



VII/CE-C4-04

Corte de Carga por Subtensão em Sistemas de Potência

A. C. Zambroni de Souza

Fernando Eugênio Vicinanza

UNIFEI

zambroni@unifei.edu.br
J. Maciel Filho

UNIFEI/CTEEP

fvicinanza@ctEEP.com.br

UNIFEI/CTEEP

jmaciel@ctEEP.com.br

RESUMO-

Este artigo trata do problema de corte de carga em sistemas de potência sob o ponto de vista de tensão. Neste aspecto, são utilizadas três metodologias. A primeira aborda o problema de corte de carga através de uma metodologia comumente empregada nas empresas, enquanto que a segunda apresenta uma proposta baseada na sensibilidade das variáveis mais susceptíveis de direcionar o sistema a problemas de colapso de tensão. A terceira alternativa busca resolver o problema de se evitar corte de carga, especialmente quando o problema de sobrecarga em linhas de transmissão se apresentar. As metodologias são testadas em sistemas reais, validando a metodologia proposta.

PALAVRAS-CHAVE

Corte de carga, vetor tangente, sobrecarga

1. INTRODUÇÃO

Corte de carga em sistemas de potência, em geral, é executado em função de problemas de frequência ou subtensão. Se problemas de frequência se apresentam, diversas opções podem ser adotadas. A referência [1] propõe um método baseado em subfrequência que considera um corte de carga rápido e compensação massiva de potência reativa, enquanto que a referência [2] propõe um método em tempo real para melhorar a reserva girante do sistema. A idéia nestes artigos é encontrar um ponto operativo que não viole o balanço carga frequência.

Problemas de colapso de tensão e subfrequência podem também considerar corte de carga como uma medida corretiva. As referências [3] e [4] abordam o problema de existência de solução de fluxo de carga, enquanto que problemas de subtensão são analisados em [5], quando os efeitos do modelo de carga do sistema e o montante de corte de carga são analisados.

Portanto, estudar o problema de corte de carga em sistemas de potência pode requerer uma ferramenta de análise bastante complexa e requerer dados não disponíveis pelo analista. Este trabalho se propõe a analisar este problema, focando em primeiro lugar em uma metodologia em vigor por algumas

empresas do sistema elétrico, passando então a comparar os resultados com aqueles obtidos por uma técnica proposta aqui para este fim.

Uma possibilidade de corte de carga pode ocorrer para aliviar linhas em sobrecarga, caso redespacho de potência ativa/reactiva ou outras ações de controle não tenham seus efeitos desejados. Neste trabalho, uma alternativa ao corte de carga consiste no remanejamento de carga, efetuado através de chaveamento em sistemas de distribuição. Esta técnica foi incorporada no programa computacional desenvolvido para este trabalho e os resultados são também discutidos.

As ações de controle aqui adotadas terão seus efeitos analisados através do cálculo da margem de carga do sistema. Para este fim, será empregado o método da continuação, enquanto que as barras candidatas a experimentar corte de carga serão identificadas pelo vetor tangente.

O método da continuação [6],[7] é bastante conhecido na literatura para a determinação de bifurcações de sistemas dinâmicos [8]. 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, esta ferramenta será tratada de forma restrita ao problema de máximo carregamento.

As idéias propostas são testadas em sistemas reais, de forma a validar as metodologias e torna-las factíveis de reprodução. Para este fim, um sistema real da CTEEP é empregado, além de um sistema IEEE de 57 barras, empregado pelo fato de ter seus dados conhecidos na literatura.

2. O MÉTODO DA CONTINUAÇÃO E O VETOR TANGENTE

A metodologia é baseada no seguinte modelo de sistema:

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

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:

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

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 λ , e P_0 e Q_0 as potências ativa e reativas iniciais. Assim, pode-se reescrever (2) como segue:

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

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, 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:

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

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 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:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ rsh1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N & kI \\ M & L & \\ \hline FFI & & kFI \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (7)$$

Onde H, N, M e L são as sub-matrizes do Jacobiano do fluxo de carga, e o vetor kI representa as predeterminadas direções de aumento de geração e carregamento. FFI e kFI correspondem à parametrização da equação no fluxo de potência continuado. Durante a região “normal” de continuação, kFI é igual a 1 e FFI 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:

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

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 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.

3. AÇÕES DE CONTROLE : CORTE DE CARGA NA ÁREA SÃO PAULO

A Área São Paulo era formada pelas empresas CESP, Eletropaulo e CPFL(antes do processo de separação, privatização e criação de novas empresas de distribuição e geração), apresenta uma rede de transmissão malhada em 440 kV, que interliga as usinas do rio Paraná aos centros consumidores. A rede em 440 kV se interliga com diversos outros Sistemas de Transmissão em todas as direções. Ao norte, a Área São Paulo se interliga com a rede em 500 kV (Furnas e Cemig) do rio Paranaíba; a leste, com a rede em 500 kV (Furnas) da Área Rio de Janeiro/Espírito Santo; a oeste, com o Sistema em 230 kV (Enersul) de Mato Grosso do Sul; e, ao Sul, com dois Sistemas: (a) Sistema em 230 kV (Copel e Eletrosul) do norte do Paraná; (b) com dois troncos de interligação (Furnas) da usina de Itaipu com o Sistema Interligado Sul/Sudeste brasileiro: (I) em Tijuco Preto 345 kV, proveniente do tronco em 765 kV, que integra Itaipu 60 Hz (6300 MW) à rede, e interliga os Sistemas Sul e Sudeste brasileiros; (II) em Ibiúna 345 kV, subestação inversora do Elo em CCAT formado por dois bipolos de ± 600 kV cada, com potência nominal de 6300 MW, que integra Itaipu 50Hz ao Sistema Sudeste brasileiro.

O mercado da Área São Paulo é da ordem de 18000 MW (1/3 do mercado Sul/Sudeste brasileiro), com uma capacidade instalada de 11100 MW, e compradora de 40% da energia de Itaipu (dados de 1998). A Área São Paulo, historicamente, vinha trabalhando com folgas operativas na transmissão e na distribuição.

A entrada em operação, mais recentemente, dos troncos de transmissão responsáveis pela integração da usina de Itaipu (12600 MW de capacidade instalada) ao sistema mudou de forma acentuada, os pontos mais sensíveis do Sistema da Área São Paulo, aliviando parte do tronco de 440 kV e em contrapartida, sobrecarregando parte dos troncos de 345 kV e 230 kV. No entanto, a possibilidade de se explorar a rede malhada e todos os pontos de interligação da Área São Paulo com o restante do Sistema Interligado Sul/Sudeste proporcionou a falsa idéia de que era possível trabalhar indefinidamente com este Sistema de Transmissão.

4. REMANEJAMENTO DE CARGA

Esta técnica, conhecida por diversos operadores de sistemas elétricos, não se encontra implementada em nenhum programa computacional, de forma que estes operadores não podem realizar estudos prévios visando a validação destas medidas, além de não poderem testar diferentes valores de remanejamento. O

método consiste em chavear montantes de carga através de operação nas subestações. O programa desenvolvido neste trabalho considera a possibilidade de remanejamento de carga entre barras, deixando a cargo do usuário determinar as barras a experimentarem este intercâmbio e o percentual de carga a ser trocado. Isto permite ao operador antecipar os efeitos de situações reais que podem vir a ocorrer na operação de sistemas de distribuição.

5. RESULTADOS

Para esta seção alguns sistemas são empregados. Para testar as idéias de corte de carga descritas nas seções anteriores, são utilizados um sistema elétrico real (sistema CTEEP), enquanto que um sistema teste de 57 barras é empregado para testar a idéia de remanejamento de carga.

Política de Corte de Carga para a Área São Paulo

A referência [9], estabelece uma política de corte de carga por subtensão na Área São Paulo,:

Tabela 1- Estágios de corte de carga por empresa

Corte de Carga (MW)	Eletropaulo	CESP	CPFL
1º Estágio	200	50	50
2º Estágio	195	50	50
3º Estágio	223	50	50
4º Estágio	210	54	50

A conclusão do relatório [9] é que os montantes de corte de carga, assim como as barras previamente determinadas mostraram-se como medidas adequadas. Quanto à rampa de carga da Área São Paulo, existe um relação entre a taxa de elevação da rampa de carga e a elevação da potência fornecida pelo síncrono de Ibiúna(capacidade 1200 Mvar). Para cada elevação de 1 MW de carga na Área Paulo, o síncrono de Ibiúna contribui com 1,4 Mvar quando se tem o síncrono de Santo Ângelo desligado.

Conhecendo o comportamento da rampa de carga da Área São Paulo foi possível estabelecer o momento de corte de carga, através do monitoramento do síncrono de Ibiúna. Caso o síncrono de Ibiúna alcance o valor de fornecimento de potência reativa da ordem de 700 Mvar, é dado o alerta, e o corte de carga ocorre efetivamente para valores igual ou superiores a 1000 Mvar.

Caso Base

A Tabela 2 apresenta um sumário do caso base escolhido para a elaboração dos testes de corte de carga e ações de controle. A tabela compara a participação da geração e carga da área de interesse (Sudeste) na geração e carga totais do sistema. Esse caso se apresenta bem estressado, visto que a margem de carga apresentada foi da ordem de 3,7 %,considerando os limites de potência reativa dos geradores.

Tabela 2 – Caso Base Considerado

Novembro 1997 / Carga Média		Sumário
Geração Total (S/SE/CO)		36096,0 + j 2918,5
Carga Total (S/SE/CO)		34323,0 + j 14735,1
Geração Sudeste		18555,9 +j 1336,8
Carga Sudeste		25158,1 +j 7769,4
Compensadores	Grajaú (-300 a 400)	35
	Vitória (-30 a 60)	25
	Ibiúna (-800 a 1200)	135
	T.Preto (-200 a 300)	220
	S.Ângelo (-170 a 250)	155

Síncronos	Embuguaçú (-170 a 250)	190
Shunt (Mvar)		4873,9
Perdas		1773,0 – j 6942,7

Barras Críticas Apontadas pelo Vetor Tangente no Sistema

Tabela 3- Resultados de Corte de carga

Grupo de Barras Críticas	BASE - Barras Recomendadas Empresas- Corte de carga	BASE Barras Indicadas Vetor Tangente	Após Corte de carga de carga Recomendado pela Empresa	Após Corte de carga de carga Indicado pelo Vetor Tangente
Margem de Carga (%)	1.037	1.037	1.084	1.112
ÁREA 04	422 583	462 459 429 422		
ÁREA 05	692 546 601 647	601 681 591 694		
ÁREA 06	725 1968 1936 2018	2029 1950 1936 1960		
ÁREA 08	2228 2244 2207	2211 2182 2204 2195		

Adotando-se a política de corte de carga das Empresas da Área São Paulo, obteve-se uma margem de carga da ordem de 8,4%. Quando se estabelece corte de carga pelo vetor tangente, a margem sobe para cerca de 11,1%. Com um maior ganho na margem de carga, o sistema apresenta portanto uma maior folga, se distanciando do ponto de colapso.

Portanto, o conhecimento prévio das barras críticas sob o ponto de vista de tensão pode produzir resultados interessantes sob o ponto de controle de tensão, uma vez que o corte de carga por subtensão, ao contrário daquele empregado por problemas de frequência, depende fundamentalmente do local de aplicação.

Remanejamento de Carga

Para este fim, é utilizado o sistema de 57 barras do IEEE, devido a facilidade de visualização. Tal sistema é mostrado na Figura 1. É importante notar que a metodologia de redespacho tenta encontrar uma solução sub-ótima que resolva de maneira mais efetiva o problema de sobrecarga. Neste caso de remanejamento, o montante permitido de remanejamento é determinado pela concessionária, de forma que a sobrecarga é eliminada, mas a solução não é sub-ótima. Para o caso base, observa-se que linha de transmissão 11-41 encontra-se com um carregamento de 0.75 pu, enquanto que seu limite máximo é dado por 0.7 pu. A barra 43 toma então 25% da carga da Barra 41. A nova solução mostra a linha 11-41 com um carregamento de 0.69 pu, valor abaixo do máximo carregamento.

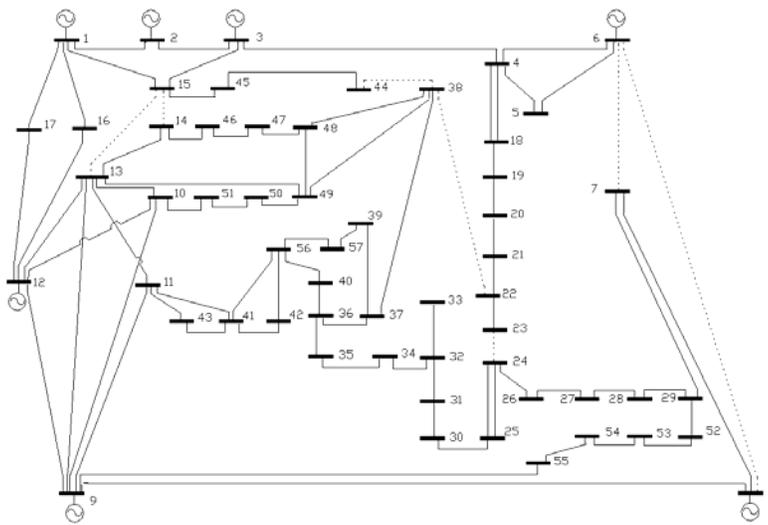


Figura 1 - Sistema de 57 barras do IEEE

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] S. A . Nirenberg, D. A . McInnis, “Fast Acting Load Shedding”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 7, No. 2, May 1992, pp. 873-877.
- [2] S. Jovanovic, B. Fox, J. G. Thompson, “ On-Line Load Relief Control”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, No. 4, November 1994, pp. 1847-1852.
- [3] 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.
- [4] S. Granville, J. C. O . Melo, A . C. G. Mello, “ Application of Interior Points Methods to Power Flow Unsolvability”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 11, n.2, pp. 1096-1103, May 1996.
- [5] M. Larsson, D. J. Hill and G. Olsson, “Emergency Voltage Control Using Search and Predictive Control”, Electric Power and Energy Systems, vol. 24, pp. 121-130, 2002
- [6] Ajjarapu, V., Christy, C., “The Continuation Power Flow: a Tool for Steady State Voltage Stability Analysis”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 7, No. 1, February 1992, pp. 416-423.
- [7] 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, February 1993, pp. 1-8
- [8] R. Seydel, “From Equilibrium to Chaos-Practical Bifurcation and Stability Analysis,” Elsevier Science, North-Holland, 1988.
- [9] Relatório SCEL/GTPM-07/96 - “*Estudo de Controle de Tensão para as Áreas Rio de Janeiro/Espírito Santo e São Paulo (3ª Etapa)*”, outubro/1996.