) do sistema, quando se considera apenas a atuação da regulação de tensão em barras controladas por unidades geradoras, compensadores síncronos e estáticos, e do SEP pertinentes;
- Após a atuação dos tapes de transformadores com comutação sob carga que operem no modo automático; e no instante em que são consideradas as medidas operativas que dependem da ação humana, tais como:
 - o chaveamento de capacitores e/ou reatores;
 - a alteração da tensão de referência de unidades geradoras, compensadores síncronos e estáticos;
 - redespacho de potência ativa em unidades geradoras;
 - o remanejamento de carga;
 - a alteração da potência transferida através de elos de corrente contínua;
 - a separação de barramentos;
 - a alteração de tapes de transformadores com comutação sobcarga que operem no modo manual;
 - a alteração de ângulo nos transformadores defasadores.

Também devem ser simuladas contingências simples, ou seja, a perda de um único elemento do sistema elétrico seja linha de transmissão, transformador, banco de transformador, unidade geradora, elo de corrente contínua (CC) ou equipamento de controle de tensão, tal como reator, capacitor, compensador síncrono ou compensador estático. Na análise de contingências devem ser consideradas também as saídas de linhas de transmissão de circuito duplo e as saídas simultâneas de linhas de transmissão de circuito simples que compartilhem a mesma faixa de passagem, ou que atravessem regiões onde há ocorrência de fenômenos naturais e/ou queimadas que possam atingi-las, ou ainda por perdas de seções de barras em subestações, devendo-se ponderar as condições:

- A contingência apresentar evidência estatística de ocorrência;
- A análise de contingências identificarem um nível de consequência inadmissível ao SIN e à sociedade, previamente quantificado no escopo dos estudos, caracterizando, pelo menos, um dos seguintes aspectos:
 - instabilidade de potência, frequência ou tensão numa região geográfica (Norte, Nordeste, Sul, Sudeste e Centro-Oeste);
 - nível de interrupção de carga, abrangência da interrupção (SIN, região geográfica, unidade da federação, capital, polo industrial), população afetada, ou possibilidade de danos a equipamentos.

Nos estudos de programação de intervenções em instalações da rede de operação, devem ser consideradas:

- Perda de um único elemento do sistema elétrico (linha de transmissão, transformador ou outro equipamento);
- Saída simultânea dos dois circuitos das linhas de transmissão que compartilham a mesma torre (circuito duplo), quando essa contingência apresentar evidência estatística de ocorrência e provocar, pelo menos, um dos seguintes eventos:
 - instabilidade de potência, frequência ou tensão numa região geográfica (Norte, Nordeste, Sul, Sudeste e Centro-Oeste);
 - interrupção de carga superior a 30% do valor previsto para a carga média, respeitando o valor máximo de 1000 MW em áreas metropolitanas de capitais, ou superior a 25% do valor previsto para carga média, respeitando o valor máximo de 1500 MW em estados da federação, ou superior a 100 MW em polos industriais;
 - atuação do esquema regional de alívio de carga ERAC numa região geográfica (Norte, Nordeste, Sul, Sudeste e Centro-Oeste); em casos excepcionais poderá ser admitida a atuação de até dois estágios do referido esquema;

- restrição nas transferências energéticas que ponha em risco o atendimento de uma região geográfica, unidade da federação ou capital.

Nos estudos de planejamento e programação da operação elétrica podem ser consideradas contingências múltiplas em situações conjunturais. Essas situações são caracterizadas por eventos, acontecimentos e/ou datas comemorativas de grande repercussão pública, de abrangência nacional, regional ou local, e situações especiais do próprio SIN, de acordo com a Resolução CMSE4 nº 001, de 25 de janeiro de 2005, e a regulamentação sucedânea. Nos estudos de ampliações e reforços deve ser avaliada a necessidade de compensação reativa shunt onde a abertura de linhas é usada de forma sistemática para o controle adequado de tensão ou nas situações onde essas aberturas de linhas possam comprometer a confiabilidade e a segurança do SIN.

Na segurança sistemática, o desempenho do sistema deve ser tal que, ao longo do horizonte de estudo, não haja violação dos critérios estabelecidos neste capítulo e a conseqüente necessidade de corte de carga provocada pela ocorrência de contingências simples (critério n-1), e pelas perdas duplas e saídas simultâneas descritas nos itens anteriores deste capítulo. Em situações excepcionais, devidamente fundamentadas em análise técnica ou técnico-econômica e previamente autorizadas pelo poder concedente ou pela ANEEL, poderão ser utilizados critérios mais restritivos ou menos restritivos. Essas situações excepcionais estão relacionadas, mas não restritas, a:

- Cenários energéticos desfavoráveis, conforme as avaliações eletroenergéticas conduzidas no âmbito do programa mensal de operação e suas revisões semanais, da programação elétrica mensal, e das diretrizes da operação elétrica quadrimestral;
- Restrições do sistema de transmissão vigente para integração de sistemas elétricos isolados ao SIN;
- Suprimento a cargas a través de sistemas de transmissão radiais singelos ou de um único transformador.

O critério mais restritivo ou menos restritivo a ser adotado, seu contexto e seu período de aplicação devem ser explicitados em nota técnica a ser submetida à autorização do poder concedente ou da ANEEL.

Os limites de tensão a serem observados nos estudos elétricos para a condição operativa normal e para condição operativa de emergência se encontraram na Tabela 2.1. As faixas operativas mais adequadas de tensão (diretrizes operativas) são definidas pelos estudos de planejamento a programação da operação elétrica e pelos estudos pré-operacionais, e devem observar os limites da Tabela 2.1 e respeitar as limitações específicas informadas pelos agentes.

Tabela 2.1: Tensões entre Fases Admissíveis a 60 Hz.

| Tensão nominal de operação ⁽¹⁾ | Condição operativa normal | | Condição operativa de emergência | |
|---|---------------------------|-------------------|----------------------------------|-------------------|
| | kV | pu ⁽²⁾ | kV | pu ⁽²⁾ |
| ≤ 138 | - | 0,95 a 1,05 | - | 0,90 a 1,05 |
| 230 | 218 a 242 | 0,95 a 1,05 | 207 a 242 | 0,90 a 1,05 |
| 345 | 328 a 362 | 0,95 a 1,05 | 311 a 362 | 0,90 a 1,05 |
| 440 | 418 a 460 | 0,95 a 1,046 | 396 a 460 | 0,90 a 1,046 |
| 500 | 500 a 550 | 1,00 a 1,10 | 475 a 550 | 0,95 a 1,10 |
| 525 | 500 a 550 | 0,95 a 1,05 | 475 a 550 | 0,90 a 1,05 |
| 765 | 690 a 800 | 0,90 a 1,046 | 690 | 0,90 a 1,046 |

(1) Valor eficaz de tensão pelo qual o sistema é designado.

(2) Valores em pu tendo como base a tensão nominal de operação.

2.2. Método e Critérios Estabelecidos para Estudos de Estabilidade de Tensão no Sistema Interligado Brasileiro [2].

2.2.1. Estabelecimento do Método para Estudos de Estabilidade de Tensão.

Um estudo de estabilidade de tensão deve contemplar os diversos aspectos característicos do sistema. Primeiramente, uma análise estática deve ser feita abordando pesquisas de margens de operação e análises de sensibilidade.

Com este tipo de análise se faz o levantamento das curvas tipo PV e VQ, além de empreender estudos de otimização de casos base de fluxo de potência para determinadas funções objetivo, que caracterizam estudos de estabilidade de tensão.

A abordagem seguinte é uma análise modal, para que se conheçam os autovalores críticos do sistema, determinando o comportamento de cada um, e realizando uma análise de sensibilidade para estabelecer indicações de soluções de diversas naturezas nos barramentos e nos equipamentos mais adequados. E, por último, uma análise dinâmica deve ser feita, com simulações no domínio do tempo, reproduzindo cronologicamente o fenômeno da instabilidade de tensão, e permitindo testar as soluções encontradas nas análises de sensibilidade estática e modal.

2.2.1.1. Análise Estática

2.2.1.1.1. Levantamento de Curvas PV

Este tipo de curva permite definir margens de carregamento do sistema que está sendo abordado. É necessário realizar um estudo abrangente, incluindo várias direções de crescimento de carga e grandezas desta mesma, para que as curvas tenham consistência.

2.2.1.1.2. Levantamento de Curvas VQ

Este tipo de curva estabelece duas margens, uma de carregamento, e outra de capacidade máxima de carga reativa na barra.

O levantamento de curvas VQ deve ser feito para as principais barras da área de foco, entendendo-se como barras principais, aquelas que apresentam as maiores variações de tensão para pequenas variações nas condições do sistema.

2.2.1.1.3. Fluxo de Potência Ótimo

Os programas de otimização aplicam-se de maneira especial em estudos de estabilidade de tensão. É necessário ter, antes de iniciar qualquer estudo com esta ferramenta, uma base de dados abrangente e consistente para permitir confiabilidade nos resultados uma vez que estes programas podem ter um alto nível de sensibilidade, nos quais qualquer pequena modificação na massa de dados podem causar diferenças significativas nos resultados.

2.2.1.2. Análise Modal do Problema de Fluxo de Potência

A análise modal se divide em várias etapas. Primeiramente é necessário fazer uma pesquisa na área de interesse para descobrir se há modos críticos e, caso existam, quais são. Uma vez que esta é uma análise linear e, portanto, válida apenas “em torno” do ponto analisado, deve-se iniciar a análise modal nas situações mais críticas, nos pontos mais próximos de máximo carregamento.

Após a identificação dos modos críticos, deve-se iniciar análise de sensibilidade, com objetivo de se estabelecer os barramentos mais críticos associados a estes modos, e com a indicação de onde é mais eficaz a instalação de equipamentos de controle de tensão e/ou equipamentos *FACTS*.

As soluções encontradas devem ser testadas no sistema através de simulações, em ferramentas não lineares de fluxo de potência e de análise dinâmica e, assim, proceder aos ajustes que possam vir a ser necessários.

2.2.1.3. Análise Dinâmica

As simulações no domínio do tempo são de grande utilidade, pois reproduzem cronologicamente o fenômeno da instabilidade de tensão e permitem testar as soluções encontradas nas análises estática e modal.

Estas simulações podem ser de médio e de longo termo, o que compreende de um a dezenas de minutos, incluindo a representação dinâmica de *LTCs*, o crescimento da carga de qualquer área e a tomada de carga pelas usinas arbitradas.

2.2.1.4. Representação da Carga

Dentro das faixas de tensão operativas, a representação da carga como “potência constante” é válida, descrevendo com precisão o comportamento da carga. Conforme se aumenta a carga e se verifica que as tensões venham a cair, esta representação vai deixando de ser adequada. É necessário, portanto, conhecer o perfil da carga para poder representá-la adequadamente. No caso de não se representar os transformadores da distribuição, deve-se estipular um valor mínimo de tensão, abaixo do qual se considera esgotado os *LTCs*, passando-se a representar a carga com um modelo dependente da tensão.

Na impossibilidade de se representar “motores de indução” no estudo, mas tendo-se noção do percentual deste tipo de carga ativa ao longo dos barramentos, devem-se estipular dois valores de tensão, a saber: a) valor abaixo do qual é necessário alterar o fator de potência a cada aumento da carga; b) valor abaixo do qual se considera o motor “estolado” e, conseqüentemente, fora de operação.

2.2.1.5. Nível de Contingência:

Para que um estudo de estabilidade de tensão seja abrangente, é necessário cobrir as mais variadas condições operativas. Deve-se, portanto, realizar as análises estática, modal e dinâmica para as condições normais de operação em todos os patamares de carga. .

As contingências consideradas nos estudos de planejamento da operação contemplam a situação de um elemento fora de operação (critério n-1). No entanto, para estudos de estabilidade de tensão, pode ser necessário cobrir cenários mais desfavoráveis, tais como: contingência simples com contingência prévia e reajuste do sistema (n-1); contingência dupla (n-2); contingência múltipla provável.

Estas situações devem ser analisadas em estudos de planejamento da operação de forma a fornecer valores de margens e de limites operativos mais realistas para, dentre outros objetivos, dar subsídios à operação em tempo real.