

6

Cálculo de Ações de Controle para Reforço das Condições de Segurança de Tensão

6.1

Introdução

O fenômeno de estabilidade de tensão é causado pelo excesso de transmissão de potência ativa e reativa que saem ou chegam a certas barras. Como consequência, ações de controle de tensão podem ter efeito oposto ao esperado. As barras de tensão controlada onde isso ocorre são denominadas críticas. Nesse trabalho, são consideradas as barras cujo controle de tensão deve-se à geração variável de potência reativa de geradores e compensadores síncronos.

Uma vez que a avaliação do carregamento da rede de transmissão detectou uma barra de carga crítica em um determinado ponto de operação, a função “reforço” consiste do cálculo de ações de controle para aumentar a distância entre o ponto de operação e o novo máximo permitido.

Uma barra de carga pode receber potência de mais de um caminho de transmissão. Por exemplo, é mostrado na Figura 6.1, dois geradores distintos nas barras m e n conectados por duas linhas de transmissão distintas a uma única barra de carga i . À medida que a carga cresce, toda a geração necessária vem de um único gerador carregando um único caminho de transmissão. A potência transmitida por esse caminho chega ao máximo. Obviamente que a carga pode continuar a crescer, desde que a potência passe a ser produzida no outro gerador e, conseqüentemente, a fluir pelo outro caminho de transmissão.

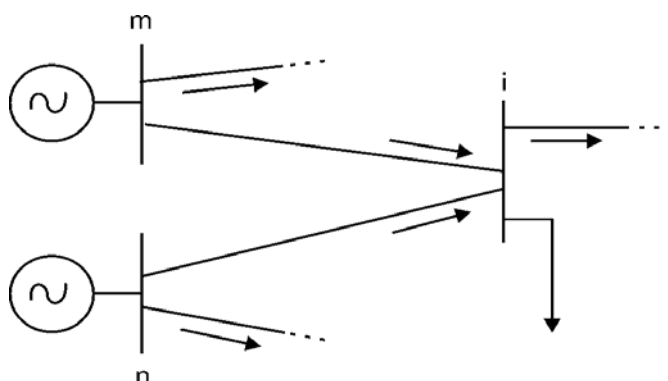


Figura 6.1 - Parte da Rede no Entorno da Barra i

Nas Figuras 6.2a e 6.2b estão mostrados dois sistemas diferentes que supostamente estão muito carregados. A barra m é a barra em análise. Intuitivamente, pode-se afirmar que no 1º sistema não há nenhum "esforço" (queda do módulo de tensão e aumento da defasagem angular) em se transmitir 100 MW para a barra j dado que a reatância do ramo m-j é "pequena" e, portanto, o caminho de transmissão está carregado porque é necessário transmitir 99 MW através do ramo j-i com reatância "grande". Já no 2º sistema, todo o esforço é em se transmitir 100 MW para a barra j dado que a reatância do ramo m-j é "grande" e, não há nenhuma dificuldade em transmitir 1 MW através do ramo j-i com reatância "pequena". Logo, o caminho de transmissão está carregado por causa do fluxo de potência no ramo m-j.

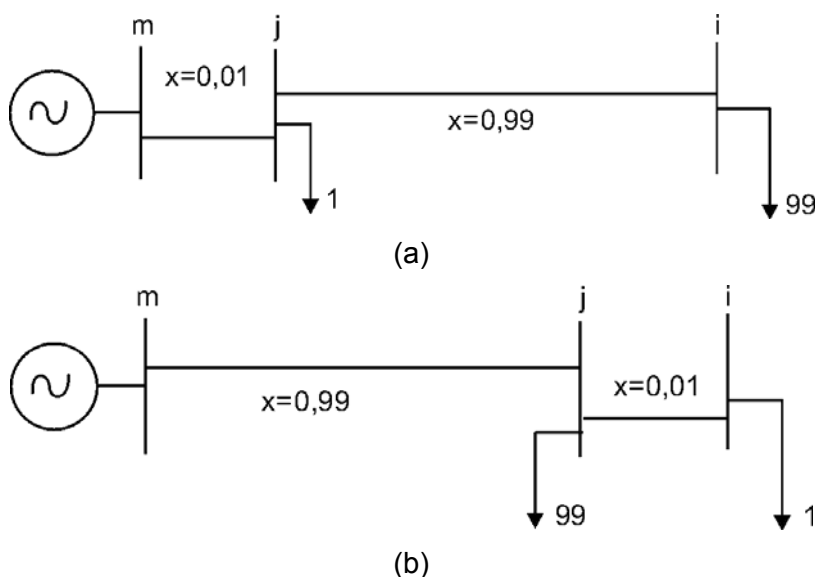


Figura 6.2 - Sistemas Diferentes Alimentando a Mesma Carga

Na Figura 6.3 é mostrado um caminho de transmissão de potência ativa genérico entre um gerador m e a barra de carga i e são mostradas as direções de fluxos de potência ativa e reativa, inclusive em suas barras intermediárias. É fácil

perceber que cada ramo pode transmitir quantidades bem diferentes de potência. Então, se o caminho de transmissão está muito carregado, deve-se determinar qual é o ramo responsável.

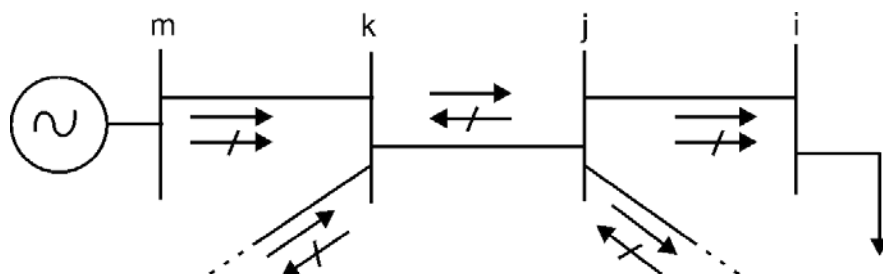


Figura 6.3 - Caminho de Transmissão Genérico

Para determinar-se analiticamente o ramo de transmissão crítico da Figura 6.3, considere o sistema radial que inclui as barras i, j, k, m. A idéia é analisar o esforço de se transmitir potência a partir da barra do gerador m para a barra k, depois para a barra j e, finalmente até a barra i. Na Figura 6.4 estão traçadas as curvas SV para três redes: i) a que inclui as barras m e k, cujo ponto de máximo carregamento tem coordenadas (S_k^c, V_k^c) ; ii) a que inclui as barras m, k e j, cujo ponto de máximo carregamento tem coordenadas (S_j^c, V_j^c) e; iii) a que inclui as barras m, k, j e i, cujo ponto de máximo carregamento tem coordenadas (S_i^c, V_i^c) . Se as "distâncias elétricas" entre as barras m e k, m e j, m e i, aumentam, tem-se que $S_k^c > S_j^c > S_i^c$ e que $V_k^c > V_j^c > V_i^c$. Assim, é maior a dificuldade de se transmitir potência para a barra i do que para a barra j; e é maior a dificuldade de se transmitir potência para a barra j do que para a barra k. É o caso, por exemplo, quando as três linhas de transmissão são linhas-série; a cada ramo incluído mais "distante" fica a geração da carga. No entanto, se os três ramos de transmissão forem diferentes, por exemplo, um transformador elevador de tensão, uma linha de EAT com compensação série e paralelo, e um transformador abaixador, além de compensação *shunt* na barra de carga, não necessariamente ocorrem as relações de desigualdades mencionadas. Sabe-se, por exemplo, que um capacitor em paralelo aumentaria a capacidade de transmissão se elevasse a tensão. É necessário então determinar o ramo que torna a transmissão de potência mais difícil. O procedimento é apresentado a partir da próxima seção. Como dito, inclui-se um ramo de cada vez a partir do gerador crítico até chegar na barra de carga final. Comparam-se as margens na

barra de geração crítico quando da adição de cada ramo. O crítico é aquele que quando adicionado resultou na menor margem de potência.

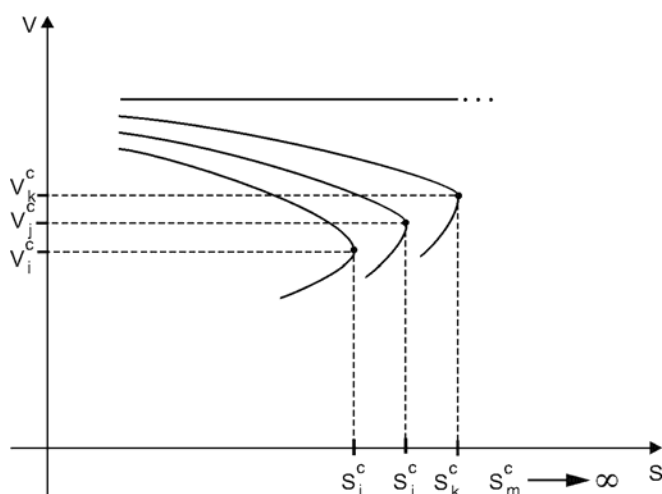


Figura 6.4 - Curvas SV para Diferentes Segmentos da Rede

A idéia então é, uma vez detectada uma barra de carga crítica, verificar os diferentes caminhos de transmissão existentes, identificar um ou mais caminhos muito carregados, redirecionar o fluxo de potência destes para outros caminhos menos carregados. Inicialmente pode-se optar por redirecionar os fluxos por redespacho de potência reativa e, depois, se necessário, por redespacho de potência ativa.

O método envolve a utilização em seqüência dos programas computacionais ANAREDE [CEPEL, 1999] que executa o fluxo de carga e encontra o ponto de operação, EstabTen que faz avaliação estática das condições nodais de carregamento, CaTrans [R.B. Prada, E.G.C. Palomino, L.A.S. Piloto, A. Bianco, 2005] que determina os caminhos e ramos de transmissão mais carregados a partir da carga e o FLUPOT [CEPEL, 2000] usado para diminuir o fluxo de potência em ramos de transmissão críticos através do redespacho de potência reativa e, se necessário, ativa. Atualmente, a versão do EstabTen encontra-se acoplada ao pacote do ANAREDE. Neste trabalho, o programa CaTrans é estendido para determinar os caminhos e ramos de transmissão mais carregados a partir de geradores e compensadores síncronos.

As margens mínimas propostas como critérios de parada do processo iterativo de reforço de tensão estão baseados na taxa média de crescimento anual da carga nos últimos 10 anos, nos erros médios históricos de previsão de carga (diferença entre o valor previsto e verificado), no âmbito do planejamento, e no

atraso de obras de um ano (já que, normalmente, a data de entrada em operação das obras é referente ao mês anterior ao de máxima demanda anual e um atraso normal de meses desta obra significa a não entrada no período crítico). Outro aspecto levantado é o próprio valor de demanda considerado nos estudos. Os critérios aqui apresentados somente se aplicam a uma análise estática. Assume-se que o sistema seja estável sob o ponto de vista de estabilidade angular.

6.2

Identificação da Sub-Rede

O primeiro procedimento é determinar, na rede inteira, a porção da rede de transmissão realmente utilizada para transmitir potência ativa do gerador crítico até as barras de carga. Os seguintes passos estão envolvidos para a execução dessa idéia:

- a) Para achar a sub-rede basta verificar o sinal dos fluxos de potência ativa. As barras “j” conectadas à barra crítica de geração i de potência ativa pertencem à sub-rede se $P_{ij} > 0$. A barra k conectada a barra “j”, pertence à sub-rede se $P_{jk} > 0$. A barra “ℓ” conectada à barra “k”, pertence à sub-rede se $P_{kℓ} > 0$. A busca acaba quando o fluxo de potência ativa chega às barras de carga “m”, onde o fluxo de potência ativa não tem outro lugar para ir, exceto ser consumida pela própria carga. A sub-rede está determinada.
- b) Para isolar a sub-rede do resto da rede é necessário transformar em admitâncias os fluxos de potência ativa que entram à sub-rede a partir dos nós intermediários, assim como os fluxos de potência reativa que deixam e que chegam à sub-rede nos nós intermediários. Por definição da sub-rede, não há fluxos de potência ativa saindo nela. Tem-se agora um sistema de dimensões reduzidas composto de uma barra de geração ligada por uma rede de transmissão, com vários nós intermediários, a uma ou mais barras de carga.

6.3

Identificação dos Caminhos de Transmissão

O segundo procedimento é determinar todos os caminhos de transmissão radiais entre o gerador e cada barra de carga, e em seguida, eliminar as barras intermediárias. A execução dessa idéia envolve os seguintes passos:

- a) Cada barra “j” conectada por um ramo de transmissão à barra crítica de geração “i” define um caminho de transmissão radial. Note-se que $P_{ij} > 0$. Se existem “nj” barras “j”, são definidas “nj” caminhos. Para cada barra “j” existem “nk” barras “k”, com $P_{jk} > 0$, a ela conectadas, e são definidos “nk-1” novos caminhos. Para cada barra “k” existem “n ℓ ” barras “ ℓ ”, com $P_{k\ell} > 0$, a ela conectadas, e são definidos “n ℓ - 1” novos caminhos. Cada caminho termina numa barra de carga “m”.

São definidos então, vários caminhos radiais contendo a barra de geração crítica “i”, uma barra “j”, uma barra “k”, uma barra “ ℓ ”, etc, e uma barra de carga “m”. Esses caminhos radiais não são necessariamente independentes, podendo o mesmo ramo de transmissão aparecer em vários caminhos diferentes.

- b) Para isolar um caminho radial de transmissão do resto do sistema é necessário transformar em admitâncias todos os fluxos de potência ativa e reativa que entram e saem do caminho em suas barras intermediárias.
- c) Transformando-se as cargas das barras intermediárias em admitâncias e eliminando-se essas barras, pela técnica conhecida como "redução da rede" [Kimbark, E.W., 1968], tem-se um circuito equivalente de duas barras, como se queria obter. Essa redução era usual em estudos de estabilidade angular [Brown, H.E., Shipley, R.B., Coleman, D., Neid Jr., R.E., 1969].

Assim, obtêm-se vários circuitos compostos de gerador, circuito π equivalente de transmissão, e barra de carga. O mesmo gerador pode estar conectado à barra

de carga por mais de um circuito π de transmissão. A individualidade de cada caminho de transmissão é mantida.

A carga de cada um dos vários circuitos de duas barras resultantes é o fluxo de potência ativa e reativa que chega na barra carga através do caminho de transmissão correspondente. A geração de cada um dos vários circuitos de duas barras resultantes é o fluxo de potência ativa e reativa que sai da barra de geração através do caminho de transmissão correspondente.

As grandezas que mantêm o mesmo valor no circuito intacto e no circuito de 2 barras são as tensões nodais em módulo e ângulo no gerador e na carga, e a geração (fluxo de potência entrando na rede reduzida) e a carga (fluxo de potência saindo da rede reduzida).

A rede reduzida depende das admitâncias da rede inteira, e também da tensão nodal das barras intermediárias, quando os fluxos de potência entrando e saindo desses nós são transformados em impedância. Logo, a rede reduzida é válida somente no ponto de operação em análise ou para variações infinitesimais.

O ramo série e os ramos em derivação do circuito π equivalente de transmissão obviamente não têm parâmetros semelhantes aos de uma linha de transmissão, mas o interesse é observar o "esforço de transmissão" (quedas do módulo e aumento da defasagem angular da tensão) e o esforço é o mesmo na rede inteira e na reduzida.

É necessário recalcular os circuitos equivalentes de 2 barras toda vez que o ponto de operação é alterado.

6.4

Identificação do Caminho de Transmissão Mais Carregado

O terceiro procedimento é a comparação da geração no ponto de operação em análise com a geração máxima calculada, respectivamente, em (3.7) e (3.26). Com essa comparação é possível determinar se o ponto de operação em análise se encontra na parte superior ou na inferior da "curva do nariz" SV, e ainda, a "distância" ao ponto de máxima geração. O caminho de transmissão mais

sobrecarregado é aquele que apresenta a menor margem em (3.27) entre a geração no ponto de operação em análise e a geração máxima que poderia ser atendida naquela barra.

6.5

Identificação do Ramo de Transmissão Crítico

O quarto procedimento é determinar analiticamente o ramo crítico do caminho mais carregado, isto é, o ramo que terá seu fluxo de potência ativa diminuído. A idéia é analisar os sub-caminhos que começam no gerador “i” em análise incluindo um novo ramo de cada vez até chegar na barra de carga “m”. Para cada inclusão de um novo ramo, calcula-se a margem na barra de geração com (3.27).

Analisa-se o carregamento do circuito de 2 barras composto pelo gerador na barra “i”, ramo “i-j” e carga na barra “j”, calculando-se a margem M_{ij} na barra de geração. A seguir inclui-se o ramo “j-k”, elimina-se a barra intermediária “j”, e analisa-se o carregamento do circuito de 2 barras composto pelo gerador na barra “i”, π equivalente “i-k”, e carga na barra “k”, calculando-se a margem M_{ik} na barra de geração. Logo, inclui-se o ramo “k-ℓ”, elimina-se a barra intermediária “k”, e analisa-se o carregamento do circuito de 2 barras composto pelo gerador na barra “i”, π equivalente “i-ℓ”, e carga na barra “ℓ”, calculando-se a margem $M_{i\ell}$ na barra de geração. E assim, sucessivamente até chegar à barra “m”.

O ramo crítico é aquele que apresentar a menor margem entre M_{ij} , M_{ik} , $M_{i\ell}$, ..., M_{im} . É fácil usar esse conceito em um caminho de transmissão composto por um grande número de ramos.

6.6

Processo de Otimização

O programa FLUPOT [CEPEL, 2000] tem por objetivo calcular um estado de uma rede AC em regime permanente que otimiza uma função-objetivo a partir de um caso-base, e satisfaz uma série de restrições físicas e operacionais. Neste

aspecto ele é um programa de fluxo de potência ótimo com restrição de segurança.

O método de solução para este problema de otimização é baseado na técnica de pontos interiores, associada à teoria primal-dual para a atualização do parâmetro barreira [Karmarkar, N.K., Ramakrishnan, K.G., 1991 e Granville, S., Melo, J.C.O, Melo, A.C.G., 1996]. Para execução do programa o usuário deve especificar os dados da rede elétrica, a função-objetivo, relação de controles disponíveis, lista de contingências se houver e restrições a serem consideradas na otimização.

Para que o programa FLUPOT obtenha um novo ponto de operação não muito diferente daquele em análise, propõe-se a utilização de limites restritivos fictícios na geração de potência ativa, para limitar a capacidade de otimização, e/ou de limites restritivos fictícios em fluxo de potência nos ramos de transmissão, para simular o carregamento excessivo. Das diversas funções-objetivo disponíveis no programa, é usada neste trabalho a função MXTR “Máxima Transferência de Potência Ativa” (que aplicada no sentido contrário ao do fluxo de potência, minimiza a transferência de potência) e DGMW “Mínimo Desvio de Potência Ativa”, conjugada com a criação de sobrecarga fictícia. O objetivo é diminuir o fluxo de potência no ramo crítico do caminho mais carregado determinado pelo programa CaTrans, a partir da barra com menor margem de potência determinada pelo programa EstabTen.

Vale dizer que a função-objetivo MXTR já foi usada em [Palomino, E.G.C., 2002] para reforçar as condições de segurança de tensão em barras de carga. Agora, é apresentada uma extensão do método para o reforço em barras de tensão controlada.

6.6.1

Máxima Transferência de Potência – MXTR

Esta função-objetivo maximiza a transferência de potência ativa entre áreas vizinhas ou em um conjunto de circuitos fornecidos pelo usuário. O objetivo neste estudo é minimizar o fluxo de potência ativa no ramo crítico e não maximizá-lo, assim, utiliza-se o artifício numérico de maximizar no sentido contrário do fluxo.

A função-objetivo de máxima transferência de potência ativa é definida em (6.1):

$$f = \sum_{(i,j) \in \Omega} P_{ij} \quad (6.1)$$

onde:

Ω é o conjunto de circuitos para qual se deve maximizar o somatório dos fluxos, $P_{i,j}$ é o fluxo de potência ativa no circuito (i,j) .

6.6.2

Desvio de Potência Ativa - DGMW

Novos valores de geração de potência ativa são calculados de tal forma a minimizar o somatório dos quadrados dos desvios em relação aos valores de geração de potência ativa do caso-base. O despacho de potência ativa pode não satisfazer todas as restrições definidas na rede AC e neste caso é desejável se calcular um novo despacho viável cujo desvio ao primeiro seja o menor possível.

A função-objetivo de mínimo desvio de potência ativa é definida em (6.2):

$$f = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i \in I_G} p_i \cdot (PG_i - PG_i^0)^2 \quad (6.2)$$

onde:

I_G é o conjunto de geradores de potência ativa controláveis,

p_i é o peso associado ao desvio de potência ativa,

PG_i é a geração de potência ativa no gerador i ,

PG_i^0 é o valor base de geração de potência ativa no gerador i .

Neste trabalho, essa função-objetivo é usada após a criação de uma sobrecarga fictícia no ramo que se deseja uma diminuição no fluxo de potência.

Deve ser notado que o tamanho do problema não cresce com o número de barras porque: i) os problemas de segurança de tensão estão sempre

localizados em uma pequena parte da rede, p.ex., envolvendo um máximo de 50 barras, das quais 10 são importantes e ii) o número de geradores e compensadores reativos na área afetada é limitado, p.ex. um máximo de 10, dos quais 5 são importantes para o problema.

6.7

Critério de Parada para Estudos de Reforço da Segurança de Tensão

6.7.1

Critério para Condição Normal de Operação

O critério para condição normal de operação foi estabelecido considerando que a margem deveria incorporar o atraso de obra de um ano, o erro inerente à própria previsão de carga de um ano para outro e a diferença entre os valores de demanda instantânea e integralizada do valor da carga da área analisada.

A demanda considerada nos estudos de planejamento é baseada no valor máximo da demanda média horária (demanda integralizada em 1 hora) prevista para o respectivo ano. No entanto, em algumas regiões do Brasil, a diferença entre os valores de demanda instantânea e integralizada pode alcançar índices de até 12%. Nestas regiões em que esta diferença é significativa, este aspecto deve ser considerado no estabelecimento de margens.

Portanto, em condição normal, a margem variará de região para região. Desta forma, a margem para condição normal proposta é:

$$\text{Margem} \geq (6 + DI / D) \% \quad (6.3)$$

onde:

6% = Taxa média de crescimento de carga (4,5%) + Erro médio de previsão de carga (1,5%)

DI = Demanda máxima instantânea

D = Demanda máxima integralizada de uma hora

6.7.2

Critério para Condição de Contingência Simples

O critério para condição de contingência simples foi estabelecido considerando que a margem deveria incorporar o atraso de obra de um ano e o erro inerente à própria previsão de carga de um ano para outro. Desta forma, a margem para condição de contingência simples proposta é:

$$\text{Margem} \geq 6\% \quad (6.4)$$

Não são abordados neste os aspectos relativos a margens para contingências múltiplas. Este ponto deverá ser levado em consideração após a experiência do setor com os estudos baseados nos critérios aqui propostos.

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 [ONS, 2007].