

RETIRADA DE SOBRECARGA ATRAVÉS DA FERRAMENTA DE FLUXO DE CARGA

L. DELBONI¹, FERNANDO EUGÊNIO¹, A. C. ZAMBRONI DE SOUZA², L. M. HONÓRIO²,
RAFAEL CORADI LEME², B. ISAIAS LIMA LOPES²

¹CTEEP

Companhia de transmissão de Energia Elétrica Paulista
E-mails: fvicinanza, ldelboni@ctEEP.com.br

² Universidade Federal de Itajubá

Grupo de Engenharia de Sistemas GESis,
CP 50, Itajubá, MG, 37500-000

E-mails: zambroni, demello, leme, isaias@unifei.edu.br

Abstract- *This paper deals with the problem of removing overload in transmission lines of power systems considering the power flow equations. The generators more sensitive with respect with the flow in a transmission line are identified. Then, an extra equations associated with the transmission line overloaded is incorporated into the power flow Jacobian. This is compensated by including a column connected with the generators likely to play redispatch. The process is then executed by Newton's method. The methodology is incorporated into the continuation method, enabling one to determine the system load margin.*

Key words: overload, active power redispatch, continuation method.

Resumo- Este trabalho aborda o problema de remoção de sobrecarga em sistemas elétricos a partir de ações de controle consideradas no Jacobiano de fluxo de carga. No que diz respeito a redespacho, os geradores mais sensíveis ao fluxo em uma determinada linha são determinados. Uma equação associada ao fluxo na linha sobrecarregada é incluída, e uma coluna associada aos geradores para redespacho é também considerada. O processo é então executado através do método de Newton. A metodologia é incorporada ao método da continuação, que fornece a margem de carga do sistema.

Palavras chave: sobrecarga, redespacho de potência ativa, método da continuação.

1. Introdução

A operação de sistemas de potência está associada a uma série de estudos visando a manutenção de condições operativas satisfatórias. Desta forma, estudos de estabilidade transitória e de longo termo e de estabilidade de tensão devem ser previamente executados. Alguns destes estudos requerem um tempo computacional bastante elevado, o que faz com que eles sejam realizados *off line* [1,2]. Todavia, alguns estudos de estabilidade podem ser desenvolvidos através de ferramentas estáticas, traduzindo-se numa redução do esforço computacional requerido, permitindo que as mesmas sejam empregadas em tempo real.

Desta forma, estudos de estabilidade de tensão, corte de carga por subtensão e máxima transferência de potência podem ser realizados de uma forma mais efetiva. Isto é bastante importante na fase de planejamento, em que diversas condições operativas devem ser testadas, e também na fase de operação, em que a rapidez na resposta é primordial. Estes estudos devem aliar a velocidade computacional com a

precisão na resposta, conforme relatado em diversos trabalhos da literatura [3-6].

Esta abordagem pode ser aplicada para o caso de retirada de sobrecargas em linhas de transmissão. A alternativa mais comumente empregada relaciona-se com métodos de otimização, que tendem a apresentar uma resposta bastante eficiente, mas que pode estar associada a um tempo computacional dispendioso. Note, todavia, que resultados reportados mostram um esforço muito grande na superação deste problema, com bons resultados obtidos. Recentemente, algumas restrições têm sido incorporadas à formulação de fluxo de carga convencional, fornecendo resultados bastante interessantes com um baixo tempo computacional [7-8]. Desta forma, pode-se determinar o instante de bloqueio de tapes de transformadores, montante de corte de carga e redespacho de potência ativa, entre outras aplicações. Uma outra aplicação de grande apelo refere-se à determinação do ponto de sela-nó através desta abordagem, com bons resultados reportados na literatura [9-11]. Há também a possibilidade de inclusão das equações de sobrecarga no jacobiano de fluxo de carga, que deve ser removida através de redespacho de potência ativa [12].

Esta última alternativa é apresentada e testada neste trabalho. A partir de uma formulação básica, a idéia de remover redespacho em linhas de transmissão é estendida para outros controles, que serão detalhados nas seções seguintes. De forma a avaliar o impacto destas ações na operação do sistema, o efeito na margem de carga será avaliado. Para este fim, o método da continuação será empregado, por ser bastante difundido e por se basear no mesmo conjunto de equações utilizado para os controles propostos. Os resultados são obtidos a partir do emprego de um sistema real da região Sudeste do Brasil.

2. Aspectos Teóricos do método da continuação

O método da continuação [13-16] é bastante conhecido na literatura para a determinação de bifurcações de sistemas dinâmicos [17-19]. Neste trabalho, tal método será empregado para a determinação do ponto de máxima transferência de potência entre duas áreas de um sistema elétrico. Muito embora este tipo de estudo possa estar diretamente relacionado a estudos de colapso de tensão, trataremos esta ferramenta de forma restrita ao problema de máximo carregamento.

A metodologia é baseada no seguinte modelo de sistema:

$$f(x, \lambda) = 0$$

(1)

no qual x representa as variáveis de estado e λ o parâmetro do sistema usado para levar o sistema de um ponto de equilíbrio a outro. Este tipo de modelo foi empregado para vários estudos de colapso de tensão, com λ sendo considerado o fator de crescimento de carregamento/geração do sistema ou o nível de potência transferida. Dois passos movem o sistema: Passo predictor: É usado para indicar a direção a se mover. O vetor tangente pode ser usado para este propósito, e pode ser obtido como segue:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

(2)

Um aumento de carregamento é dado por:

$$P = P_0(1 + \Delta\lambda)$$

$$Q = Q_0(1 + \Delta\lambda)$$

(3)

Em (3), P e Q são as potências ativa e reativa após a variação do parâmetro λ , e P_0 e Q_0 as potências ativa e reativas iniciais. Assim, pode-se reescrever (2) como segue:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{bmatrix} \Delta \lambda$$

(4)

Ou ainda,

$$VT = \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \frac{1}{\Delta \lambda} = J^{-1} \begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{bmatrix}$$

(5)

No qual J é o Jacobiano do fluxo carregado, θ e V as variáveis de estado (ângulo de fase e magnitude da tensão, respectivamente) e P_0 e Q_0 são as potências ativas e reativas especificadas de cada barra. VT é o vetor tangente. O tamanho do passo predictor é dado por:

$$\Delta \lambda = 1/\|VT\|$$

(6)

onde $\|\cdot\|$ representa a norma do vetor tangente. Da expressão (6) é fácil notar que o numero de interações para obtenção do novo ponto de operação é reduzido, pois quanto mais longe do ponto de colapso o sistema se apresenta, maior é o tamanho deste passo e quanto mais próximo do ponto de colapso, menor é o passo. O ponto de operação atual é obtido através do passo corretor.

Passo corretor: É obtido através da inclusão de uma equação extra. A equação vem do fato de que os vetores predictor e corretor são perpendiculares. Se o passo predictor for usado como chute inicial para um programa de fluxo de carga, o passo corretor geralmente converge rapidamente.

A metodologia acima descreve o método da continuação em um sentido geral. A estrutura da matriz Jacobiana associada com esse método é dada por:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ rsh1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N & kl \\ M & L & \\ FF1 & & kF1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \end{bmatrix}$$

(7)

Onde H, N, M e L são as sub-matrizes do Jacobiano do fluxo de carga, e o vetor kl representa as predeterminadas direções de aumento de geração e carregamento. $FF1$ e $kF1$ correspondem à parametrização da equação no fluxo de potência continuado. Durante a região "normal" de continuação, $kF1$ é igual a 1 e $FF1$ é uma linha com todos os elementos iguais a zero. Quando o sistema se aproxima da bifurcação, usualmente as equações (da matriz Jacobiana) tornam-se más condicionadas, e uma

parametrização diferente é usada, conforme a estrutura abaixo:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ rsh1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N & k1 \\ M & L & \\ \hline & & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \end{bmatrix}$$

(8)

Na estrutura acima “1” é um vetor linha, associado à nova variável parâmetro. Ele é todo zero, exceto na posição correspondente ao parâmetro desejado (geralmente a variável de estado que apresentar maior variação relativa ao último ponto calculado. Com isso λ passa a ser uma variável de estado, e uma antiga variável de estado, (e.g., um nível de tensão |V|) passa a ser o parâmetro do sistema.

Identificando um limite de fluxo não é possível superar esse problema. O processo continuado pode levar a identificação de um ou mais limites. Resolver esse problema requer considerações adicionais. A estrutura dos problemas e seus resultados são ilustrados mais adiante.

A Figura 1 ilustra este método, facilitando sua compreensão.

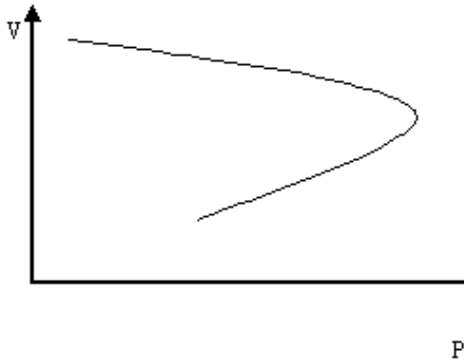


Figura 1 – Método da Continuação

3. Problema proposto e solução sugerida.

A principal proposta deste trabalho é incorporar no método da continuação os limites de carregamento das linhas de transmissão. Isso pode ser feito através da inclusão de uma nova linha (*FF2*) e uma nova coluna (*k2*) no sistema de jacobiano, como mostrado na equação (9):

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ rsh1 \\ rsh2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N & k1 & \\ M & L & & k2 \\ \hline FF1 & & kF1 & \\ \hline & FF2 & & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \\ TS \end{bmatrix}$$

(9)

O vetor linha *FF2* contém as derivadas parciais da equação associada de potência ativa com a linha de transmissão sobrecarregada com as respectivas variáveis de estado. Essa é uma linha com não mais que quatro elementos não nulos. Quando for identificado a sobrecarga, o carregamento da linha de transmissão é captado em seu limite máximo explicitamente através da inclusão dessas equações. Essa nova equação é incluída permanentemente no sistema de equações, resultando em uma nova linha *FF2* no Jacobiano.

À medida que esse fluxo é regulado, o redespacho é aplicado. O redespacho é modelado através da inclusão de uma nova coluna (*k2*) associada aos geradores escolhidos para remoção da sobrecarga. Os valores associados a esses geradores é 1 (gerador escolhido para o aumento da geração) e -1 (gerador escolhido para a diminuição de geração). O restante do vetor *k2* é igual a zero. Conforme um gerador é escolhido para aumentar sua geração em uma quantidade (não especificada) de *TS*, outro gerador é, obrigatoriamente, escolhido para reduzir sua geração na mesma quantidade *TS*.

Esse novo aumento de equações é resolvido pelo método de Newton-Raphson. Suas saídas são as variáveis de estado regulares (ângulo de fase nas barras PV e PQ e nível de tensão nas barras PQ) e o desvio de potência nas máquinas escolhidas para remover a sobrecarga (*TS*). Da equação (9), a sobrecarga não é uma função explícita do redespacho. A cada interação é calculado se o carregamento foi violado. O processo converge para um valor de redespacho correspondente ao carregamento limite da linha limitada. Agora, com a sobrecarga identificada, o carregamento da linha é tomado constante durante o carregamento do sistema ou aumentos de transferência de potência subsequentes. Se uma nova sobrecarga for identificada, outro par de redespacho é identificado, e a estrutura do Jacobiano abaixo envolve:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ rsh1 \\ rsh2 \\ rsh3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N & k1 & & \\ M & L & & k2 & k3 \\ \hline FF1 & & kF1 & & \\ \hline & FF2 & & 0 & \\ \hline & FF3 & & & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \\ TS1 \\ TS2 \end{bmatrix}$$

(10)

Na estrutura acima, *FF3*, *rsh3* e *k3* têm o mesmo significado de *FF2*, *rsh2* e *k2*, respectivamente. Nota-se que o método resulta em diferentes valores de redespacho *TS1* e *TS2*, tornando possível o tratamento de diferentes restrições simultaneamente. Como pode ser visto da equação (10), a inclusão de novas restrições é simples.

Outra opção possível pela metodologia é a remoção da linha de transmissão sobrecarregada. Neste caso estruturas mostradas nas equações (9) e (10) não são aplicadas. O carregamento continua a crescer

enquanto outro limite é obtido. Nesta situação o sistema pode não estar hábil a obter um ponto de equilíbrio. Isso significa que o ponto em que cada linha é removida representa o ponto de margem de carregamento.

4. ASPECTOS PRÁTICOS DE IMPLEMENTAÇÃO

De forma a apresentar os resultados obtidos, alguns poucos casos serão mostrados. Será privilegiado mostrar resultados dos sistemas de 1118 barras do IEEB, para então mostrar os resultados com o sistema elétrico brasileiro utilizado.

Problemas de colapso de tensão

Este teste fornece a margem de carga quando o limite de carregamento nas linhas é desprezado. Neste caso, como emprega-se o método da continuação, o programa pára a execução quando problemas de colapso de tensão ocorrem. O que faz o programa parar a execução é a identificação de um autovalor próximo a zero.

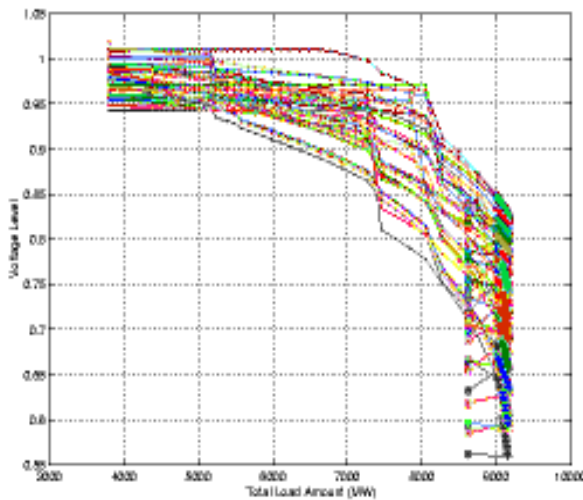


Figura 2 – Problemas de colapso de tensão

Sobrecarga removida

Durante o carregamento, uma sobrecarga na linha que liga as barras 43 e 44 é identificada. Utilizando a metodologia empregada, o gerador 40 é escalado para reduzir sua geração, enquanto o gerador 54 é recomendado para aumento de geração. Depois desta identificação, a seguinte seqüência é estabelecida:

- Redespacho ocorre nas máquinas indicadas.
- Um novo ponto de operação é obtido.
- Novos aumentos de carga ocorrem, mas o carregamento na linha é mantido no limite. O processo pára quando o redespacho não é mais suficiente para retirar a sobrecarga.

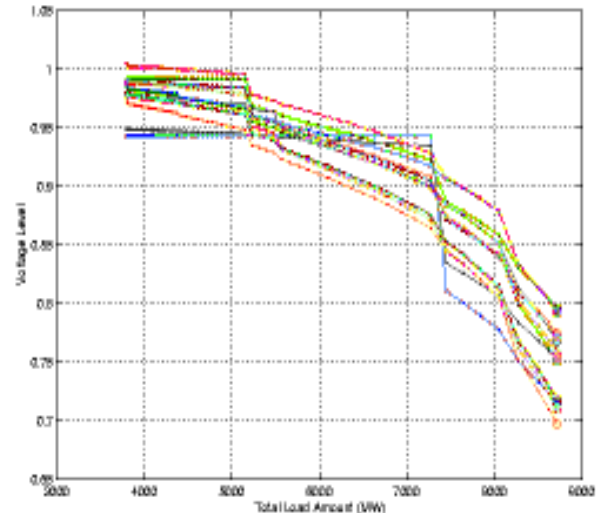


Figura 3 – Sobrecarga removida

Sobrecarga não removida

É interessante observar que o método aqui proposto pode não remover a sobrecarga em uma linha. Neste caso, o conjunto de equações diverge. Para se obter uma solução, deve-se executar redespacho em um número maior de máquinas, ou então, pode até mesmo não existir solução, caso em que a linha em sobrecarga é um radial. O caso abaixo mostra o caso em que a linha que conecta as Barras 35 e 36 entra em sobrecarga. Os geradores 40 e 31 são indicados para redespacho, mas o problema não é resolvido, conforme indicado na Figura 3.

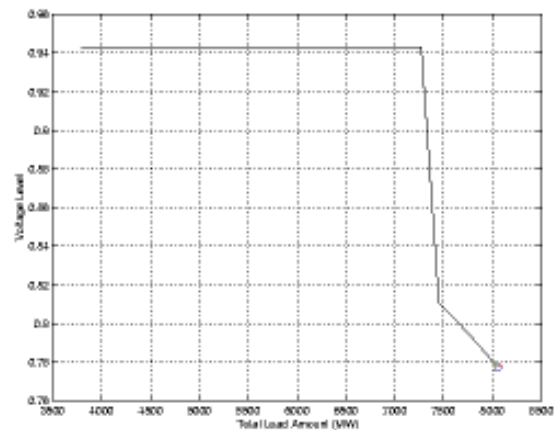


Figura 4 – Sobrecarga não removida

Para o sistema Sul-Sudeste, a execução mostrou diversas linhas em sobrecarga. Escolhendo a linha 2320 para retirada de sobrecarga, um redespacho de 0,71 pu é alocado aos geradores 1502 e 1107. No entanto, se a linha 2239 for a escolhida, redespacho nos geradores 1107 e 305 não é suficiente para remoção da sobrecarga.

5. CONCLUSÃO

A ferramenta apresentada pode ser bastante eficiente para determinação de diversos controles em sistemas de potência. A velocidade de resposta permite analisar diversas condições operativas e os efeitos dos potenciais controles considerados. Testes com sistemas reais mostraram que a ferramenta não tem problemas de manipular sistemas de grande dimensão, de forma que sua aplicação não se limita a sistemas bem comportados de pequeno porte.

6. REFERÊNCIAS

1. Wood, A.J., Wollenberg, B.F. "Power Generation, Operation & Control", John Wiley & Sons, pp. 123, 1984.
2. P. Kundur - *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, 1994.
3. N. Mithulananthan, C. A. Cañizares, J. Reeve – "Indices to Detect Hopf Bifurcations in Power Systems", *Thirty-Second Annual North American Power Symposium Proceedings*, Waterloo, Canadá, Vol. II, pp. 15-18 to 15-24, Oct. 2000.
4. Hiroshi Ohtsuki, Akihko Yokoyama and Yasuji Sekine, "Reverse Action of On-Load Tap Changer in Association With Voltage Collapse", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 6, n.1, pp. 300-306, February 1991.
5. C. Vournas, G. A. Manos, "Emergency Tap-Blocking to Prevent Voltage Collapse", *IEEE Porto Powertech*, Portugal, September 10-13th, 2001.
6. Z. Feng, V. Ajjarapu, D. J. Maratukulan, "A Practical Minimum Load Shedding Strategy to Mitigate Voltage Collapse", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 13, n.4, pp. 1285-1291, November 1998.
7. B. Isaias Lima Lopes and A. C. Zambroni de Souza, "On Multiple Tap-Blocking to Avoid Voltage Collapse", *Electric Power Systems Research*, Vol. 67, N. 3, December 2003, pp 225-231
8. Rafael C. Leme, L. C. Araújo Ferreira, B. I. Lima Lopes, A. C. Zambroni de Souza, "Redispatch Generators to Reduce the Standing Phase Angle During the System Restoration", *aceito para publicação no IEE Proceedings, Generation, Transmission and Distribution*.
9. S. Greene, I. Dobson and F. Alvarado, "Sensitivity of the Loading Margin to Voltage Collapse With Respect to Arbitrary Parameters", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, No. 1, Feb. 1997, pp. 262-272.
10. A. C. Zambroni de Souza, M. Glavic and F. Alvarado, "Continuation Power Flow With Overload and Redispatch", *Thirty-Second Annual North American Power Symposium Proceedings*, Waterloo, Canada, 23-24 Outubro 2000, pp. 1(26-31).
11. F. L. Alvarado and T. H. Jung, "Direct Detection of Voltage Collapse Conditions," *Proceedings of the 1988 International Conference on Bulk Power System Voltage Phenomena Voltage Stability and Security*, Trout Lodge, Potosi, Missouri, Sept. 18-24, 1988. Available as EPRI Report EPRI EL-6183, Jan. 1989, pp. 5.23--5.38.
12. A. C. Zambroni de Souza, M. Glavic, F. Alvarado, "Continuation Power Flow with Overload and Redispatch", *Thirty-Second Annual North American Power Symposium Proceedings*, Waterloo, Canada, 23-24 Outubro 2000, pp. 1(26-31).
13. C. A. Cañizares and F. L. Alvarado, "Point of Collapse and continuation methods for large ac/dc systems," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 8, no. 1, Feb. 1993, pp. 1-8.
14. V. Ajjarapu, "Identification of steady state voltage stability in power systems," *Proc. of International Conference on High Technology in the Power Industry*, Mar. 1988, pp. 244-247.
15. H. D. Chiang, A. Fluak, K. S. Shah, N. Balu, "A Practical Tool for Tracing Power System Steady-State Stationary Behavior Due To Load And Generation Variations", *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 10, no. 2, May 1995, pp. 623-634.
16. F. Alvarado, G. Anderson, H. Clark, C. Concordia, B. Gao, Y. Mansour, P. Kundur, P. Lof, C. Taylor, W. Xu., "Suggested Techniques for Voltage Stability Analysis", *IEEE Power Engineering Society Report*, IEEE Catalog Number 93TH0 620-5 PWR, 1993.
17. Dobson, "Observations on the Geometry of Saddle Node Bifurcation and Voltage Collapse in Electrical Power Systems", *IEEE Transactions on Circuits and Systems, Part I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 39, No. 3, Mar. 1992, pp. 240-243.
18. R. Seydel, *From Equilibrium to Chaos-Practical Bifurcation and Stability Analysis*, Elsevier Science, North-Holland, 1988.
19. C. Zambroni de Souza, C. A. Cañizares and V. H. Quintana, "New Techniques to Speed up Voltage Collapse Computations Using Tangent Vectors", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, No. 3, Aug. 1997, pp. 1380-1387.