

# Método da Continuação Considerando Retirada de Sobrecarga em Linhas de Transmissão

A .C. Zambroni de Souza, Leonardo de Mello Honório, Otávio Augusto Salgado Carpinteiro – UNIFEI Luiz Delboni - CTEEP

Resumo- Este documento tem por objetivo apresentar as atividades desenvolvidas durante o contrato de Pesquisa e Desenvolvimento concordado entre UNIFEI/FUPAI e CTEEP. Desta forma, aspectos teóricos são discutidos, e resultados comentados. Os testes foram realizados com ajuda de sistemas teste de pequeno porte e do sistema real da CTEEP.

**Palavras-chave—método da continuação, sobrecarga em linhas de transmissão, sistemas de potência.**

## I. INTRODUÇÃO

O projeto propõe uma nova ferramenta de análise de sistemas de potência, com ênfase especial em sistemas de transmissão. A idéia central consiste em empregar o método da continuação para a determinação da margem de carga do sistema. De forma a levar em conta o sério problema de sobrecarga em linhas de transmissão, uma política de redespacho de potência ativa é proposta.

Neste trabalho, a retirada de sobrecargas será executada através de um programa de fluxo de carga que leve em conta estas restrições. Assim, a metodologia proposta incorpora, dentro do método da continuação, as violações encontradas durante o processo de aumento de carga. Limites de geração de potências ativa e reativa já eram facilmente considerados por este método. Entretanto, de tratamento de limites de carregamento em linhas de transmissão não era considerado, o que representa uma inédita contribuição.

A idéia de considerar este problema dentro do método da continuação tende a fornecer resultados interessantes, já que uma resposta sub-ótima tende a ser obtida com um esforço computacional bem menor. De forma a testar a idéia proposta, inicialmente a implementação é executada em matlab, onde pequenos sistemas são utilizados. Em uma etapa posterior, a implementação em fortran é feita, e sistemas reais com dados da CTEEP são executados.

## II. ASPECTOS TEÓRICOS DO MÉTODO DA CONTINUAÇÃO

O método da continuação [1-4] é bastante conhecido na literatura para a determinação de bifurcações de sistemas dinâmicos. 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:

$$f(x, \lambda) = 0 \quad (1)$$

no qual  $x$  representa as variáveis de estado e  $\lambda$  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  $\lambda$  sendo considerado o fator de crescimento de carregamento/geração do sistema ou o nível de potência transferida. Dois passos movem o sistema:

Passo previsor: É usado para indicar a direção a se mover. O vetor tangente pode ser usado para este propósito, e pode ser obtido como segue:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2)$$

Um aumento de carregamento é dado por:

$$\begin{aligned} P &= P_0 (1 + \Delta \lambda) \\ Q &= Q_0 (1 + \Delta \lambda) \end{aligned} \quad (3)$$

Em (3),  $P$  e  $Q$  são as potências ativa e reativa após a variação do parâmetro  $\lambda$ , e  $P_0$  e  $Q_0$  as potências ativa e reativas iniciais. Assim, podemos reescrever (2) como segue:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{bmatrix} \cdot \Delta \lambda \quad (4)$$

Ou ainda,

$$VT = \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \frac{1}{\Delta \lambda} = J^{-1} \begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

No qual  $J$  é o Jacobiano do fluxo carregado,  $\theta$  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 [5-8]. O tamanho do passo previsor é dado por:

$$\Delta \lambda = 1/\|VT\| \quad (6)$$

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

Agradecimentos a apoio financeiro devem ser feitos aqui. Exemplo: Este trabalho foi apoiado parcialmente pela Fundação de Inovação Tecnológica.

Os títulos dos trabalhos devem ser escritos com letras maiúsculas para as iniciais e minúsculas, não utilizar todas as letras maiúsculas.

E. B. Silva trabalha no Instituto de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (e-mail: ebsilva@intee.org.br).

J.E.P.S. Barbosa trabalha no Instituto de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (e-mail: barbosa@intee.org.br).

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:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ rsh1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N & k1 \\ M & L & \\ FF1 & & kF1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (7)$$

Onde H, N, M e L são as sub-matrizes do Jacobiano do fluxo de carga, e o vetor  $k1$  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:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ rsh1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N & k1 \\ M & L & \\ & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (8)$$

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  $\lambda$  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.

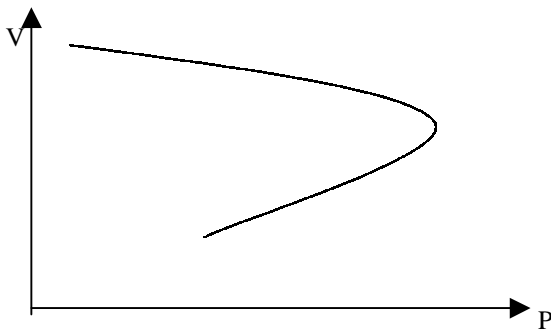


Figura 2.1 – Método da Continuação  
III. PROBLEMA PROPOSTO E SOLUÇÃO SUGERIDA.

A principal proposta deste trabalho é incorporar no método da continuação os limites de carregamento das li-

nhas 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):

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ rsh1 \\ rsh2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N & k1 & \\ M & L & & k2 \\ FF1 & & kF1 & \\ & FF2 & & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \\ TS \end{bmatrix} \quad (9)$$

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 [9-11]. 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:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ rsh1 \\ rsh2 \\ rsh3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N & k1 & & \\ M & L & & k2 & k3 \\ FF1 & & kF1 & & \\ & FF2 & & 0 & \\ & FF3 & & & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \\ TS1 \\ TS2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

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 car-

regamento 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.

#### IV. ASPECTOS PRÁTICOS DE IMPLEMENTAÇÃO

De forma a apresentar os resultados obtidos, alguns poucos casos serão mostrados. Será privilegiado mostrar resultados dos sistemas de 14 barras do IEEE, para então mostrar os resultados com o sistema da CTEEP. O usuário tem a opção de escolher a execução do método da continuação. Executando o sistema de 14 barras do IEEE, 5 linhas aparecem em sobrecarga. O usuário tem então a opção de escolher a sobrecarga a ser removida. Escolhendo, por exemplo a linha 4 para remoção de sobrecarga, um redespacho de 0.2 pu é executado nos geradores 2 e 8. Diversos casos executados mostram a eficiência do método, o que nos remete a um sistema de maior porte.

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.

#### V. CONCLUSÃO

A ferramenta disponibilizada ao final do trabalho representa uma forma inédita de abordar o problema de remoção de sobrecarga em sistemas de transmissão. Este ineditismo da ferramenta se traduzirá em uma dissertação de mestrado (vinculada ao Coordenador do projeto junto à CTEEP).

#### VI. REFERÊNCIAS

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Dobson, "Observations on the Geometry of Saddle Node Bifurcation and Voltage Collapse in Electrical Power Systems", *IEEE Transactions on Circuits and Systems, Part 1: Fundamental Theory and Applications*, vol. 39, No. 3, Mar. 1992, pp. 240-243.
6. R. Seydel, *From Equilibrium to Chaos-Practical Bifurcation and Stability Analysis*, Elsevier Science, North-Holland, 1988.
7. 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.
8. 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.
9. C. Zambroni de Souza, M. Glavic and F. Alvarado, "Continuation Power Flow With Overload and Redispach", Accepted for NAPS Conference, Oct. 2000, Waterloo, Canada.
10. 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.
11. A. C. Zambroni de Souza, M. Glavic, F. Alvarado, "Continuation Power Flow with Overload and Redispach", XXIII NAPS, Waterloo, Canada, 23-24 Outubro 2000, pp. 1( 26-31).