



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GAT 30
14 a 17 de Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA – GAT

OBTENÇÃO DA MARGEM MÍNIMA DE SEGURANÇA DE ESTABILIDADE DE TENSÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Duvier Bedoya Bedoya * Carlos A. Castro * Manfred Bedriñana*

Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP

RESUMO

Este trabalho apresenta uma nova metodologia que permite calcular a margem mínima de segurança em relação à estabilidade de tensão de sistemas elétricos de potência. Em termos práticos, a margem mínima é considerada nos piores casos de variação da carga ou nos piores cenários de incremento de carga.

É apresentada uma metodologia eficiente e de fácil implementação do ponto de vista computacional para aplicações de controle e monitoramento on-line.

A obtenção da margem mínima é indispensável no planejamento e operação de sistemas elétricos de potência. Normalmente, a margem de estabilidade de tensão é calculada considerando o incremento de carga em uma direção pré-estabelecida, com fator de potência constante. Este incremento de carga é seguido por um aumento proporcional na geração até que o sistema atinja o ponto de máximo carregamento onde, sobre determinadas condições, ocorre o colapso de tensão. Porém, variações de carga não programadas ou incrementos de carga imprevistos em uma área ou região podem levar o sistema a operar com margens menores que a normalmente estimada.

O ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro) estabelece que o sistema elétrico deve operar com uma margem de segurança de estabilidade de tensão de pelo menos 6%. A informação obtida com este trabalho pode ser utilizada como ferramenta para a tomada de medidas de controle preventivo e corretivo para que o sistema esteja sempre operando de forma segura, seja qual for o comportamento da carga.

A idéia geral deste projeto baseia-se no uso de técnicas de otimização para obter pontos de máximo carregamento e as correspondentes margens até que a margem mínima seja obtida. O procedimento consiste em **(a)** calcular o ponto de operação atual da rede, **(b)** definir uma direção de incremento de carga para fator de potência constante ou fator de potência variável, **(c)** calcular o ponto de máximo carregamento, **(d)** calcular a margem de segurança correspondente, **(e)** com base no autovetor esquerdo correspondente ao autovalor nulo da matriz Jacobiana no ponto de máximo carregamento, calcular novas direções de incremento de carga, novos pontos de máximo carregamento e as correspondentes margens até que a margem mínima seja encontrada.

São apresentadas simulações para redes do IEEE e para parte do sistema brasileiro interconectado, com o objetivo de avaliar o desempenho do método.

PALAVRAS-CHAVE

Segurança em sistemas de potência, Programação não linear, Ponto de Máximo Carregamento (PMC), Estabilidade de Tensão

1.0 - INTRODUÇÃO

Os sistemas de potência têm aumentado de tamanho e de capacidade devido ao contínuo incremento da demanda, tornando-se cada vez mais difícil de ser operado dentro dos níveis de qualidade requeridos. Para muitas redes a principal ameaça refere-se à instabilidade de tensão. Esta é pelo menos tão importante quanto os problemas de limites térmicos das linhas por sobrecargas ou problemas por instabilidade de ângulo. Deve-se acrescentar que a construção de novas linhas de transmissão é muito difícil e em alguns casos impossível.

A estabilidade de tensão refere-se à habilidade do sistema de potência de manter níveis de tensão aceitáveis para condições normais de operação [1] [2]. A instabilidade de tensão apresenta-se como uma queda progressiva nas tensões de algumas barras. O colapso de tensão ocorre quando o sistema não consegue atender a demanda e é caracterizado pela perda de controle das tensões no sistema de potência [3]. Os sistemas de potência têm-se tornado complexos e altamente carregados. Por outro lado, fatores econômicos, políticos, ambientais, grandes interconexões têm levado os sistemas a operar próximos dos seus limites. Uma das tarefas das pessoas a cargo da operação e planejamento dos sistemas de potência é monitorar e detectar quando as tensões de todas as barras permanecem dentro de valores permitidos sob condições de carga pesada e na presença de distúrbios [4].

A margem de segurança de estabilidade de tensão (MSET) deve ser monitorada continuamente para atender os requisitos das agências que monitoram o sistema [5]. No caso de operação no estado de emergência, medidas de controle devem ser tomadas para retornar a operação do sistema ao modo seguro, e as agências têm tido a necessidade de criar procedimentos para mantê-lo. Dentre estes procedimentos está o adotado pelo Operador Nacional do Sistema Brasileiro (ONS). O ONS estabelece que deve ser mantida uma MSET de 6% na presença de uma contingência simples ($n - 1$). Para condições normais de operação a MSET deve ser um pouco maior que 6% dependendo da demanda [5].

A MSET corresponde à distância medida (em porcentagem, p.u., ou MVA) desde o ponto de operação atual (caso base) até um ponto de operação onde o sistema perde estabilidade. Este ponto é conhecido como ponto de colapso de tensão ou ponto de máximo carregamento (PMC) [4], [6], [7]. O colapso de tensão é um processo onde uma seqüência de eventos seguida de instabilidade de tensão conduz ao blecaute ou baixas tensões em uma importante parte do sistema [2]. Usualmente, a margem mínima é calculada para uma direção de incremento de carga que corresponde a aumentar todas as cargas com fator de potência constante e os MW gerados, usando um fator de carregamento λ que multiplica os valores correspondentes ao caso base. Entretanto, podem existir incrementos de carga não esperados em alguma barra ou área contribuindo a uma MSET ainda menor. Uma MSET menor pode levar o sistema a operar em estado de emergência e conseqüentemente em um maior nível de risco com relação à estabilidade de tensão.

Este trabalho apresenta uma nova metodologia para calcular a margem mínima de estabilidade de tensão (MMSET) e a respectiva direção de incremento de carga onde esta ocorre. Inicialmente, o PMC é calculado para uma direção de incremento de carga pré-definida. Esta direção inicial pode ser tanto para fator de potência constante (seguindo os requisitos das agências de monitoramento) quanto para fator de potência variável. Posteriormente, obtêm-se novas direções de incremento de carga até que a MMSET e o correspondente PMC sejam encontrados.

2.0 - FLUXO DE CARGA

2.1 Modelo de fluxo de carga

O programa de fluxo de carga é uma ferramenta amplamente usada no planejamento e operação dos sistemas de potência. O objetivo do fluxo de carga é determinar o estado da rede (tensões, fluxos de potência, etc.) correspondente a um ponto de operação para certos parâmetros de carga e certa topologia. O Método de Newton é um método robusto para resolver o problema de fluxo de carga, entretanto, apresenta algumas limitações. O processo iterativo convencional pode não fornecer uma solução embora o sistema opere de fato. Isto pode ocorrer caso o problema seja mal condicionado numericamente.

Além disso, o programa de fluxo de carga não fornece uma solução para problemas infactíveis (um problema é infactível quando a geração não consegue atender a demanda). Esta situação pode ocorrer em casos de contingências ou incrementos de carga imprevistos, levando o sistema à instabilidade de tensão e ao colapso de tensão. Nesta situação o processo não converge ou simplesmente diverge, e o resultado do fluxo de carga não tem significado físico [4], [10], [11].

O ponto de operação de um sistema de potência é obtido a partir das variáveis estáticas (magnitudes e ângulos da tensão) e um fator de carregamento λ . O objetivo de λ é aumentar a carga (multiplicando os valores de carga e geração do caso base) até que o PMC, onde ocorre o colapso de tensão, seja obtido. As equações de fluxo de carga modificadas podem ser escritas como:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}, \lambda) = 0, \quad (1)$$

ou, em forma explícita:

$$\begin{cases} \Delta P_i = (1 + \lambda \alpha_i^p P_i^{\text{sch}}) - P_i^c = 0 & i = \{\text{barras PQ, PV}\} \\ \Delta Q_i = (1 + \lambda \beta_i^q Q_i^{\text{sch}}) - Q_i^c = 0 & i = \{\text{barras PQ}\} \end{cases} \quad (2)$$

onde $(\Delta P_i, \Delta Q_i)$ correspondem aos erros de potência ativa e reativa respectivamente, $(P_i^{\text{sch}}, Q_i^{\text{sch}})$ correspondem às potências especificadas no caso base, (P_i^c, Q_i^c) correspondem às potências calculadas em cada iteração e (α_i^p, β_i^q) indica a direção de incremento de carga.

O carregamento λ pode variar desde $\lambda = 0$, para o caso base, até $\lambda = \lambda_*$, correspondendo à carga crítica onde encontra-se o PMC. Os escalares α_i e β_i podem ser ajustados para determinar qualquer direção de incremento de carga. Por exemplo, $\alpha_i = \beta_i = 1$ indica que o carregamento é aumentado com fator de potência constante. $\alpha_i = 1$ e $\beta_i = 0$ indica que o carregamento é aumentado tendo em conta apenas as contribuições das potências ativas, enquanto as contribuições de potência reativa são mantidas constantes no valor do caso base.

A carga (potência ativa e reativa) é aumentada do mesmo modo que a geração (potência ativa). Os limites de potência reativa dos geradores são levados em conta. No caso de violações nos limites de potência reativa nas barras PV, estas são convertidas para barras do tipo PQ (de carga) [4].

2.2 Fluxo de carga com otimização de passo

O método de fluxo de carga com otimização de passo fornece uma solução para redes mal condicionadas e informação importante na ocorrência de uma situação infactível. Esta informação está baseada nos erros das potências sendo essencial para determinar a distância em parâmetros de carga até o ponto de colapso de tensão. O fluxo de carga com otimização de passo pode ser expresso como:

$$x^{n+1} = x^n + \mu J^{-1} \Delta S^n \quad (3)$$

onde, x é um vetor que corresponde às magnitudes e ângulos das tensões, J corresponde à matriz Jacobiana, μ corresponde a um fator multiplicador ótimo para minimizar uma função dos erros das potências e ΔS corresponde aos erros das potências ativa e reativa [12]. Para sistemas bem condicionados, μ assume valores próximos de um, resultando em um desempenho similar ao método de Newton convencional. No caso de sistemas mal condicionados, μ assume valores adequados a fim de evitar a divergência e acelerar o processo de convergência. Para casos infactíveis, μ assume valores próximos de zero, levando a um estado de operação na fronteira de factibilidade. Neste caso, os erros das potências fornecem a distância do ponto de operação infactível até o ponto na fronteira [10].

2.3 Margem de segurança de estabilidade de tensão

A MSET pode ser definida como a diferença entre as potências no PMC e no caso base. Neste caso, a margem é definida em função do PMC (λ_*), em função das potências especificadas no caso base e em função da direção de incremento de carga visto que diferentes direções de incremento de carga são usadas neste trabalho. Segundo o modelo de carga adotado, a MSET pode ser expressa como:

$$\text{MSET} = \lambda_* \left\| \dots \alpha_i P_i^{\text{sch}} \dots \beta_j Q_j^{\text{sch}} \dots \right\|_2 \quad (4)$$

MSET pode ser interpretada como a quantidade total em MVA a ser incrementada em determinada direção de incremento de carga até que o PMC é obtido. A MSET também pode ser calculada em MW, MVA, p.u. ou percentagem.

3.0 - CÁLCULO DO PONTO DE MÁXMO CARREGAMENTO

O ponto de máximo carregamento (PMC) é calculado usando-se dois procedimentos. O primeiro, denominado como incremento de carga, consiste em determinar incrementos de carga do sistema até encontrar o PMC [4]. O segundo, corresponde a encontrar cortes de carga no caso em que um excessivo incremento de carga leve o sistema a um ponto de operação infactível. A Figura (1) mostra o procedimento de incremento de carga onde o carregamento é incrementado desde o ponto de operação 1 (caso base), até o ponto de operação 4 que corresponde ao PMC. Entretanto, podem ocorrer situações em que excessivos incrementos de carga conduzem o sistema a um ponto de operação infactível, conforme mostra a Figura (2). Neste caso, cortes de carga sucessivos devem ser definidos para levar o sistema de volta para o PMC (fronteira de factibilidade), do ponto de operação 5 para o ponto de operação 6. A operação do sistema na região infactível não é possível na prática por que o colapso de tensão ocorre no PMC.

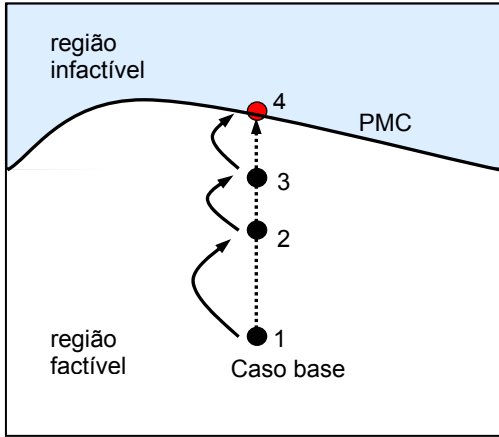


Figura 1: Procedimento de incremento de carga

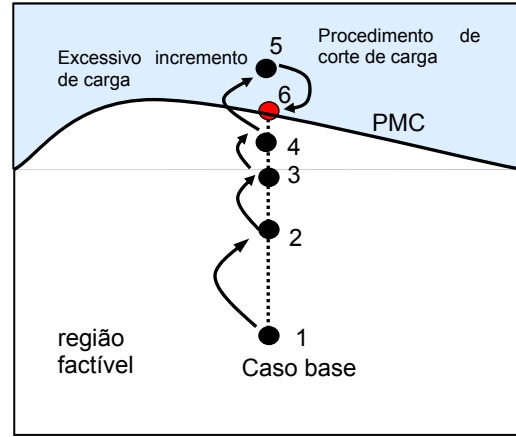


Figura 2: Procedimento de corte de carga

Lembrando que o modelo de rede adotado é dado por (2), o incremento de carga é dado por:

$$\lambda^{n+1} = \lambda - \Delta\lambda = \lambda - \sigma \frac{f(x, \lambda)}{g_\lambda^T (g_x^T)^{-1} f_x} \quad (5)$$

onde $\Delta\lambda$ corresponde ao incremento de carga, $f(x, \lambda)$ corresponde à função objetivo, e é dada pela sensibilidade da potência ativa com relação à tensão da barra de referência ($-\partial P_k / \partial V_k$), onde k é a barra de referência, g_x corresponde à matriz Jacobiana, f_x corresponde à derivada da função objetivo com relação as variáveis estáticas, e g_λ corresponde ao vetor tangente. σ é um escalar positivo dado por:

$$\sigma = \frac{t}{\|S_{x\lambda}\|_2} \quad (6)$$

onde t é um parâmetro que depende das características de cada sistema e $\|S_{x\lambda}\|_2$ é a norma Euclidiana do vetor tangente que aumenta de valor conforme o procedimento aproxima-se do PMC, resultando em tamanhos de passo menores [9], [12].

O corte de carga é dado por:

$$\Delta\lambda = \lambda^{n+1} - \lambda^n = -\frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta P_i^2 + \Delta Q_i^2)}{\sum_{i=1}^n (P_i^{\text{sch}} \Delta P_i + Q_i^{\text{sch}} \Delta Q)} \quad (7)$$

A expressão anterior é obtida com os erros das potências e as potências especificadas. É importante notar que esta expressão é calculada usando as potências ativas e reativas para as barras PQ enquanto apenas as potências ativas são requeridas no caso das barras PV. Em alguns casos, é conveniente usar a expressão (8), correspondente a um corte de carga simplificado, com o objetivo de acelerar o processo de corte de carga [4].

$$\Delta\lambda = \lambda^{n+1} - \lambda^n = \left[\sum_{i=1}^n (\Delta P_i^2 + \Delta Q_i^2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

A equação anterior pode ser obtida facilmente usando os erros das potências ativa e reativa para as barras PQ e as quantidades ativas no caso das barras PV [4].

4.0 - METODOLOGIA PROPOSTA: UM NOVO MÉTODO PARA ENCONTRAR A MMSET

O novo método proposto é baseado nos trabalhos apresentados em [4], [6] e [7]. O método é rápido, preciso e eficiente do ponto de vista computacional, sendo apropriado para aplicações on-line como o monitoramento e controle de sistemas de potência. Duas versões serão apresentadas sendo a última mais rápida e eficiente.

4.1 Um novo método para encontrar a margem mínima

A Figura (3) mostra a idéia geral da metodologia para obter a MMSET. Diferentes pontos de operação são mostrados. O ponto de operação 1 corresponde ao caso base, a partir do qual é definida uma direção de incremento de carga (pode ser para fator de potência constante ou fator de potência variável). Aplicando o procedimento descrito na seção (3), é calculado o ponto de operação 2, que corresponde ao PMC (λ_*). Neste ponto de operação obtém-se o autovetor esquerdo (ω_1) da matriz Jacobiana (J) e calcula-se a margem de segurança através de:

$$MSET_2 = \lambda_{*2} \left\| \dots \alpha_i P_i^{sch} \dots \beta_i Q_i^{sch} \dots \right\|_2 \quad (9)$$

onde, $MSET_2$ é a margem de segurança calculada no ponto de operação 2 correspondente à direção inicial de incremento de carga, P_i^{sch} e Q_i^{sch} correspondem aos valores de potências especificados no caso base. O ponto de operação 3 é então calculado por:

$$\lambda_{*3} = \gamma \frac{MSET_2}{\left\| \dots \alpha_i P_i^{sch} \dots \beta_i Q_i^{sch} \dots \right\|_2} \quad (10)$$

onde γ é um escalar que, usualmente, é igual a um, entretanto, em alguns casos pode ser ajustado para obter um procedimento mais eficiente. Os valores de α_i e β_i no denominador de (10) definem a próxima direção de incremento de carga e são dados pelo autovetor esquerdo (ω_1) da matriz Jacobiana (J) avaliada no ponto de operação 2 divididos pelas respectivas potências nodais. No ponto de operação 3, que é um ponto de operação infactível, aplica-se o procedimento de corte de carga exposto na seção (3) com o objetivo de voltar para o ponto de máximo carregamento na nova direção de incremento de carga (4). Este procedimento é aplicado sucessivamente até que os autovetores esquerdos sejam paralelos. Na prática, executa-se o procedimento até que um critério de convergência seja atendido, avaliando-se os dois últimos autovetores calculados (ω_2 e ω_3). Finalmente, aplica-se um último procedimento de corte de carga para encontrar o ponto de operação 6, que é um PMC. Este último ponto de operação corresponde à MMSET e o autovetor ω_3 corresponde à pior direção de incremento de carga.

4.2 Um novo método para encontrar a margem mínima melhorado

O novo procedimento é o mesmo da seção (4.1) desde o ponto de operação 1 (caso base) até a obtenção do ponto de operação 3, conforme a Figura (4). Como mencionado anteriormente, este ponto de operação é infactível, e o método de fluxo de carga convencional não consegue convergência. Entretanto, o método de fluxo de carga com otimização de passo fornece informação importante. O multiplicador μ tende a zero e o estado das variáveis estáticas corresponde ao ponto de operação 3' na fronteira de factibilidade. Os erros das potências finais podem ser usados para obter a distância do ponto de operação 3 até o PMC 3'. Avalia-se o autovetor esquerdo no ponto de operação 3, que é função dos valores obtidos no ponto de operação 3', e calcula-se o ponto de operação 4 com a expressão (10). O processo segue até que os autovetores ω_2 e ω_3 sejam paralelos. Desta forma, o procedimento de corte de carga é aplicado apenas uma vez para obter o ponto de operação 5, que corresponde ao ponto de operação na MMSET. Como será mostrado na seção de resultados, esta metodologia reduz o esforço computacional devido ao menor número de iterações requeridas, visto que o procedimento de corte de carga é efetuado somente na última direção de incremento de carga.

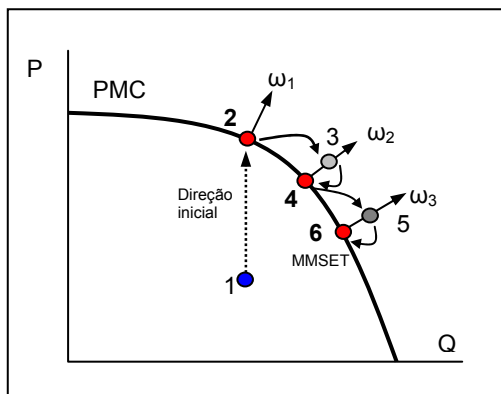


Figura 3: Um novo método para encontrar a MMSET

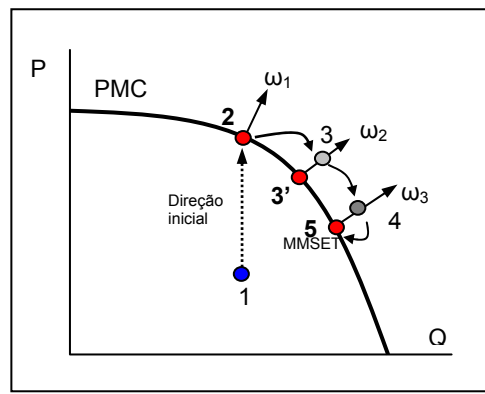


Figura 4: Um novo método para encontrar a MMSET melhorado

5.0 - RESULTADOS

Serão apresentados resultados de simulações para os sistemas IEEE 14, 30, 57 e 300 barras, e para o sistema de 1081 barras 1654 ramos correspondente a uma parte do sistema interligado Brasileiro.

5.1 Cálculo do PMC e a correspondente MSET

Nesta seção são apresentados os resultados da obtenção do ponto de máximo carregamento PMC para as diferentes redes e a correspondente MSET. A direção de incremento de carga escolhida é com fator de potência constante ($\alpha_i = \beta_i = 1$). É importante ressaltar que esta direção de incremento de carga corresponde àquele incremento de carga que usualmente é monitorado pelas agências de operação e planejamento do sistema. As Figuras (5)-(8) mostram o PMC para as redes de 14, 30, 300 e 1081 barras, respectivamente.

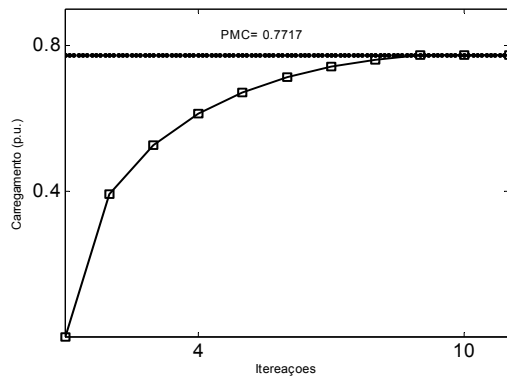


Figura 5: Sistema de 14 barras – PMC

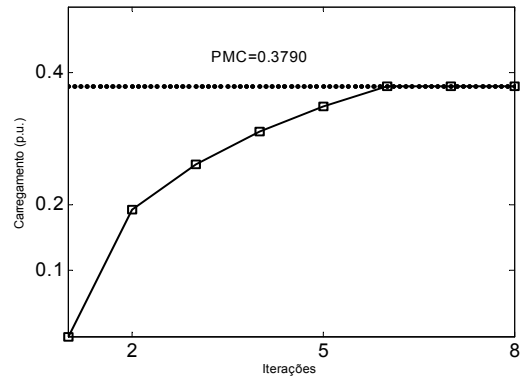


Figura 6: Sistema de 30 barras - PMC

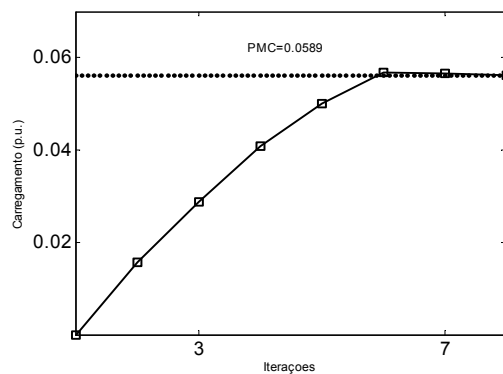


Figura 7: Sistema de 300 barras – PMC

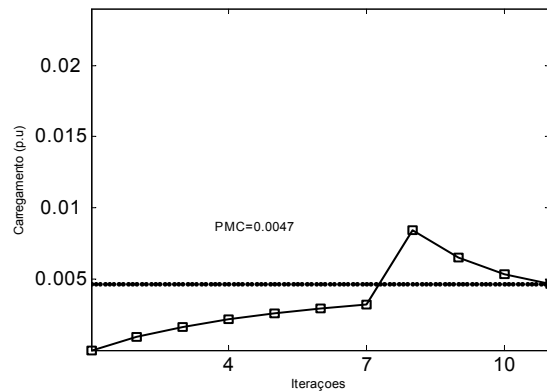


Figura 8: Sistema de 1081 barras - PMC

Os sistemas de 300 e 1081 barras estão altamente carregados, mostrando carregamentos máximos de 5,89% e 0,47%, respectivamente. Na Figura (8), é possível identificar os procedimentos de incremento e corte de carga. Para os procedimentos descritos na seção (4.0), é possível escolher a direção inicial de incremento de carga tanto para fator de potência constante (Figuras (5)-(8)), quanto para fator de potência variável. Para um incremento de carga com fator de potência variável, pode-se escolher a direção de incremento de carga avaliando o autovetor esquerdo da matriz Jacobiana no caso base [6], [7]. Como esta direção está mais próxima da pior direção de incremento de carga (próximo da direção da margem mínima), o procedimento requer um menor número de iterações, resultando em uma abordagem mais eficiente para o problema. Os métodos foram testados para ambas direções de incremento de carga, entretanto, devido a limitações de espaço, apenas serão apresentados os procedimentos para fator de potência variável.

5.2 Obtenção da margem mínima

Os resultados para os métodos propostos nas seções (4.1) e (4.2) são mostrados nas Tabelas (1) e (2). A MSET é calculada eficientemente em ambos casos, mas o método melhorado (Tabela (2)) apresenta um menor esforço computacional devido ao menor número de iterações requerido. O corte de carga é necessário apenas no último passo iterativo, que corresponde à direção da margem mínima. A MSET é avaliada até que a diferença entre duas

margens consecutivas seja menor que uma tolerância definida em 0,005. O PMC e a MSET podem ser calculados com maior eficiência requerendo um maior número de iterações, porém, a tolerância escolhida mostrou resultados apropriados para aplicações práticas.

As Tabelas (1) e (2) mostram o procedimento para obter o PMC, a correspondente MSET e a MMSET. O Passo 1 corresponde à direção inicial de incremento de carga. Na maioria dos casos três passos iterativos foram requeridos para obter a MMSET, exceto para a rede de 1081 barras onde apenas dois passos iterativos foram necessários. O parâmetro t e o procedimento de incremento de carga são usados só na direção inicial de incremento de carga (Passo 1). Nos passos seguintes, o PMC e a MSET são obtidos usando o procedimento de corte de carga (Tabela 1). Diferentes valores de γ são usados reduzindo o esforço computacional, resultando em um menor número de iterações no procedimento de corte de carga. É importante ressaltar que a variável γ apresenta uma estreita faixa para todos os sistemas testados. A MSET, o PMC, o parâmetro t e o número de iterações (para incremento de carga, para corte de carga e totais) são também apresentados. Como era esperado, os dois métodos levam ao mesmo resultado, entretanto, o método melhorado requer um menor número de iterações para a maioria das redes.

Nas tabelas, tanto a MSET quanto a MMSET estão dadas em p.u. Tomando como exemplo a rede de 14 barras, a MMSET pode ser incrementada em aproximadamente 35,6 MVA antes que o sistema atinja os limites.

| Sistema | Item | Passo 1 | Passo 2 | Passo 3 | Total Iterações |
|-------------------------------|-------------------------|---------|----------------|----------------|-----------------|
| 14 barras $\gamma = 0.9$ | t | 0.015 | -- | -- | 16 |
| | It. Incremento de carga | 7 | -- | -- | |
| | It. Corte de carga | 3 | 3 | 3 | |
| | PMC | 5.8927 | 9.907 | 11.1013 | |
| | MSET | 0.4123 | 0.3579 | 0.3563* | |
| 30 barras $\gamma = 0.9$ | t | 0.01 | -- | -- | 20 |
| | It. Incremento de carga | 3 | -- | -- | |
| | It. Corte de carga | 4 | 11 | 2 | |
| | PMC | 4.3088 | 7.4340 | 8.008 | |
| | MSET | 0.1731 | 0.1507 | 0.1506* | |
| 57 barras $\gamma = 0.9$ | t | 0.03 | -- | -- | 16 |
| | It. Incremento de carga | 5 | -- | -- | |
| | It. Corte de carga | 2 | 7 | 2 | |
| | PMC | 4.1137 | 4.9486 | 5.1616 | |
| | MSET | 0.1118 | 0.0850 | 0.0842* | |
| 300 barras $\gamma = 0.9$ | t | 0.02 | -- | -- | 25 |
| | It. Incremento de carga | 3 | -- | -- | |
| | It. Corte de carga | 2 | 10 | 10 | |
| | PMC | 4.9650 | 7.4070 | 7.0509 | |
| | MSET | 0.0792 | 0.04727 | 0.0381* | |
| 1081 barras $\gamma = 1.0$ | t | 0.0001 | -- | -- | 11 |
| | It. Incremento de carga | 7 | -- | -- | |
| | It. Corte de carga | 2 | 2 | -- | |
| | PMC | 8.4001 | 2.02051 | -- | |
| | MSET | 0.1901 | 0.1857* | -- | |

* corresponde à margem mínima

Tabela 1: Um novo método para obter a MMSET.

| Sistema | Item | Passo 1 | Passo 2 | Passo 3 | Total Iterações |
|-------------------------------|-------------------------|---------|----------------|----------------|-----------------|
| 14 barras $\gamma = 0.9$ | t | 0.015 | -- | -- | 13 |
| | It. Incremento de carga | 7 | -- | -- | |
| | It. Corte de carga | 3 | -- | 3 | |
| | PMC | 5.8927 | 9.9820 | 11.074 | |
| | MSET | 0.4123 | 0.3674 | 0.3524* | |
| 30 barras $\gamma = 0.9$ | t | 0.01 | -- | -- | 14 |
| | It. Incremento de carga | 3 | -- | -- | |
| | It. Corte de carga | 4 | -- | 7 | |
| | PMC | 4.3088 | 7.5608 | 8.0895 | |
| | MSET | 0.1731 | 0.1538 | 0.1519* | |
| 57 barras $\gamma = 0.9$ | t | 0.03 | -- | -- | 14 |
| | It. Incremento de carga | 5 | -- | -- | |
| | It. Corte de carga | 2 | -- | 7 | |
| | PMC | 4.1137 | 5.7055 | 5.1521 | |
| | MSET | 0.1118 | 0.0989 | 0.0843* | |
| 300 barras $\gamma = 0.9$ | t | 0.02 | -- | -- | 17 |
| | It. Incremento de carga | 3 | -- | -- | |
| | It. Corte de carga | 2 | -- | 12 | |
| | PMC | 4.9650 | 9.4890 | 7.7691 | |
| | MSET | 0.0792 | 0.04727 | 0.0379* | |
| 1081 barras $\gamma = 1.0$ | t | 0.0001 | -- | -- | 11 |
| | It. Incremento de carga | 7 | -- | -- | |
| | It. Corte de carga | 2 | 2 | -- | |
| | PMC | 8.4001 | 2.02051 | -- | |
| | MSET | 0.1901 | 0.1857* | -- | |

Tabela 2: Um novo método para obter a MMSET – melhorado

6.0 - CONCLUSÃO

O principal objetivo deste trabalho foi propor uma nova e rápida metodologia para obter a margem mínima de segurança de estabilidade de tensão de sistemas elétricos de potência. O método proposto resultou em uma rápida, precisa e eficiente ferramenta para a análise de estabilidade de tensão. Este método pode ser usado em aplicações on-line, tais como, o monitoramento e controle de sistemas de potência.

7.0 - BIBLIOGRAFIA

- [1] P. Kundur, Power system stability and control, McGraw-Hill, 1994.
- [2] IEEE/CIGRE, Definition and classification of power system stability, Joint task force on stability terms and definitions, Transactions on Power Systems, vol. 19 no.2, 2004.
- [3] T. Van Cutsem, C. Moisse, R. Maillhot, Determination of secure operating limits with respect to voltage collapse, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 14, no. 1, 1999.
- [4] L. A. L. Zarate, C. A. Castro, J. L. M. Ramos, E. R. Ramos, Fast computation of voltage stability security margins using nonlinear programming techniques, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 21, no. 1, 2006.
- [5] Operador Nacional do Sistema Brasileiro (ONS), Procedimentos de rede: sugestões e critérios para estudos elétricos, Submódulo 23.3, Disponível em: <http://www.ons.org.br/ons/procedimentos/index.html>, Relatório técnico.
- [6] I. Dobson, L. Lu., New methods for computing a closest saddle node bifurcation and worst case load power margin for voltage collapse, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 8, no. 3, 1993.
- [7] F. Alvarado, I. Dobson, Y. Hu, Computation of closest bifurcations in power systems, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, no. 2, 1994.
- [8] C. Cañizares, A. C. Z. Souza, V. Quintana, Comparison of performance indices for detection of proximity to voltage collapse, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 11, no. 3, 1996.
- [9] V. Ajjarapu, C. Christy, The Continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 7, no. 1, 1992.
- [10] T. J. Overbye, A power flow measure for unsolvable cases, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, no. 3, 1994.
- [11] L. M. C. Braz, C. A. Castro, C. A. F. Murari, A critical evaluation of step size optimization based load flow methods, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 15, no. 1, 2000.
- [12] Y. Mansour (Ed.), Suggested techniques for voltage stability analysis, IEEE, 93TH0620-5PWR, 1993.
- [13] Arquivo com sistemas de potência modelos IEEE, Disponível em: <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>.
- [14] D. Bedoya, C. A. Castro. Computation of Power Systems Minimum Voltage Stability Security Margins, *IEEE/PES 2006 PowerCon, International Conference on Power Systems Technology*, Chongqing, China, 22-26 October 2006.

8.0 - AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido com o apoio de CNPq: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico; e FAPESP: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.

9.0 - AUTORES

DUVIER B. BEDOYA é Engenheiro Eletricista (P.E.) pela Universidade Nacional de Colômbia (UNAL), sede Manizales (2004). Recebeu o prêmio de tese meritória (2004) e de formatura com honras (2005). Participou do concurso de melhores teses de graduação pela UNAL. Atualmente é estudante de Mestrado na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). As principais áreas de interesse são estabilidade de tensão, alta tensão, energias alternativas e geração distribuída.

CARLOS A. CASTRO é Engenheiro Eletricista e Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) (1982 e 1985). É Doutor pela Arizona State University, Tempe, AZ (1993). Atualmente é professor associado da UNICAMP.

MANFRED F. BEDRIÑANA é Engenheiro Eletricista (P.E.) formado com honras pela Universidade Nacional de Engenharia Peru (UNI) e Mestre pela Universidade Federal de Maranhão (UFMA), Brasil. Atualmente é estudante de Doutorado em Engenharia Elétrica na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). As áreas de interesse são mercados e segurança dos sistemas elétricos de potência.