
IDENTIFICAÇÃO DO RAMO DE TRANSMISSÃO CRÍTICO PARA REFORÇO DAS CONDIÇÕES DE SEGURANÇA DE TENSÃO

R.B. Prada*

prada@ele.puc-rio.br

L.A.S. Pilotto^{‡§}

pilotto@cepel.br

E.G.C. Palomino*[†]

edgardo@ele.puc-rio.br

A. Bianco^{‡¶}

a_bianco@cepel.br

*Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 22453 900

[†]agora com Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Elétrica, UFBA, Salvador, 40210 630

[‡]CEPEL, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, 21941 590

[§]agora com Accenture, Rio de Janeiro, 20031 170

[¶]agora com ONS Operador Nacional do Sistema Elétrico, Rio de Janeiro, 20091 000

RESUMO

Do ponto de vista da segurança de tensão, barras críticas são: i) aquelas para as quais a transmissão de potência ativa e reativa se encontra perto de um máximo permissível e ii) aquelas onde ações de controle de tensão podem ter consequências opostas ao esperado. Uma vez detectadas a existência dessas barras críticas, pode ser recomendada a aplicação de ações de controle para tornar as condições de segurança de tensão menos severas. Este artigo apresenta uma metodologia sequencial iterativa para reforçar as condições do sistema. Utilizando-se um sistema de 34 barras, mostra-se a eficácia da diminuição do fluxo de potência ativa no “ramo crítico” do “caminho de transmissão mais carregado”, conceitos estes, introduzidos neste artigo.

PALAVRAS-CHAVE: segurança de tensão, estabilidade de tensão, colapso de tensão, controle de tensão, fluxo de potência.

Artigo submetido em 16/12/2002

1a. Revisão em 15/04/2004

2a. Revisão em 04/04/2006

Aceito sob recomendação do Editor Associado

Prof. Glauco Nery Taranto

ABSTRACT

Maximum power transmission and inadequate voltage control are the two main aspects associated with voltage security analysis. Once critical buses are found by the assessment function, enhancement control actions may be recommended. This paper presents a sequential iterative methodology to reinforce system conditions. A 34-bus system is used to show the adequacy and efficiency of the power flow reduction through the “critical branch” of the “most loaded transmission path”. Both concepts are introduced in this paper.

KEYWORDS: voltage security, voltage control, voltage stability, voltage collapse, power flow.

1 INTRODUÇÃO

A análise da estabilidade de tensão, ou como parece mais apropriado, da segurança de tensão, pode ser dividida em duas partes: a avaliação e, se necessário, o reforço. A avaliação pode encontrar dois tipos de resultados distintos: i) em barras de tensão controlada, o efeito de ações de controle podem ter resultado oposto ao esperado, ii) em barras de carga, o fluxo de potência a ela chegando se encontra perto do má-

ximo (Prada et al., 1990 e Prada et al., 1992).

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 a carga daquela barra e o (novo) máximo permitido. Muitas vezes isso pode ser conseguido através da alteração do perfil de tensão e conseqüente redução nas perdas. Muitas outras vezes, o redesenho de potência ativa torna-se necessário.

Uma barra de carga pode receber potência de mais de um caminho de transmissão. Suponha, por exemplo, dois geradores distintos conectados por duas linhas de transmissão distintas a uma única barra de carga. Se a 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 a potência passe a ser produzida pelo outro gerador e, conseqüentemente, a fluir pelo outro caminho de transmissão.

A idéia então é, uma vez detectada uma barra de carga crítica, verificar os diferentes caminhos de transmissão existentes, identificar o caminho mais carregado, e redirecionar o fluxo de potência destes para outros caminhos menos carregados.

2 FUNDAMENTOS

A bem conhecida curva PV mostrada na Figura 1, apelada de “curva do nariz”, é construída variando-se a carga, mantendo-se o fator de potência constante, e calculando-se o valor de tensão na mesma barra.

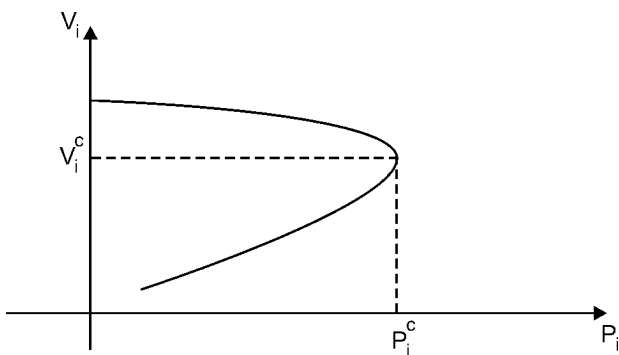


Figura 1: Curva PV para Fator de Potência Constante

Para o sistema de 2 barras mostrado na Figura 2, o cálculo da tensão na barra de carga é analítico, embora para um sistema de maior número de barras, para a resolução das equações

não-lineares de fluxo de carga seja necessário um método iterativo, como o de Newton.

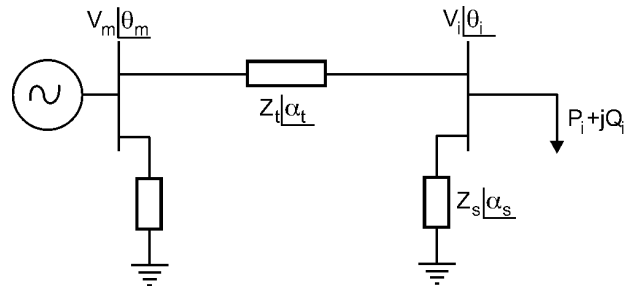


Figura 2: Circuito π para um Sistema de Duas Barras

Usualmente, a avaliação das chamadas “condições de estabilidade de tensão” consiste em comparar a carga no ponto de operação em análise com a carga correspondente à máxima capacidade de transmissão de potência para a barra de carga, isto é, a carga da “ponta do nariz” da curva da Figura 1. Também é importante determinar se o ponto de operação está na parte superior (região normal de operação) ou inferior da curva.

Faz-se necessário o conhecimento dos valores da máxima carga e da tensão correspondente. Para um circuito de 2 barras existe uma solução analítica para a tensão, resultado da solução das condições de otimalidade do problema de otimização: “maximize o fluxo de potência ativa e reativa que chega na barra de carga para um dado fator de potência”.

Para o circuito π de 2 barras da Figura 2, o resultado é:

$$\theta_i^c = \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{\sin(-\phi + \alpha_t) + \frac{Z_t}{Z_s} \sin(-\phi + 2\alpha_t - \alpha_s)}{-\cos(-\phi + \alpha_t) - \frac{Z_t}{Z_s} \cos(-\phi + 2\alpha_t - \alpha_s)} \right) + \theta_m$$

$$V_i^c = \frac{V_m}{2 \cos(\theta_i^c - \theta_m) + 2 \left(\frac{Z_t}{Z_s} \right) \cos(\theta_i^c - \theta_m + \alpha_t - \alpha_s)}$$

onde:

V_i^c , θ_i^c são o módulo e ângulo da tensão na carga quando esta é máxima,

V_m , θ_m são o módulo e ângulo da tensão no gerador,

Z_t , α_t são o módulo e ângulo da impedância série do circuito π equivalente,

Z_s , α_s são o módulo e ângulo da impedância paralelo (do lado da carga) do circuito π equivalente,

ϕ é o ângulo do fator de potência da carga.

Já para um circuito série de 2 barras, o resultado é:

$$\theta_i^c = \frac{-\alpha_t + \phi}{2} + \theta_m \text{ e } V_i^c = \frac{V_m}{2 \cos(\theta_i^c - \theta_m)}$$

Usando-se esses valores de tensão em módulo e ângulo, é fácil determinar os valores da máxima carga:

$$P_i^c = -P_{im}^c - P_{i0}^c = -V_i^{c^2} \left(\frac{\cos \alpha_t}{Z_t} + \frac{\cos \alpha_s}{Z_s} \right) + \frac{V_i^c V_m}{Z_t} \cos (\theta_i^c - \theta_m + \alpha_t)$$

$$Q_i^c = -Q_{im}^c - Q_{i0}^c = -V_i^{c^2} \left(\frac{\sin \alpha_t}{Z_t} + \frac{\sin \alpha_s}{Z_s} \right) + \frac{V_i^c V_m}{Z_t} \sin (\theta_i^c - \theta_m + \alpha_t)$$

$$S_i^c = \sqrt{(P_i^c)^2 + (Q_i^c)^2}$$

Então, para saber as condições de carregamento do circuito, calcula-se a “distância” entre a carga no ponto de operação em análise e a máxima carga, como já dito. Utiliza-se o conceito de “margem de potência”:

$M = (S_i^c - S_i)$ em MVA onde

$S_i = \sqrt{(P_i)^2 + (Q_i)^2}$ é a carga no ponto de operação em análise.

Neste artigo utiliza-se os conceitos e fórmulas acima descritas para um sistema multi-nó. A Figura 3 indica uma parte da rede de transmissão em torno da barra i em análise. Estão mostradas as direções dos fluxos de potência ativa. É fácil perceber que a sub-rede utilizada para transmitir potência ativa para a carga da barra i inclui somente os geradores m e n e os ramos $m-i$ e $n-i$. Também é fácil perceber a existência de dois caminhos de transmissão distintos. Através do primeiro caminho sai do gerador a potência ativa P_{mi} e reativa Q_{mi} e chega na barra de carga a potência ativa $-P_{im}$ e reativa $-Q_{im}$, enquanto que através do segundo caminho sai do gerador a potência ativa P_{ni} e reativa Q_{ni} e chega na barra de carga a potência ativa $-P_{in}$ e reativa $-Q_{in}$. Pode-se conhecer as condições de carregamento de cada um dos caminhos calculando-se as respectivas cargas máximas e tensões correspondentes. O caminho de transmissão mais carregado é aquele que apresentar a menor margem de potência. Para dar significado à comparação, utiliza-se a margem em valores por unidade:

$M = \left(1 - \frac{S_i}{S_i^c}\right)$ em pu de S_m se o ponto de operação em análise está na parte superior da curva PV, ou

$M = \left(\frac{S_i^c}{S_i} - 1\right)$ em pu de S_i se o ponto está na parte inferior da curva PV (dos Santos et al., 2003). Obviamente, $M=0$ se $S_i = S_i^c$, o “nariz” da curva PV.

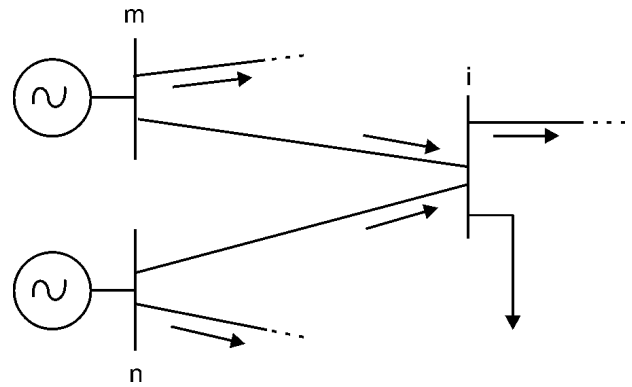


Figura 3: Parte da Rede no Entorno da Barra i

Na Figura 4 está mostrado um caminho de transmissão de potência ativa genérico entre um gerador m e a barra de carga i . São mostradas direções de fluxos de potência ativa e reativa. Para aplicar os mesmos conceitos do sistema de 2 barras faz-se necessário transformar os fluxos de potência ativa e reativa que entram e saem do caminho em admitâncias em paralelo. A seguir as barras intermediárias podem ser eliminadas. Chega-se a um circuito π equivalente entre gerador e carga. A carga máxima e tensão correspondente podem ser calculadas para então proceder-se ao cálculo da margem.

O caminho de transmissão genérico da Figura 4 apresenta entradas e saídas de potência ativa e reativa de suas barras intermediárias, assim como pode apresentar capacitores e reatores em paralelo. 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.

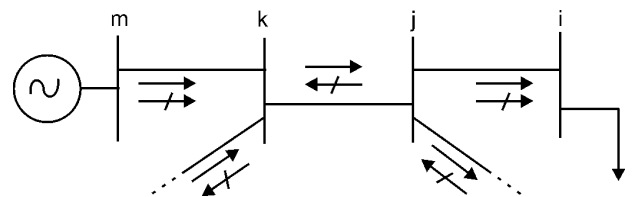


Figura 4: Caminho de Transmissão Genérico

Nas Figuras 5a e 5b estão mostrados dois sistemas diferentes que supostamente estão muito carregados. A barra i 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 por que 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 reatân-

cia 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.

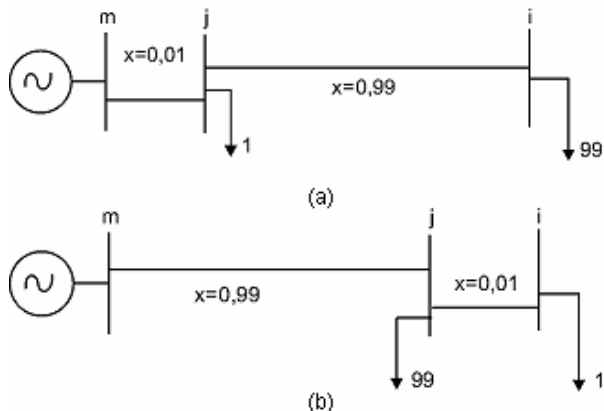


Figura 5: Sistemas Diferentes Alimentando a Mesma Carga

Para determinar-se analiticamente o ramo de transmissão crítico, considere um 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 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 na próxima seção. Como dito, inclui-se um ramo de cada vez a partir do gerador até chegar na barra de carga em análise. Comparam-se as margens quando da adição de cada ramo. O crítico é aquele que quando adicionado resultou na menor margem de potência.

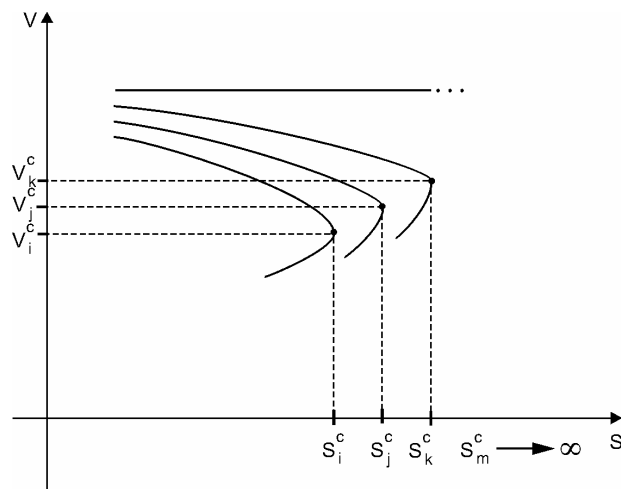


Figura 6: Curvas SV para Diferentes Segmentos da Rede

O último procedimento é determinar se o ponto de operação pertence à parte superior ou inferior da curva PV. O seguinte procedimento resolve a questão: i) substitui-se o valor do ângulo da tensão θ_i no ponto de operação em análise na fórmula do módulo da tensão crítica V_i^c , como ilustrado nas Figuras 7a e 7b; ii) compara-se o valor encontrado V_i^{pc} com o módulo no ponto de operação em análise V_i – se $V_i > V_i^{pc}$ o ponto pertence à parte superior da curva PV, como na Figura 7a; se $V_i < V_i^{pc}$, pertence à parte inferior, como na Figura 7b; e se $V_i = V_i^{pc}$, é o ponto crítico de máxima transmissão de potência. Nesse último caso, também se tem $\theta_i = \theta_i^c$ e $V_i = V_i^{pc} = V_i^c$.

Obviamente, os circuitos e seus resultados são válidos somente no ponto de operação em análise, o que não causa problema algum. Toda vez que o ponto de operação se alterar, p.ex. devido a uma ação de controle, os circuitos equivalentes são recalculados.

3 TRANSFORMAÇÃO DO SISTEMA MULTI-NÓ

3.1 Identificação da Sub-Rede

O primeiro procedimento é determinar, na rede inteira, a porção da rede de transmissão realmente utilizada para transmitir potência ativa dos geradores até a barra crítica. Os seguintes passos estão envolvidos para a execução dessa idéia:

1. Para achar a sub-rede basta verificar o sinal dos fluxos de potência ativa. As barras j conectadas à barra de carga crítica i pertencem à sub-rede se $P_{ij} < 0$. A barra

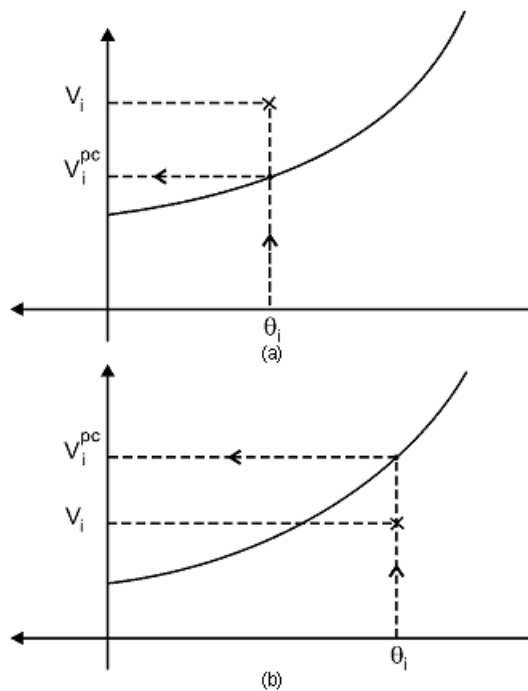


Figura 7: Localização do Ponto de Operação em Análise

k conectada a barra j , pertence à sub-rede se $P_{jk} < 0$. A barra ℓ conectada a barra k , pertence à sub-rede se $P_{k\ell} < 0$. A busca acaba em barras geradoras m de potência ativa. A sub-rede está determinada.

2. Para isolar a sub-rede do resto da rede é necessário transformar em admitâncias os fluxos de potência ativa que deixam a 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 chegando nela).

Tem-se agora um sistema de dimensões reduzidas composto de uma barra de carga ligada por uma rede de transmissão, com vários nós intermediários, a um ou mais geradores.

3.2 Identificação dos Caminhos de Transmissão

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

1. Cada barra j conectada por um ramo de transmissão à barra crítica i define um caminho de transmissão radial.

Note-se que $P_{ij} < 0$. Se existem n_j barras j , são definidos n_j caminhos. Para cada barra j existem n_k barras k , com $P_{jk} < 0$, a ela conectadas, e são definidos $n_k - 1$ novos caminhos. Para cada barra k existem n_ℓ barras ℓ , com $P_{k\ell} < 0$, a ela conectadas, e são definidos $n_\ell - 1$ novos caminhos. Cada caminho termina em um gerador m de potência ativa.

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

2. 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.
3. Transformando-se as cargas das barras intermediárias em admitâncias e eliminando-se essas barras, pela técnica conhecida como “redução da rede” (Kimbark, 1968), tem-se um circuito equivalente de duas barras, como se queria obter. Essa redução era usual em estudos de estabilidade angular (Brown et al., 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 mantém 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.

Os ramos 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.

3.3 Identificação do Caminho de Transmissão Mais Carregado

O terceiro procedimento é a comparação da carga no ponto de operação em análise com a carga máxima, calculada pelas fórmulas já mostradas. 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” PV, e ainda, a “distância” ao ponto de máxima carga. O caminho de transmissão mais sobrecarregado é aquele que apresenta a menor margem entre a carga no ponto de operação em análise e a carga máxima que poderia ser atendida naquela barra.

3.4 Identificação do Ramo de Transmissão Crítico

O quarto procedimento é determinar analiticamente o ramo crítico do caminho mais carregado, i.e. o ramo que terá seu fluxo de potência ativa diminuído. A idéia é analisar os subcaminhos que começam no gerador m incluindo um novo ramo de cada vez até chegar na barra de carga i em análise.

Analisa-se o carregamento do circuito de 2 barras composto pelo gerador, ramo $m-k$, e carga na barra k igual a $-P_{jk} - jQ_{jk}$, calculando-se a margem M_j . A seguir inclui-se o ramo $k-j$, elimina-se a barra intermediária k , e analisa-se o carregamento do circuito de 2 barras composto pelo gerador, π equivalente $m-j$, e carga na barra j igual a $-P_{jm} - jQ_{jm}$, calculando-se a margem M_j . Finalmente, inclui-se o ramo $j-i$, elimina-se a barra intermediária j , e analisa-se o carregamento do circuito de 2 barras composto pelo gerador, π equivalente $m-i$, e carga na barra i igual a $-P_{im} - jQ_{im}$, calculando-se a margem M_i . O ramo crítico é ramo $x-y$ se M_y é a menor margem entre M_i , M_j e M_k . É fácil usar esse conceito em um caminho de transmissão composto por um número maior de ramos, o que é feito no exemplo numérico apresentado na Seção 4 e que clarifica os procedimentos descritos nessa seção.

4 APLICAÇÃO EM UM SISTEMA DE 34 BARRAS

O objetivo é identificar a barra crítica, identificar na rede de transmissão o caminho de transmissão de potência para esta barra mais carregado, e aliviar o fluxo de potência nesse caminho para melhorar as condições de segurança de tensão do sistema.

A metodologia agora envolve, a cada iteração, a utilização em seqüência dos programas computacionais EstabTen que faz a avaliação das condições nodais de carregamento, determinando a barra mais crítica, CaTrans que determina os caminhos e ramos de transmissão críticos, e FLUPOT que diminui o fluxo de potência em ramos de transmissão críticos através do redespacho de potência reativa e, se necessário, ativa.

O sistema utilizado no ambiente de supervisão e controle em tempo real desenvolvido no CEPEL é mostrado na Figura 8, e também é usado aqui. Ele tem 34 barras, 42 linhas, 12 transformadores e 5 geradores. Os níveis de tensão na transmissão são 750, 500 e 345 kV, e todos os geradores trabalham com 20 kV. O corredor de 750 kV tem compensação série/shunt, e as barras 25 e 26 representam o equivalente de um sistema de grande porte.

4.1 Identificação da Barra Crítica

O objetivo é aumentar a margem de potência partindo do ponto de colapso S34_A06 ilustrado na Figura 9. Como o ponto de operação S34_A06 foi obtido através de aumentos de carga na barra 29, provavelmente a barra crítica é a barra 29. A Tabela 1 mostra os resultados da avaliação das condições de segurança de tensão utilizando a ferramenta computacional EstabTen descrita por Prada et al. (2002). Nessa tabela S_i é a potência injetada na barra i no ponto de operação em análise, S_m é uma estimativa da máxima potência aparente que poderia ser injetada na barra i . Portanto, $M = (S_m - S_i) / S_m$ é a margem de potência aparente entre o que está sendo injetado e o máximo calculado naquele ponto de operação (em pu de S_m). β é o ângulo entre os vetores gradientes ∇P_i e ∇Q_i e na região normal de operação (parte superior da “curva do nariz” PV) tem-se $0^\circ < \beta < 180^\circ$ e na parte inferior da curva PV tem-se $0^\circ > \beta > -180^\circ$. No ponto máximo, os vetores gradientes ∇P_i e ∇Q_i estão alinhados, e então o ângulo β é $\pm 180^\circ$ ou 0° . Valores negativos de β em barras de tensão controlada indicam uma relação oposta ao usual entre a potência reativa gerada e a tensão controlada, o que pode levar ao colapso de tensão pois as ações automáticas de controle de tensão podem ter efeito oposto ao esperado (Prada et al., 2002b).

Como previsto, a barra 29 é a pior do ponto de vista de margem de potência: tem uma carga de 34,7 MVA e o programa indica uma máxima carga de 35,7 MVA. O ângulo β vale 179° para um máximo de 180° . Portanto, a barra 29 é a que terá sua margem aumentada.

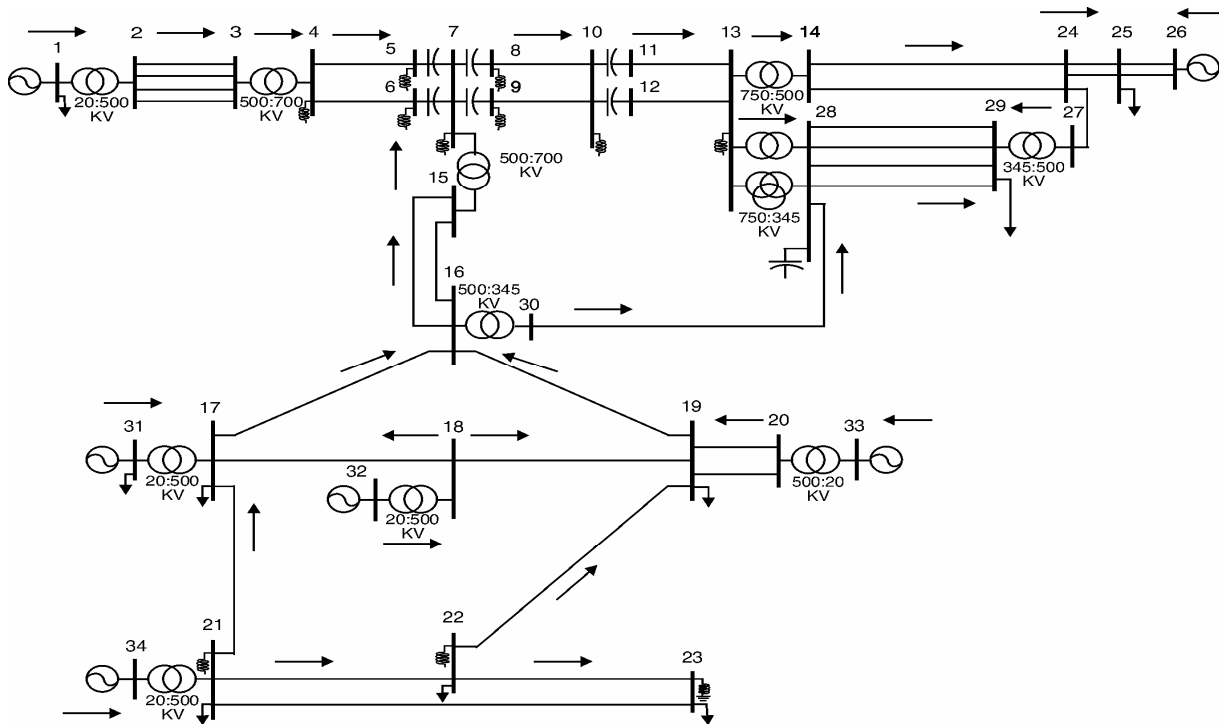


Figura 8: Sistema-Teste de 34 Barras

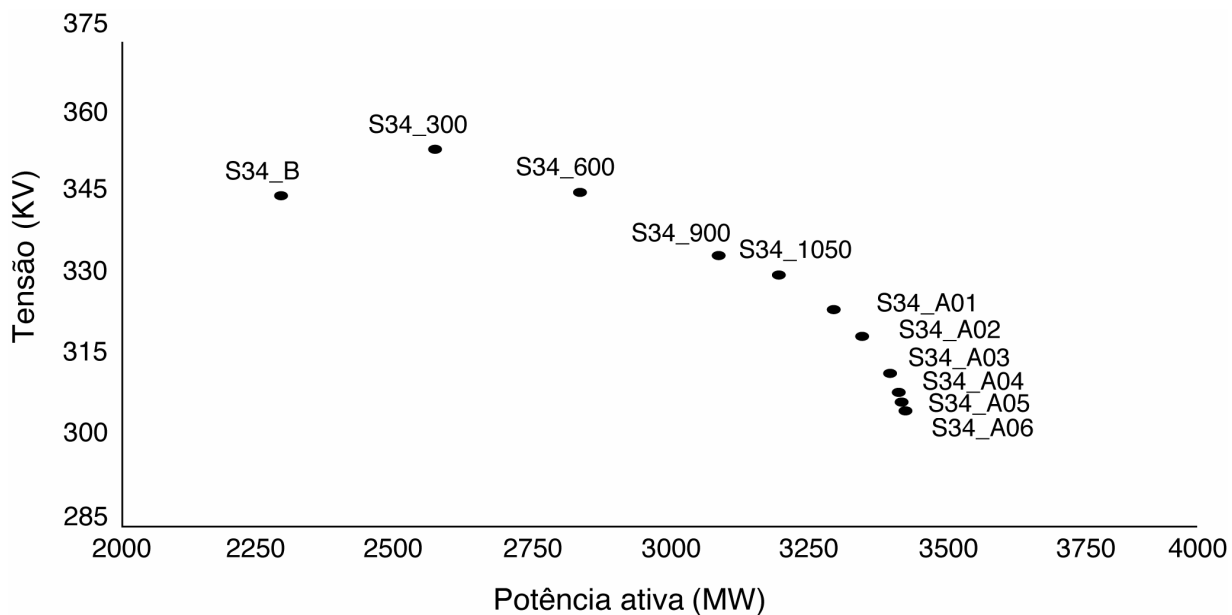


Figura 9: Característica Tensão x Potência para a Barra 29

4.2 Identificação da Sub-Rede, dos Caminhos de Transmissão e do Caminho Mais Carregado

A direção dos fluxos de potência ativa está indicada no diagrama unifilar do sistema mostrado na Figura 8. É fácil verificar que a sub-rede utilizada para transmitir potência para a barra de carga 29 inclui todas as barras exceto as barras 23, 25 e 26. Portanto, existem diversas rotas de potência ativa entre os geradores das barras 1, 31, 32, 33, 34 e a barra de carga 29.

A Tabela 2 apresenta os resultados do programa CaTrans com a determinação dos caminhos mais carregados de transmissão de potência para a barra crítica 29. Somente os seis piores são mostrados, em ordem decrescente a partir da pior margem. O sinal negativo da margem indica operação na parte inferior da curva. Pode-se dizer então que a tensão na barra 29 encontra-se na parte inferior da curva PV para todos os caminhos mais carregados mostrados.

Como os aumentos de carga na barra 29 e os acréscimos nas perdas de transmissão foram atendidas pelo gerador swing da barra 34, os dois caminhos mais carregados de transmissão conectam a barra de carga 29 ao gerador swing 34. Os dois caminhos seguintes conectam a barra de carga 29 ao gerador 32; o seguinte conecta a barra de carga 29 ao gerador 33; e o sexto e último caminho conecta a barra de carga 29 ao gerador 31. O gerador 1 não aparece na tabela por que sua contribuição para a carga da barra 29 flui através de outro caminho de transmissão diferente daqueles usados pelos outros geradores.

4.3 Determinação do Ramo Crítico

O objetivo agora é determinar analiticamente o ramo crítico do caminho mais carregado, i.e. o ramo que terá seu fluxo de potência ativa diminuído. A idéia é analisar os sub-caminhos que começam no gerador 34 incluindo um novo ramo de cada vez. Portanto, o 1º sub-caminho a ser analisado vai da barra 34 para a barra 21. Uma inspeção dos resultados na Tabela 3 demonstra que a margem na barra 21 encontra-se “folgada” e o ponto de operação na parte superior da curva PV. A seguir, inclui-se novo ramo e, conseqüentemente, o 2º sub-caminho a ser analisado vai da barra 34 para a barra 21 para a barra 22. Mais uma vez, os resultados da Tabela 3 demonstram que a margem na barra 22 encontra-se “folgada” e o ponto de operação encontra-se na parte superior da curva.

Seqüencialmente, vai-se incluindo novos ramos até que na 7ª e última adição inclui-se o ramo da barra 28 para a barra 29, que é a barra em análise.

Na Tabela 3, observando-se a margem para todos os sub-

caminhos de transmissão, verifica-se que não houve problema em transferir potência a partir do gerador 34 para as barras 21, 22, 19, 16, 30, já que as margens são positivas. Observa-se margem negativa somente quando da adição do 6º ramo, entre as barras 30 e 28, e quando da adição do 7º e último ramo, entre as barras 28 e 29. Comparando as margens, conclui-se que a pior situação, isto é, margem mais negativa, ocorre quando da adição do ramo entre as barras 28 e 29. Esse é então o ramo crítico: o fluxo de potência através dele deve ser diminuído.

4.4 Iteração 1 de Reforço

A barra 29 foi indicada como a barra em piores condições de estabilidade de tensão. A causa foi identificada como sendo o fluxo de potência excessivo entre as barras 28 e 29. Portanto, diminuindo-se esse fluxo de potência, o objetivo de reforçar as condições de estabilidade de tensão pode ser alcançado.

O próximo passo é identificar as mais influentes variáveis, entre as gerações de potência ativa e os valores de tensões controladas, para diminuir o fluxo de potência no ramo determinado. Isso é conseguido diretamente por um programa computacional de fluxo ótimo de potência. O FLUPOT é um programa que tem por objetivo calcular um estado de uma rede em regime permanente otimizando uma função objetivo e satisfazendo uma série de restrições físicas e operacionais. É baseado no método de pontos interiores com utilização do algoritmo primal-dual de barreira logarítmica.

Das diversas funções objetivo disponíveis no programa, foi usada neste trabalho a função objetivo “Mínima Transferência de Potência”. Aplica-se esta função objetivo nos ramos do caminho mais carregado determinado pelo programa CaTrans.

O redespacho de potência ativa foi proibido através da fixação da geração de potência ativa em todos os geradores, exceto o da barra 34 responsável por absorver a variação das perdas ativas. Por conseqüência, no ponto de operação S34_A06, o reforço das condições de carregamento só é possível através da alteração do perfil de tensão.

Na Tabela 4 é mostrado o resultado do redespacho reativo nas barras de geração e nas perdas ativas no sistema. Observa-se que as perdas ativas no sistema diminuem e a geração ativa na barra swing 34 decresce. Neste teste os módulos de tensão foram limitados entre 0,95 e 1,05 pu.

As condições da barra de carga 29 são novamente avaliadas pelo programa EstabTen após a atuação do programa FLUPOT. Na Tabela 5 estão os resultados. O redespacho de potência reativa causou aumento substancial na margem $M = (1 - S_i/S_m)$ de 0,028 para 0,141. O Índice de

| Barra Nº | Barra Nome | V (pu) | Equipamento | Tipo | S _i (pu) | S _m (pu) | M (pu de S _m) | β (graus) |
|-----------|---------------------|--------------|-------------|----------|---------------------|---------------------|---------------------------|------------|
| 1 | BUS--001--20 | 1,030 | GL | 1 | 34,815 | 115,9 | 0,699 | -8 |
| 2 | BUS--002-500 | 1,012 | P | 0 | 0,000 | 31,6 | 1,000 | 166 |
| 3 | BUS--003-500 | 1,010 | P | 0 | 0,000 | 30,7 | 1,000 | 166 |
| 4 | BUS--004-750 | 0,951 | R | 0 | 6,279 | 23,3 | 0,730 | 166 |
| 5 | BUS--005-750 | 0,916 | R | 0 | 1,374 | 15,5 | 0,911 | 178 |
| 6 | BUS--006-750 | 0,915 | R | 0 | 1,373 | 15,5 | 0,911 | 178 |
| 7 | BUS--007-750 | 0,932 | R | 0 | 3,076 | 13,0 | 0,763 | 172 |
| 8 | BUS--008-750 | 0,986 | R | 0 | 3,255 | 36,5 | 0,911 | 173 |
| 9 | BUS--009-750 | 0,987 | R | 0 | 3,257 | 36,5 | 0,911 | 173 |
| 10 | BUS--010-750 | 0,906 | R | 0 | 5,983 | 11,0 | 0,456 | 176 |
| 11 | BUS--011-750 | 0,921 | P | 0 | 0,000 | 18,8 | 1,000 | 175 |
| 12 | BUS--012-750 | 0,922 | P | 0 | 0,000 | 18,7 | 1,000 | 175 |
| 13 | BUS--013-750 | 0,882 | R | 0 | 2,911 | 9,5 | 0,693 | 178 |
| 14 | BUS--014-500 | 0,966 | P | 0 | 0,000 | 10,7 | 1,000 | 178 |
| 15 | BUS--015-500 | 0,876 | P | 0 | 0,000 | 14,4 | 1,000 | 170 |
| 16 | BUS--016-500 | 0,879 | P | 0 | 0,000 | 14,7 | 1,000 | 169 |
| 17 | BUS--017-500 | 0,999 | L | 0 | 0,044 | 56,2 | 0,999 | 142 |
| 18 | BUS--018-500 | 1,037 | P | 0 | 0,000 | 66,1 | 1,000 | 142 |
| 19 | BUS--019-500 | 1,050 | L | 0 | 14,998 | 58,5 | 0,744 | 147 |
| 20 | BUS--020-500 | 1,052 | P | 0 | 0,000 | 57,5 | 1,000 | 146 |
| 21 | BUS--021-500 | 1,074 | LR | 0 | 3,223 | 101,7 | 0,968 | 122 |
| 22 | BUS--022-500 | 1,075 | LR | 0 | 2,151 | 59,6 | 0,964 | 125 |
| 23 | BUS--023-500 | 1,066 | LR | 0 | 7,069 | 34,6 | 0,801 | 122 |
| 24 | BUS--024-500 | 1,037 | P | 0 | 0,000 | 19,6 | 1,000 | 179 |
| 25 | BUS--025-500 | 1,093 | L | 0 | 66,017 | 81,4 | 0,189 | 179 |
| 26 | BUS--026-500 | 1,100 | G | 1 | 41,143 | 62,3 | 0,339 | -77 |
| 27 | BUS--027-500 | 0,991 | P | 0 | 0,000 | 12,7 | 1,000 | 178 |
| 28 | BUS--028-345 | 0,869 | P | 0 | 0,000 | 8,2 | 1,000 | 178 |
| 29 | BUS--029-345 | 0,878 | L | 0 | 34,707 | 35,7 | 0,028 | 179 |
| 30 | BUS--030-345 | 0,929 | P | 0 | 0,000 | 10,5 | 1,000 | 168 |
| 31 | BUS--031--20 | 1,007 | GL | 1 | 13,259 | 28,5 | 0,534 | -39 |
| 32 | BUS--032--20 | 1,058 | G | 1 | 12,690 | 25,8 | 0,508 | 123 |
| 33 | BUS--033--20 | 1,059 | G | 1 | 12,918 | 14,4 | 0,103 | -155 |
| 34* | BUS--034--20 | 1,049 | G | 2 | 14,973 | --- | --- | --- |

legenda: G gerador, L carga, R reator, C capacitor, P passagem, 2 swing, 1 PV, 0 PQ

* para analisar esta barra seria necessário escolher uma outra barra swing o que não é feito aqui para simplificar

Tabela 1: Relatório de Segurança de Tensão no Ponto de Operação S34_A06

Influência da ação de reforço também traduz o benefício: $II = (M_i/M_o - 1) = 4,04$ ou 404%. Uma outra forma de verificar o benefício é verificar que S_m aumentou de 35,7 para 40,4 MVA, o que significa um reforço de 13%. Como desejado, o ângulo β diminuiu de 179° para 170°. Esses números indicam que as ações de controle podem ser consideradas como bem sucedidas, especialmente se for lembrado que o ponto de operação S34_A06 era um ponto de colapso, como mostrado na Figura 9.

Neste ponto uma iteração da metodologia foi terminada com a obtenção de um novo ponto de operação após ações de reforço. Se todas as margens nodais de potência são consideradas aceitáveis, o procedimento termina. Decidir se a margem é aceitável ou não é uma questão de experiência com o sistema; ainda não existe teoria a esse respeito. Considerando-se não adequados os valores de margem, são necessárias mais

ações de controle, desta vez promovendo o redespacho de potência ativa. Nova iteração se inicia.

4.5 Outras Iterações de Reforço

Com base na experiência adquirida com outros testes não mostrados neste trabalho, verifica-se que melhores resultados, em termos de aumento da margem, podem ser obtidos diminuindo-se o grau de liberdade do redespacho ativo. Isso significa usar limites fictícios de geração ativa ao redor do valor da potência gerada. Será de $\pm 10\%$ a variação possível ao redor do valor de geração, usando o ponto de operação de cada etapa de reforço para calcular os novos limites fictícios para a etapa seguinte. Neste teste, embora não mandatório, a exceção é o gerador da barra 34 que fica responsável por fechar o balanço, inclusive absorvendo a variação das perdas

CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 29-28-30-16-19-22-21-34

| | MÓDULO | ÂNGULO |
|-----------------------------|--------|----------|
| IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE | 0,1400 | 86,9675 |
| IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR | 0,1374 | -22,8839 |
| IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA | 0,0290 | 172,8266 |

| | MÓDULO | ÂNGULO |
|-------------------------|--------|----------|
| TENSÃO NO GERADOR | 1,0490 | 22,3000 |
| TENSÃO NA CARGA | 0,8829 | -62,7516 |
| TENSÃO CRÍTICA NA CARGA | 3,0719 | 8,6184 |

| | ATIVA | REATIVA | APARENTE |
|---------------|----------|----------|----------|
| GERAÇÃO | 14,3498 | 3,8172 | |
| CARGA | 33,0229 | -8,6997 | 34,1497 |
| CARGA CRÍTICA | 326,2837 | -85,9578 | 337,4163 |

| | S _i | S _n | M(%) |
|---------|----------------|----------------|--------|
| ÍNDICES | 34,15 | 337,42 | -89,88 |

CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 29-28-30-16-17-21-34

| | MÓDULO | ÂNGULO |
|-----------------------------|--------|----------|
| IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE | 0,1304 | 90,1292 |
| IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR | 0,1321 | -28,8857 |
| IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA | 0,0298 | 172,6369 |

| | MÓDULO | ÂNGULO |
|-------------------------|--------|----------|
| TENSÃO NO GERADOR | 1,0490 | 22,3000 |
| TENSÃO NA CARGA | 0,8829 | -62,7738 |
| TENSÃO CRÍTICA NA CARGA | 2,5997 | 4,9071 |

| | ATIVA | REATIVA | APARENTE |
|---------------|--------|---------|----------|
| GERAÇÃO | 14,35 | 3,82 | |
| CARGA | 33,03 | -8,70 | 34,16 |
| CARGA CRÍTICA | 231,22 | -60,91 | 239,11 |

| | S _i | S _n | M(%) |
|---------|----------------|----------------|--------|
| ÍNDICES | 34,16 | 239,11 | -85,71 |

CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 29-28-30-16-19-18-32

| | MÓDULO | ÂNGULO |
|-----------------------------|--------|----------|
| IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE | 0,1337 | 89,6544 |
| IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR | 0,1890 | -30,7724 |
| IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA | 0,0294 | 171,0871 |

| | MÓDULO | ÂNGULO |
|-------------------------|--------|----------|
| TENSÃO NO GERADOR | 1,0580 | 16,7148 |
| TENSÃO NA CARGA | 0,8829 | -62,7738 |
| TENSÃO CRÍTICA NA CARGA | 2,0906 | -0,7194 |

| | ATIVA | REATIVA | APARENTE |
|---------------|--------|---------|----------|
| GERAÇÃO | 12,00 | 4,02 | |
| CARGA | 33,03 | -8,70 | 34,16 |
| CARGA CRÍTICA | 151,69 | -39,96 | 156,86 |

| | S _i | S _n | M(%) |
|---------|----------------|----------------|--------|
| ÍNDICES | 34,16 | 156,86 | -78,22 |

CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 29-28-30-16-17-18-32

| | MÓDULO | ÂNGULO |
|-----------------------------|--------|----------|
| IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE | 0,1292 | 90,4273 |
| IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR | 0,1870 | -34,2718 |
| IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA | 0,0298 | 171,1232 |

| | MÓDULO | ÂNGULO |
|-------------------------|--------|----------|
| TENSÃO NO GERADOR | 1,0580 | 16,7148 |
| TENSÃO NA CARGA | 0,8829 | -62,7738 |
| TENSÃO CRÍTICA NA CARGA | 2,0315 | -1,7068 |

| | ATIVA | REATIVA | APARENTE |
|---------------|--------|---------|----------|
| GERAÇÃO | 12,00 | 4,02 | |
| CARGA | 33,03 | -8,70 | 34,16 |
| CARGA CRÍTICA | 142,43 | -37,52 | 147,29 |

| | S _i | S _n | M(%) |
|---------|----------------|----------------|--------|
| ÍNDICES | 34,16 | 147,29 | -76,81 |

CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 29-28-30-16-19-20-33

| | MÓDULO | ÂNGULO |
|-----------------------------|--------|----------|
| IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE | 0,1328 | 88,2043 |
| IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR | 0,2118 | -19,9402 |
| IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA | 0,0292 | 170,5513 |

| | MÓDULO | ÂNGULO |
|-------------------------|--------|----------|
| TENSÃO NO GERADOR | 1,0590 | 12,7291 |
| TENSÃO NA CARGA | 0,8829 | -62,7738 |
| TENSÃO CRÍTICA NA CARGA | 1,9102 | -3,5524 |

| | ATIVA | REATIVA | APARENTE |
|---------------|--------|---------|----------|
| GERAÇÃO | 12,00 | 4,66 | |
| CARGA | 33,03 | -8,70 | 34,16 |
| CARGA CRÍTICA | 127,19 | -33,50 | 131,52 |

| | S _i | S _n | M(%) |
|---------|----------------|----------------|--------|
| ÍNDICES | 34,16 | 131,52 | -74,03 |

CAMINHO DE TRANSMISSÃO: 29-28-30-16-17-31

| | MÓDULO | ÂNGULO |
|-----------------------------|--------|----------|
| IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE | 0,1211 | 93,9653 |
| IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR | 0,0900 | -55,0947 |
| IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA | 0,0303 | 171,1876 |

| | MÓDULO | ÂNGULO |
|-------------------------|--------|----------|
| TENSÃO NO GERADOR | 1,0070 | 18,1187 |
| TENSÃO NA CARGA | 0,8829 | -62,7738 |
| TENSÃO CRÍTICA NA CARGA | 1,8864 | -4,1372 |

| | ATIVA | REATIVA | APARENTE |
|---------------|--------|---------|----------|
| GERAÇÃO | 13,18 | -1,55 | |
| CARGA | 33,03 | -8,70 | 34,16 |
| CARGA CRÍTICA | 123,05 | -32,42 | 127,25 |

| | S _i | S _n | M(%) |
|---------|----------------|----------------|--------|
| ÍNDICES | 34,16 | 127,25 | -73,16 |

Tabela 2: Determinação dos Caminhos Mais Carregados de Transmissão para o Ponto de Operação S34_A06

na rede.

Caso esse expediente não fosse adotado, o programa FLU-POT iria minimizar o fluxo de potência no ramo crítico. E a idéia não é essa, e sim, diminuir o fluxo com o objetivo de aumentar a margem de potência na barra crítica.

Na Tabela 6 são mostrados os caminhos mais carregados e os ramos críticos em cada uma de 7 iterações. Na Tabela 7 são

mostrados os resultados dos redespachos ativos nas barras de geração e nas perdas ativas no sistema. Na tabela observa-se que, depois da 6a iteração, a geração da barra swing 34 e as perdas ativas no sistema começam a aumentar, invertendo a tendência dos casos anteriores. Na Tabela 8, a cada iteração, são mostradas as margens da barra 29 avaliadas pelo programa EstabTen no ponto de operação resultante após o programa FLUPOT.

| | | | | | | | |
|-----------------------------|---------|----------------|----------|-----------------------------|----------|-------------------------|----------|
| SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO: | | 34-21 | | TENSÃO CRÍTICA NA CARGA | | 1,1782 | -0,3168 |
| IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE | MÓDULO | ÂNGULO | | GERAÇÃO | ATIVA | REATIVA | APARENTE |
| IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR | 0,0120 | 89,1680 | | CARGA | 14,3498 | 3,8172 | |
| IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA | 0,2107 | 89,1680 | | CARGA CRÍTICA | 11,7982 | 4,5826 | 12,6569 |
| | 0,2227 | -90,8320 | | | 13,0171 | 5,0560 | 13,9645 |
| | MÓDULO | ÂNGULO | | | S_i | S_n | M(%) |
| TENSÃO NO GERADOR | 1,0490 | 22,3000 | | ÍNDICES | 12,66 | 13,96 | -9,36 |
| TENSÃO NA CARGA | 1,0752 | 13,5455 | | | | | |
| TENSÃO CRÍTICA NA CARGA | 0,7404 | -19,2130 | | | | | |
| | ATIVA | REATIVA | APARENTE | SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO: | | 34-21-22-19-16-30 | |
| GERAÇÃO | 14,3498 | 3,8172 | | IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE | MÓDULO | ÂNGULO | |
| CARGA | 14,3167 | 1,5406 | 14,3994 | IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR | 0,0711 | 87,3328 | |
| CARGA CRÍTICA | 42,9292 | 4,6196 | 43,1771 | IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA | 0,1972 | -4,8409 | |
| | S_i | S_n | M(%) | | 0,2723 | -47,2325 | |
| ÍNDICES | 14,40 | 43,18 | 66,65 | | MÓDULO | ÂNGULO | |
| | | | | TENSÃO NO GERADOR | 1,0490 | 22,3000 | |
| | | | | TENSÃO NA CARGA | 0,9341 | -16,2072 | |
| | | | | TENSÃO CRÍTICA NA CARGA | 0,7657 | -25,6692 | |
| SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO: | | 34-21-22 | | | ATIVA | REATIVA | APARENTE |
| IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE | MÓDULO | ÂNGULO | | GERAÇÃO | 14,3498 | 3,8172 | |
| IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR | 0,0244 | 89,6571 | | CARGA | 6,3263 | 0,4672 | 6,3435 |
| IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA | 0,1974 | 44,2470 | | CARGA CRÍTICA | 6,8882 | 0,5087 | 6,9069 |
| | 0,2555 | -33,0943 | | | S_i | S_n | M(%) |
| | MÓDULO | ÂNGULO | | ÍNDICES | 6,34 | 6,91 | 8,16 |
| TENSÃO NO GERADOR | 1,0490 | 22,3000 | | | | | |
| TENSÃO NA CARGA | 1,0765 | 9,3914 | | | | | |
| TENSÃO CRÍTICA NA CARGA | 0,7448 | -24,8147 | | SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO: | | 34-21-22-19-16-30-28 | |
| | ATIVA | REATIVA | APARENTE | IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE | MÓDULO | ÂNGULO | |
| GERAÇÃO | 14,3498 | 3,8172 | | IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR | 0,1380 | 91,0440 | |
| CARGA | 6,5423 | 0,0297 | 6,5423 | IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA | 0,1291 | -21,4718 | |
| CARGA CRÍTICA | 21,6786 | 0,0984 | 21,6788 | | 0,2600 | -68,3070 | |
| | S_i | S_n | M(%) | | MÓDULO | ÂNGULO | |
| ÍNDICES | 6,54 | 21,68 | 69,82 | TENSÃO NO GERADOR | 1,0490 | 22,3000 | |
| | | | | TENSÃO NA CARGA | 0,8739 | -57,7081 | |
| | | | | TENSÃO CRÍTICA NA CARGA | 1,3366 | -41,1486 | |
| SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO: | | 34-21-22-19 | | | ATIVA | REATIVA | APARENTE |
| IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE | MÓDULO | ÂNGULO | | GERAÇÃO | 14,3498 | 3,8172 | |
| IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR | 0,0435 | 91,5016 | | CARGA | 5,5348 | -1,5296 | 5,7423 |
| IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA | 0,1468 | 20,1762 | | CARGA CRÍTICA | 6,6987 | -1,8513 | 6,9499 |
| | 0,2332 | -42,3876 | | | S_i | S_n | M(%) |
| | MÓDULO | ÂNGULO | | ÍNDICES | 5,74 | 6,95 | -17,38 |
| TENSÃO NO GERADOR | 1,0490 | 22,3000 | | | | | |
| TENSÃO NA CARGA | 1,0510 | 5,4448 | | CAMINHO DE TRANSMISSÃO: | | 34-21-22-19-16-30-28-29 | |
| TENSÃO CRÍTICA NA CARGA | 0,6640 | -12,7592 | | IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE | MÓDULO | ÂNGULO | |
| | ATIVA | REATIVA | APARENTE | IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR | 0,1400 | 86,9675 | |
| GERAÇÃO | 14,3498 | 3,8172 | | IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA | 0,1374 | -22,8839 | |
| CARGA | 3,8708 | 2,2502 | 4,4774 | | 0,0290 | 172,8266 | |
| CARGA CRÍTICA | 7,7127 | 4,4835 | 8,9212 | | MÓDULO | ÂNGULO | |
| | S_i | S_n | M(%) | TENSÃO NO GERADOR | 1,0490 | 22,3000 | |
| ÍNDICES | 4,48 | 8,92 | 49,81 | TENSÃO NA CARGA | 0,8829 | -62,7516 | |
| | | | | TENSÃO CRÍTICA NA CARGA | 3,0719 | 8,6184 | |
| SUB-CAMINHO DE TRANSMISSÃO: | | 34-21-22-19-16 | | | ATIVA | REATIVA | APARENTE |
| IMPEDÂNCIA DO RAMO SÉRIE | MÓDULO | ÂNGULO | | GERAÇÃO | 14,3498 | 3,8172 | |
| IMPEDÂNCIA SHUNT NO GERADOR | 0,0590 | 85,2494 | | CARGA | 33,0229 | -8,6997 | 34,1497 |
| IMPEDÂNCIA SHUNT NA CARGA | 0,2124 | -12,3131 | | CARGA CRÍTICA | 326,2837 | -85,9578 | 337,4163 |
| | 0,1234 | -118,3230 | | | S_i | S_n | M(%) |
| | MÓDULO | ÂNGULO | | ÍNDICES | 34,15 | 337,42 | -89,88 |
| TENSÃO NO GERADOR | 1,0490 | 22,3000 | | | | | |
| TENSÃO NA CARGA | 0,8834 | -11,9939 | | | | | |

Tabela 3: Análise dos Sub-Caminhos do Caminho Mais Carregado de Transmissão para o Ponto de Operação S34_A06

| Iteração | Geração (MW) | | | | | | Perdas (MW) |
|----------|--------------|------|------|------|------|------|-------------|
| | G1 | G26 | G31 | G32 | G33 | G34 | |
| S34_A06 | 3300 | 3879 | 1320 | 1200 | 1200 | 1434 | 604 |
| 1 | 3300 | 3879 | 1320 | 1200 | 1200 | 1385 | 550 |

Tabela 4: Variação da Geração Ativa e Perdas Ativas no Sistema Antes e Após Diminuição do Fluxo do Ramo 28-29

| Iteração | V (pu) | S_i (pu) | S_m (pu) | M (pu de S_m) | β (graus) |
|----------|--------|------------|------------|------------------|-----------------|
| S34_A06 | 0,878 | 34,707 | 35,7 | 0,028 | 179 |
| 1 | 0,908 | 34,707 | 40,4 | 0,141 | 170 |

Tabela 5: Avaliação da Máxima Carga na Barra 29 Antes e Após Diminuição do Fluxo do Ramo 28-29

| Iteração | Barra Crítica | Caminho de Transmissão Mais Carregado | Ramo Crítico |
|----------|---------------|---------------------------------------|--------------|
| 1 | 29 | 34-21-22-19-16-30-28-29 | 28-29 |
| 2 | 29 | 34-21-22-19-16-30-28-29 | 28-29 |
| 3 | 29 | 31-17-21-22-19-16-30-28-29 | 28-29 |
| 4 | 29 | 32-18-19-16-30-28-29 | 28-29 |
| 5 | 29 | 32-18-19-16-30-28-29 | 28-29 |
| 6 | 29 | 31-17-18-19-16-30-28-29 | 28-29 |
| 7 | 29 | 31-17-18-19-16-30-28-29 | 17-18 |

Tabela 6: Barra, Caminho Transmissão Mais Carregado e Ramo Críticos Antes de Cada Iteração

| Iteração | Geração (MW) | | | | | | Perdas (MW) |
|----------|--------------|------|------|------|------|------|-------------|
| | G1 | G26 | G31 | G32 | G33 | G34 | |
| S34_A06 | 3300 | 3879 | 1320 | 1200 | 1200 | 1434 | 604 |
| 1 | 3300 | 3879 | 1320 | 1200 | 1200 | 1385 | 550 |
| 2 | 3618 | 4267 | 1307 | 1192 | 1196 | 634 | 481 |
| 3 | 3967 | 4694 | 1212 | 1108 | 1111 | 41 | 400 |
| 4 | 3765 | 5163 | 1101 | 1007 | 1009 | 9 | 320 |
| 5 | 3473 | 5679 | 999 | 914 | 915 | 7 | 253 |
| 6 | 3128 | 6247 | 900 | 824 | 825 | 1 | 192 |
| 7 | 3390 | 5921 | 810 | 906 | 908 | 3 | 204 |

Tabela 7: Variação da Geração Ativa e Perdas Ativas no Sistema Após Cada Iteração

O ponto de operação após a iteração 7, foi analisado pelo programa EstabTen e a barra 29 continuou sendo a mais crítica. O programa CaTrans determinou caminhos mais carregados. Ao se aplicar o programa FLUPOT, não foi possível conseguir mais reforço no sistema. Em todas as tentativas, S_m sempre diminuiu. Isto, provavelmente, por que a tendência de decréscimo de geração na barra 34 foi interrompida, dado que ela chegou ao limite mínimo.

O ponto de operação resultante das 7 iterações com res-

peito ao ponto de operação S34_A06, considerado o melhor possível, tem um aumento substancial na margem $M = (1 - S_i/S_m)$ de 0,028 para 0,432. O Índice de Influência da ação de reforço traduz o benefício:

$$II = [(M_i/M_o) - 1] = 14,43$$

o que corresponde a um aumento de 1443%. Esse número muito grande deve-se à margem inicial muito pequena, que

| Iteração | V (pu) | S _l (pu) | S _m (pu) | M (pu de S _m) | β (graus) |
|----------|--------|---------------------|---------------------|---------------------------|-----------|
| S34_A06 | 0,878 | 34,707 | 35,7 | 0,028 | 179 |
| 1 | 0,908 | 34,707 | 40,4 | 0,141 | 170 |
| 2 | 0,906 | 34,707 | 43,4 | 0,200 | 165 |
| 3 | 0,907 | 34,707 | 47,0 | 0,261 | 155 |
| 4 | 0,948 | 34,707 | 51,2 | 0,322 | 141 |
| 5 | 0,964 | 34,707 | 54,1 | 0,348 | 131 |
| 6 | 0,996 | 34,707 | 57,9 | 0,401 | 119 |
| 7 | 0,997 | 34,707 | 61,1 | 0,432 | 121 |

Tabela 8: Avaliação da Condições de Segurança de Tensão na Barra 29 Após Cada Iteração

refletia o fato do ponto de operação S34_A06 quase corresponder ao ponto de máxima carga na barra 29.

Uma outra maneira de analisar as conseqüências das ações de reforço é verificar que S_m aumentou de 35,7 para 61,1 MVA, que significa um reforço de 71%.

Da mesma forma, o ângulo β decresceu, conforme desejado, da posição quase limite, 179°, para 121°.

A metodologia apresentada foi aplicada com sucesso em vários sistemas a saber: IEEE 24 barras, equivalente S/SE de 395 barras, S/SE de 1750 barras. Deve ser notado que o tamanho do problema não cresce com o número de barras por que: 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.

No exemplo numérico mostrado com o sistema de 34 barras, o problema foi criado artificialmente através do aumento de carga na barra 29 e conseqüente aumento de geração na barra 34. Em outros testes observou-se que, quando a carga aumenta em toda uma região e a geração correspondente é distribuída entre várias unidades, tanto a barra crítica como os caminhos mais carregados e os ramos de transmissão críticos, variam de local a cada iteração do processo de reforço.

5 CONCLUSÃO

Apresentou-se uma metodologia seqüencial iterativa para reforçar as condições de segurança de tensão. Essa tarefa envolve, a cada iteração, a utilização em seqüência dos programas computacionais EstabTen, que faz a avaliação das condições nodais de carregamento, determinando a barra mais crítica, CaTrans que determina os caminhos de transmissão mais carregados e nestes, o ramo crítico, e FLUPOT que diminui o fluxo de potência em ramos de transmissão críticos

através do redespacho de potência reativa e, se necessário, ativa.

Os resultados numéricos indicam que a determinação analítica do ramo a ter seu fluxo de potência diminuído funcionou perfeitamente. A metodologia iterativa usada também funcionou muito bem.

A metodologia apresentada foi aplicada com sucesso em vários sistemas. O tempo computacional não cresce com o tamanho do sistema e não impede que essa metodologia venha a ser utilizada na operação em tempo real.

Embora existam centenas de artigos na literatura que tratam da fase de avaliação das condições de segurança de tensão, existem aproximadamente dez artigos que tratam da fase de reforço. Nenhum deles parece adequado à operação em tempo real. O ramo crítico é mencionado somente em Garcia et al. (1999), associado à barra crítica identificada pela análise modal, nunca recomendada para a operação em tempo real, e em Hernández et al. (2003), onde o ramo crítico é associado às perdas ativas e indiretamente ao problema de margem de potência reduzida, o que nem sempre é verdade. Este é o primeiro artigo que, para reforçar as condições do sistema, lida com a origem do problema: o fluxo de potência excessivo em certo ramo de transmissão. E ainda, que para verificar a eficácia das ações de reforço, monitora a grandeza física de real interesse: a margem de potência.

6 RECONHECIMENTOS

Este artigo apresenta parte dos resultados do contrato AE 16/98 entre a FPLF da PUC/Rio e o CEPEL. Os dois primeiros autores receberam suporte financeiro do CNPq e da FAPERJ.

REFERÊNCIAS

Brown, H.E., Shipley, R.B., Coleman, D. & Neid Jr., R.E. (1969). "A Study of Stability Equivalents", *IEEE Trans.*

on *Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-88, No. 2, pp. 200-207.

dos Santos, J.O.R., França, R.F., Prada, R.B., Ferreira, L.C.A., Bianco, A. (2003). "Índices e Margens para Avaliação da Segurança de Tensão na Operação em Tempo Real", *5th Latin-American Congress: Electricity Generation and Transmission*, São Pedro, São Paulo.

Garcia, A.V., de Almeida, M.C., (1999). "Identificação de Ramos Críticos para Estabilidade Tensão Baseada na Análise Modal do Sistema", *XV SNPTEE*, Foz do Iguaçu.

Hernández, E.E.N., Castro Jr, C.A., da Silva, L.C.P., Alves, D.A. (2003). "Continuation Power Flow: Automatic Parameter Determination, *5th Latin-American Congress: Electricity Generation and Transmission*, São Pedro, São Paulo.

Kimbark, E.W. (1968). "Power System Stability, Synchronous Machines", Vol. III, Dover Publications.

Prada, R.B., Cory, B.J. & NavarroPerez, R. (1990). "Assessment of Steady State Voltage Collapse Critical Conditions", *10th Power Systems Computation Conference*, Graz, Austria, pp. 1189-1195.

Prada, R.B., Zambroni, A.C., Vieira Filho, X., Massaud, A.G. & Oliveira, J.C.C. (1992). "Voltage Stability: Phenomena Characterization Based on Reactive Control Effects and System Critical Areas Identification", *III Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica*, Belo Horizonte.

Prada, R.B., Palomino, E.G.C., dos Santos, J.O.R., Bianco, A. & Pilotto, L.A.S. (2002a). "Voltage Stability Assessment for Real Time Operation", *Proc. IEE Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 149, Issue 2, pp.175-180.

Prada, R.B., Souza, L.J. & Sousa, L.A.P. (2002b). "The Need for a New Constraint on Voltage / Reactive Power Studies to Ensure Proper Voltage Control", *Int. J. of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 24, Issue 7, pp. 535-540.