



**XXI SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO - 004

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISES E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT

MÉTODO RÁPIDO PARA A SELEÇÃO DE CONTROLES PREVENTIVOS PARA ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TENSÃO

**Moussa Reda Mansour(*)
USP/EESC**

**Luís Fernando Costa Alberto
USP/EESC**

**Rodrigo Andrade Ramos
USP/EESC**

RESUMO

Nos últimos anos, a análise de estabilidade de tensão tornou-se crucial para garantir o fornecimento interrupto de energia em Sistemas Elétricos de Potência (SEP), especialmente quando se trata de sistemas de grande porte. Deste modo, o desenvolvimento de estratégias eficazes para o controle de tensão tem sido alvo de atenção em um considerável número de estudos em SEPs. Neste trabalho, uma nova metodologia é proposta para a seleção dos controles mais eficazes para prevenir a instabilidade de tensão em um SEP. A metodologia proposta é rápida e é aplicável à operação em tempo real. A mesma baseia-se na análise de sensibilidade do ponto de máximo carregamento, que é obtido via o método Look-Ahead, em relação ao controles de tensão localizados no SEP. Para validar a metodologia proposta, foram realizados testes em dois SEPs: o sistema reduzido sul brasileiro e o sistema reduzido sul-sudeste brasileiro compostos por 33 barras e 65 barras, respectivamente.

PALAVRAS-CHAVE

Estabilidade de Tensão, Controle Preventivo, Análise de Sensibilidade, Look-Ahead, Seleção de Controles Preventivos

1.0 - INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o desenvolvimento de ferramentas de Análise da Estabilidade de Tensão (AET) para a manutenção da segurança dos Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) em tempo real, especialmente em sistemas de grande porte, tem sido justificada pela ocorrência relativamente frequente de blecautes (1), associados com o problema de Estabilidade de Tensão (ET). Tais ferramentas têm como principal objetivo a análise e a classificação de um grande número de contingências, as quais são classificadas de acordo com o seu grau de severidade, que é medido de acordo com a margem de ET. No caso da existência de contingências críticas, o sistema é considerado inseguro e cabe à ferramenta determinar ações de controles preventivo e/ou corretivo a serem implementadas com o objetivo de eliminar tal insegurança.

A maioria das técnicas utilizadas para a obtenção da margem de ET é baseada na curva PV e no método de Fluxo de Carga Continuado (FCC) (2). Entretanto, é sabido que o FCC requer um alto esforço computacional para determinar a margem de ET de um grande número de contingências, inviabilizando assim a sua aplicação na análise de segurança de SEPs de grande porte em tempo real.

Com o objetivo de resolver este problema, diversos métodos têm sido desenvolvidos com o intuito de tornar mais rápida a obtenção da margem de ET de SEPs de grande porte. Como exemplo tem-se os algoritmos de controle do passo do FCC (3,4) e os índices quem foram desenvolvidos para evitar o cálculo de diversos fluxos de carga (5,6,7). Entretanto, uma técnica denominada Look-Ahead (6) - que explora o comportamento quadrático da curva

(*) Av. Trabalhador São Carlense, n° 400 – sala 3067 - Departamento de Engenharia Elétrica – CEP 13.566-590
São Carlos, SP, – Brasil

Tel: (+55 45) 3373-9366 – ramal: 219 – Email: mrmansour@ieee.org

PV na vizinhança do ponto máximo de carregamento - é uma solução interessante para estimar a margem de ET utilizando apenas duas soluções de fluxo de carga. Esta metodologia é baseada na forma normal das equações de fluxo de carga na vizinhança de um ponto de bifurcação do tipo sela-nó e, portanto, leva em consideração as características não lineares do problema. Destaca-se que esta metodologia tem sido utilizada para a análise de ET em empresas que operam SEPs de grande porte, tais como PJM (8) e CALifornialSO (CAISO) (9).

Diversos métodos foram desenvolvidos ao longo dos últimos anos para a seleção dos controles preventivo e/ou corretivos. Uma das abordagens utilizadas baseia-se em técnicas de otimização para projetar as ações de controle. Em tal abordagem a margem de estabilidade é definida como uma restrição no problema de otimização. Em (10), por exemplo, foi utilizado o método de pontos interiores para calcular o menor corte de carga necessário para restaurar a solvabilidade das equações do fluxo de carga. Em (11) o método de pontos interiores foi aplicado para selecionar os controles preventivos e corretivos. Entretanto, o problema das abordagens de otimização é que são considerados um grande número de variáveis de controle e, geralmente, muitos controles devem ser ativados para a obtenção do conjunto ótimo de ações de controle. Para evitar tal problema, técnicas para selecionar os controles mais efetivos tem sido estudadas e um pequeno número de variáveis de controle (relativas às ações de controle mais efetivas) é levado em consideração na fase de otimização.

Feng et al. (12), por exemplo, apresentaram uma metodologia que combina ações de controle preventivo e corretivo em SEP sobrecarregados. Para casos nos quais a margem de ET é pequena, a análise de sensibilidade da margem identifica as ações de controle mais efetivas e o problema de otimização é resolvido para especificar e coordenar as ações de controle. Para contingências severas, quando as equações de fluxo de carga não possuem solução, uma estratégia de parametrização do controle é aplicada para restaurar a factibilidade. Já em (13), um único FCC determina o ponto máximo de carregamento (o nariz da curva PV) para o caso base e a análise de sensibilidade da margem com os seus respectivos parâmetros é proposta. Esta sensibilidade pode ser utilizada para avaliar o impacto da ação de controle na margem de ET. Em (14) um novo mecanismo de controle é empregado para evitar o problema de instabilidade de tensão. Neste mecanismo, utiliza-se o FCC para determinar o ponto de máximo carregamento e a sensibilidade da margem de ET em relação aos controles. Em (15) aplica-se a análise modal (16) nas vizinhanças do nariz da curva PV para identificar a melhor localização para um dispositivo de compensação estática de reativos (*Static VAR Compensation (SVC)*) com o objetivo de aumentar a margem de estabilidade de tensão pós-contingência. Através da análise modal, calcula-se o menor autovalor da matriz Jacobiana reduzida e fatores de participação dos geradores, ramos e barras. Com isso, o modo crítico para a ET é definido a partir do autovalor de menor valor absoluto da matriz Jacobiana reduzida no nariz da curva PV e de seus autovetores associados. Em (17) uma nova metodologia para supervisionar e remodelar ações de controle preventivo é desenvolvida visando evitar o problema de instabilidade de tensão. Esta metodologia baseia-se em múltiplas soluções de fluxo de carga e análise de sensibilidade. O controle preventivo para acomodar o aumento de carga inicia-se quando um par de soluções próximas do fluxo de carga é detectado sob condições de carregamento muito pesado do SEP. Assim, formula-se um problema de otimização que é solucionado através de técnicas sequenciais de minimização não restritas.

Como exemplificado no parágrafo anterior, a maioria das técnicas para selecionar os melhores controles é baseada na análise de sensibilidade nas vizinhanças do ponto de máximo carregamento. Entretanto, acredita-se que o estudo das contingências que causam uma grande perturbação no sistema, quando feito através da análise de sensibilidade do ponto de máximo carregamento do caso base, não reflete o impacto de ações de controle quando estas contingências são levadas em consideração.

Dentro deste contexto, um método rápido para a seleção de controles preventivos no âmbito de análise de estabilidade de tensão em SEPs é proposto neste presente trabalho. Para tal, calcula-se a sensibilidade da margem de ET estimada pelo método Look-Ahead em relação à variação de algum parâmetro de controle de tensão. Após a obtenção da sensibilidade de cada elemento de controle, os mesmos são classificados em ordem decrescente de acordo com o seu grau de sensibilidade, e os controles mais eficazes são selecionados com o objetivo de melhorar a margem de ET.

A metodologia desenvolvida faz uso de apenas duas soluções de fluxo de carga do caso base e da análise de sensibilidade para classificar as ações de controles mais eficazes. Portanto, esta metodologia pode ser empregada na análise de estabilidade de tensão em tempo real.

2.0 - FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Nesta seção, será apresentada uma breve revisão do método Look-Ahead (6) e o desenvolvimento da proposta de análise de sensibilidade da margem de ET estimada pelo Look-Ahead em relação aos parâmetros de controle. O método Look-Ahead explora a propriedade quadrática da curva PV nas proximidades do ponto de máximo carregamento λ_{\max} . Para este ponto ser estimado são necessárias duas soluções de fluxo de carga. A análise de sensibilidade do ponto de máximo carregamento estimado em relação aos parâmetros de controle é explorada para classificar os controles mais efetivos.

2.1 Estimação do Ponto de Máximo Carregamento

Sejam x_1 e x_2 duas soluções de fluxo de carga, para dois diferentes níveis de carregamento denominados λ_1 e λ_2 , respectivamente. A estimação do ponto máximo de carregamento é realizada em relação à barra mais sensível do SEP (ver Equação (1)), isto é, a barra que possuir a maior variação relativa da tensão, denominada barra piloto.

$$\Delta V_i = \frac{(V_i|_{\lambda=\lambda_1} - V_i|_{\lambda=\lambda_2})}{V_i|_{\lambda=\lambda_1}} \quad (1)$$

Sendo, ΔV_i a variação relativa da tensão da i -ésima barra, $V_i|_{\lambda=\lambda_1}$ e $V_i|_{\lambda=\lambda_2}$ as tensões da i -ésima barra associadas com os pontos de operação x_1 e x_2 , respectivamente.

Neste método, a curva PV da barra piloto é utilizada para estimar a margem de carregamento do SEP. Esta estimação é obtida através do ajuste de uma curva quadrática, modelada pela Equação (2), a curva PV.

$$\lambda = \alpha + \beta V_p + \gamma V_p^2 \quad (2)$$

sendo, α , β e γ parâmetros a serem calculados e V_p a tensão na barra piloto. Conforme supracitado, o método Look-Ahead necessita de dois pontos de operação para estimar a margem de ET. Dados os níveis de carregamento λ_1 e λ_2 , onde $\lambda_1 < \lambda_2$, os seus respectivos pontos de operação são obtidos através da solução das equações de fluxo de potência, assim obtêm-se o seguinte sistema de equações:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \alpha + \beta V_{p,1} + \gamma V_{p,1}^2 \\ \lambda_2 &= \alpha + \beta V_{p,2} + \gamma V_{p,2}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

Como o Sistema (3) possui três incógnitas (α , β e γ) e apenas duas equações, faz-se necessária a obtenção de uma terceira equação, denominada equação auxiliar. Esta equação é obtida derivando-se a expressão do nível de carregamento λ_2 do Sistema (3) em relação ao parâmetro λ , obtendo assim um sistema de três equações e três incógnitas. Usando as três equações, os parâmetros α , β e γ são obtidos através do Sistema (4).

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & V_{p,1} & V_{p,1}^2 \\ 1 & V_{p,2} & V_{p,2}^2 \\ 0 & \dot{V}_2 & 2\dot{V}_2 V_{p,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (4)$$

Sendo, $\dot{V}_2 = \frac{dV_{p,2}}{d\lambda_2}$ um elemento do vetor tangente (18). Calculados os valores das incógnitas α , β e γ , a estimação do ponto máximo de carregamento λ_{\max} que o SEP pode fornecer antes da ocorrência de um colapso de tensão é obtida através da Equação (5).

$$\lambda_{\max} = \alpha - \frac{\beta^2}{4\gamma} \quad (5)$$

Mais detalhes sobre o método Look-Ahead podem ser obtidos através da referência (6).

2.2 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade proposta neste trabalho é utilizada para avaliar as alterações no ponto de máximo carregamento (λ_{\max}) causadas pela variação de algum parâmetro de controle de tensão u_c , onde u_c é a c -ésima variável de controle. A sensibilidade é calculada para todos os elementos de controle contidos no sistema. Deste modo, os controles são classificados de acordo com a sua sensibilidade e os controles mais efetivos são os selecionados para restaurar a margem de ET para um determinado conjunto de contingências críticas.

Seja $u_c \in [0, 1]$ o parâmetro do c -ésimo controle, onde $u_c = 0$ significa que o controle está no seu valor mínimo e para $u_c = 1$ o controle está no seu valor de controle máximo. A estimação da sensibilidade do ponto máximo de carregamento é dada pela derivada da Equação (5) em relação à variável u_c , isto é,

$$\frac{d\lambda_{\max}}{du_c} = \frac{d\alpha}{du_c} - \frac{\beta}{2\gamma} \frac{\partial \beta}{\partial u_c} + \frac{\beta^2}{4\gamma^2} \frac{\partial \gamma}{\partial u_c} \quad (6)$$

Portando, para determinar $d\lambda_{\max}/du_c$ faz-se necessário calcular inicialmente as sensibilidades de α , β e γ em relação à variável de controle u_c . Tais sensibilidades são obtidas calculando-se a inversa da função (4), obtendo-se assim:

$$\begin{aligned} \alpha &= f_{\alpha}(V_{p,1}, V_{p,2}, \dot{V}_2, \lambda_1, \lambda_2) \\ \beta &= f_{\beta}(V_{p,1}, V_{p,2}, \dot{V}_2, \lambda_1, \lambda_2) \\ \gamma &= f_{\gamma}(V_{p,1}, V_{p,2}, \dot{V}_2, \lambda_1, \lambda_2) \end{aligned} \quad (7)$$

Calculando-se as sensibilidades de (7) em relação à variável de controle u_c e fixando-se λ_1 e λ_2 , temos:

$$\begin{aligned} \frac{d\alpha}{du_c} &= \frac{\partial f_{\alpha}}{\partial V_{p,1}} \frac{\partial V_{p,1}}{\partial u_c} + \frac{\partial f_{\alpha}}{\partial V_{p,2}} \frac{\partial V_{p,2}}{\partial u_c} + \frac{\partial f_{\alpha}}{\partial \dot{V}_2} \frac{\partial \dot{V}_2}{\partial u_c} \\ \frac{d\beta}{du_c} &= \frac{\partial f_{\beta}}{\partial V_{p,1}} \frac{\partial V_{p,1}}{\partial u_c} + \frac{\partial f_{\beta}}{\partial V_{p,2}} \frac{\partial V_{p,2}}{\partial u_c} + \frac{\partial f_{\beta}}{\partial \dot{V}_2} \frac{\partial \dot{V}_2}{\partial u_c} \\ \frac{d\gamma}{du_c} &= \frac{\partial f_{\gamma}}{\partial V_{p,1}} \frac{\partial V_{p,1}}{\partial u_c} + \frac{\partial f_{\gamma}}{\partial V_{p,2}} \frac{\partial V_{p,2}}{\partial u_c} + \frac{\partial f_{\gamma}}{\partial \dot{V}_2} \frac{\partial \dot{V}_2}{\partial u_c} \end{aligned} \quad (8)$$

Sendo que $\partial V_{p,1}/\partial u_c$, $\partial V_{p,2}/\partial u_c$ e $\partial \dot{V}_2/\partial u_c$ são desconhecidas. Seja $F(x, \lambda, u_c)$ a equação de fluxo de carga com as cargas parametrizadas pelo λ , x um vetor de estados composto pelas magnitudes das tensões (V) e pelos ângulos das tensões (θ) e u_c a variável de um determinado controle. Através da resolução do sistema linear (9), o vetor $\partial x/\partial u_c$ pode ser facilmente obtido.

$$\frac{\partial F}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial F}{\partial u_c} \Delta u_c + \frac{\partial F}{\partial \lambda} \Delta \lambda = 0 \quad (9)$$

Considerando λ constante, têm-se

$$\frac{\partial F}{\partial x} \frac{\Delta x}{\Delta u_c} = - \frac{\partial F}{\partial u_c} \quad (10)$$

Sendo, $\partial F/\partial x$ a matriz Jacobiana e $\partial F/\partial u_c$ um vetor conhecido. Assim, basta resolver o sistema de equações (10), para λ_1 e λ_2 , obtendo-se assim uma aproximação de $\partial V_{p,1}/\partial u_c$ e $\partial V_{p,2}/\partial u_c$.

Com o objetivo de calcular o valor de $\partial \dot{V}_2/\partial u_c$, a variável de controle u_c é fixada na equação (9), obtendo-se assim:

$$\frac{\partial F}{\partial x} \frac{\Delta x}{\Delta \lambda} + \frac{\partial F}{\partial \lambda} = 0 \quad (11)$$

Finalmente, calculando-se a derivada da Equação (11) em relação à variável de controle u_c , obtêm-se:

$$\frac{\partial F}{\partial x} \frac{\Delta \dot{x}}{\Delta u_c} = - \frac{\partial^2 F}{\partial u_c \partial x} \frac{\Delta x}{\Delta \lambda} - \frac{\partial^2 F}{\partial u_c \partial \lambda} \quad (12)$$

O valor de $\partial \dot{x}/\partial u_c$ é obtido resolvendo o sistema de equações (12). Deste modo, é possível determinar as sensibilidades (8) e, conseqüentemente, a sensibilidade da margem de ET $d\lambda_{\max}/du_c$.

Este procedimento é repetido para cada variável de controle u_c . Tal procedimento é descrito no algoritmo abordado na Seção 3.

3.0 - ALGORITMO PROPOSTO

Nesta seção será descrito o algoritmo para o cálculo da sensibilidade e a seleção dos controles preventivos.

1. Definir c como o índice da variável de controle a ser analisada e iniciar em $c = 1$; N_c é o número de variáveis de controle contidas no sistema e S é conjunto de sensibilidades calculadas em relação a cada variável de controle, onde inicialmente $S = \{\}$;
2. Estimar o ponto máximo de carregamento λ_{\max} utilizando o método Look-Ahead;
3. Resolver o sistema (10) em λ_i para obter $\frac{\partial V_{p,i}}{\partial u_c}$, sendo $i = 1, 2$;
4. Resolver o sistema (12) para obter $\frac{\partial \dot{x}}{\partial u_c}$;
5. Calcular as sensibilidades utilizando o sistema (8);
6. Calcular a sensibilidade $\frac{d\lambda_{\max}}{du_c}$ utilizando a equação (6);
7. Inserir a sensibilidade $\frac{d\lambda_{\max}}{du_c}$ no conjunto S , fazendo $S = S \cup \left\{ \frac{d\lambda_{\max}}{du_c} \right\}$;
8. Incrementar c , fazendo $c = c + 1$;
9. Se c for menor ou igual ao número de variáveis de controle N_c , retornar para o passo 3, senão, continuar para o passo 10;
10. Classificar as sensibilidades contidas no conjunto S em ordem decrescente.

Finalmente, após a execução do algoritmo, uma lista é criada contendo as sensibilidades dos controles ordenadas em forma decrescente. Escolhidos os controles mais efetivos, um fluxo de potência ótimo ou o operador do SEP determinam quais são os valores dos controles para restaurar a margem de ET do SEP para um determinado conjunto de contingências.

4.0 - SIMULAÇÕES E RESULTADOS

O algoritmo proposto foi testado em dois SEPs (19). O primeiro é a versão reduzida do sistema sul brasileiro composto por 33 barras e o segundo é a versão reduzida do sistema sul-sudeste brasileiro composto por 65 barras. O principal objetivo foi o aumento da margem de ET utilizando os controles mais efetivos obtidos através da análise de sensibilidade proposta.

O algoritmo proposto foi implementado em um computador pessoal composto por um processador Intel Core i5 2.67GHz, 8Gb de memória RAM, sistema operacional GNU/Linux (versão Debian 5.10 AMD64) e compilador gcc (GNU C Compiler).

O algoritmo descrito na Seção 3 foi aplicado, para ambos os SEPs, para obter a classificação das ações de controles preventivos. A eficiência dos resultados obtidos foi confirmada implementando as ações de controle preventivas em dois níveis, isto é, a margem de ET foi avaliada utilizando uma ferramenta de FCC para cada ação de controle com a variável de controle u_c em 50% ($u_c = 0.5$) e 85% ($u_c = 0.85$). As simulações e os resultados de ambos os SEP serão apresentados nas próximas seções.

4.1 Sistema de 33 Barras

A versão reduzida do sistema sul brasileiro é composta por 33 barras e 39 linhas. Para o controle de tensão este sistema é composto por 7 reatores *shunt* e 3 capacitores *shunt*. Somente os capacitores *shunt* (Tabela 1) foram considerados disponíveis para o controle de tensão.

Tabela 1 – Capacitores disponíveis para o Controle de Tensão

Barra	Nome	VAR
1210	Gravataí	400
939	Blumenau	250
959	Curitiba	100

Na Tabela 2, as ações de controle (capacitores) estão classificadas de acordo as suas sensibilidades ($d\lambda_{\max}/du_c$) para o caso base. O ponto máximo de carregamento λ_{\max} deste sistema é de $\lambda_{\max} = 1,15692$ (15%) sem a aplicação do controle, isto é $u_c = 0$.

Tabela 2 – Aplicação do controles de tensão no sistema reduzido sul brasileiro de 33 barras.

Controle	Sensibilidade $d\lambda_{\max}/du_c$	λ_{\max}	
		$u_c = 0.5$	$u_c = 0.85$
1210	0,106531	1,17738	1,19207
939	0,090357	1,17125	1,18156
959	0,0362017	1,16231	1,1661

Como pode ser observado na Tabela 2, quando o controle de tensão é aplicado no sistema, isto é, quando u_c é modificado para um nível de 85%, percebe-se que o maior aumento da margem de ET foi obtido exatamente pelo capacitor que foi identificado, pelo método proposto, como a ação de controle de tensão mais eficaz para o aumento da margem de ET. Neste caso a margem de ET teve um aumento de 15% para 19%.

4.2 Sistema de 65 Barras

A versão reduzida do sistema sul-sudeste brasileiro é composta por 65 barras e 77 linhas. Para o controle de tensão este sistema é composto por 15 reatores *shunt* e 9 capacitores *shunt*. Somente os capacitores *shunt* (Tabela 3) foram considerados disponíveis para o controle de tensão.

Tabela 3 – Capacitores disponíveis para o Controle de Tensão

Barra	Nome	VAr
1210	Gravataí	400
939	Blumenau	250
959	Curitiba	100
104	Cachoeira Paulista	200
122	Ibiúma	200
1504	Itajubá	200
123	Campinas	200
120	Poços de Caldas	200
234	Samambaia	150

Na Tabela 4, as ações de controle (capacitores) estão classificadas de acordo as suas sensibilidades ($d\lambda_{\max}/du_c$) para o caso base. O ponto máximo de carregamento λ_{\max} deste sistema é de $\lambda_{\max} = 1,12562$ (12%) sem a aplicação do controle, isto é $u_c = 0$.

Tabela 4 – Aplicação do controles de tensão no sistema reduzido sul brasileiro de 65 barras.

Controle	Sensibilidade $d\lambda_{\max}/du_c$	λ_{\max}	
		$u_c = 0.5$	$u_c = 0.85$
1504	0,132006	1,12562	1,13309
104	0,0940002	1,12472	1,1322
120	0,0903251	1,12445	1,13207
123	0,0500967	1,12075	1,12623
1210	0,0262703	1,1187	1,12226
939	0,0260447	1,1182	1,1217
122	0,0236367	1,11742	1,12043
959	0,0106413	1,11518	1,1166
234	0,00234671	1,11358	1,11391

Os resultados apresentados na Tabela 4 seguem o mesmo padrão dos resultados apresentados na Tabela 2, isto é, a classificação da lista de ação dos controles de tensão, determinada pelo método proposto, é equivalente com a classificação dos controles quando o valor de cada controle u_c é alterado para 85%. Neste caso, a margem de ET teve um aumento de 12% para 13%, quando aplicado o controle mais efetivo da lista.

4.3 Discussão

Analisando as Tabelas 2 e 4 observa-se que o método proposto classificou corretamente os controles mais efetivos, isto é, a classificação obtida pelo método proposto foi a mesma daquela obtida utilizando um FCC. Embora a sensibilidade seja uma análise local, para pequenas alterações nas variáveis de controle, a classificação das ações dos controles de tensão em termos de eficiência não foi alterada com as grandes variações implementadas nos controles, onde estas variaram de 0% a 50% e 85%.

Deste modo, pode-se concluir que o método proposto é robusto, levando em consideração as características não lineares do problema para calcular a sensibilidade da curva PV estimada pelo método Look-Ahead, e identifica corretamente os controles mais efetivos para aumentar a margem de estabilidade de tensão. Tal método requer um baixo custo computacional e é adequado para aplicações em tempo real.

5.0 - CONCLUSÃO

Uma nova metodologia para seleção de controles preventivos, no contexto de estabilidade de tensão, foi proposta neste trabalho. Esta metodologia é rápida, robusta e adequada para aplicações em tempo real. Baseia-se na análise de sensibilidade da margem de estabilidade de tensão estimada pelo método Look-Ahead.

Para a validação da metodologia foram realizados testes em dois SEPs, sendo eles: o sistema reduzido sul brasileiro composto por 33 barras e o sistema sul-sudeste brasileiro composto por 65 barras. As ações de controle, em todas as simulações, foram corretamente classificadas em termos de eficiência para aumentar a margem de estabilidade de tensão. A implementação das ações de controle demonstraram que a classificação obtida pela análise de sensibilidade está correta, quando comparadas com o resultado obtido pelo FCC. Vale destacar que, embora as simulações tenham considerado apenas os elementos capacitores *shunt*, outros elementos de controle de tensão podem ser facilmente incorporados a metodologia proposta.

Em trabalhos futuros pretende-se desenvolver uma ferramenta para especificar e coordenar as melhores ações de controle para uma lista de contingências críticas. Uma possibilidade é a integração da metodologia proposta em um fluxo de potência ótimo para minimizar o custo dos controles selecionados restritos a uma margem de estabilidade de tensão mínima.

6.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao suporte financeiro providenciado pela FAPESP.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) U.S, CANADA. Blackout in the united states and Canada: causes and recommendations; Power System Outage Task Force.
- (2) AJJARAPU, V.; CHRISTY, C. The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis. In: Power Industry Computer Application Conference, 1991, p. 304-311.
- (3) CHIANG, H., D.; FLUECK, A.; SHAH, K.; BALU, N. CPFLOW: a practical tool for tracing power system steady-state stationary behavior due to load and generation variations. Power Systems, IEEE Transactions, v. 10, n. 2, p. 623-634, 1995.
- (4) MORI, H.; YAMADA, S. Continuation power flow with the nonlinear predictor of the lagrange's polynomial interpolation formula. In: Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific, v. 2, p. 1133-1138, 2002.
- (5) LOF, P., A.; SMED, T.; ANDERSSON, G.; HILL, D. Fast calculation of a voltage stability index. Power Systems, IEEE Transactions, v. 7, n. 1, p. 54-64, 1992.
- (6) CHIANG, H., D.; WANG, C., S.; FLUECK, A. Look-Ahead voltage and load margin contingency selection functions for large-scale power systems. Power Systems, IEEE Transactions, v. 12, n. 1, p. 173-180, 1997.

- (7) Power system security and voltage collapse: a line outage based indicator for prediction. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 21, n. 6, p. 445-461, 1999.
- (8) Li, H.; CHIANG, H., D.; TONG, J. An on-line tool for voltage stability assessment and control of large-scale power systems. In: *IREP Symposium*, p. 1-11, 2004.
- (9) VARGHESE, M.; SALEM-NATARAJAN, D.; GHOSH, S.; CHIANG, H., D.; LI, H. Conceptual design of real-time voltage stability analysis implementation at CAISO. 2008.
- (10) GRANVILLE, S.; MELLO, J., C., O.; MELLO, A., C., G. Application of interior point methods to power flow unsolvability. *Power Systems, IEEE Transactions*, v. 11, p. 1096-1103, 1996.
- (11) WANG, X.; EJEBE, G., C.; TONG, J.; G., W., J. Preventive/corrective control for voltage stability using direct interior point method. *PICA Proceedings*, p. 312-317, 1997.
- (12) FENG, Z.; AJJARAPU, V.; MARATUKULAM, D., J. A comprehensive approach for preventive and corrective control to mitigate voltage collapse. *Power Systems, IEEE Transactions*, v. 3, n. 15, p. 791-798, 2000.
- (13) GREENE, S.; DOBSON, I.; ALVARADO, F. Sensitivity of the loading margin to voltage collapse with respect to arbitrary parameters. *Power Systems, IEEE Transactions*, v. 12, n. 1, p. 262-272, 1997.
- (14) ZHAO, J.; CHIANG, H., D.; LI, H.; ZHANG, B. A novel preventive control approach for mitigating voltage collapse. In: *Power Engineering Society General Meeting*, 2006.
- (15) GAO, B.; MORISON, G., K.; KUNDUR, P. Toward the development of a systematic approach for voltage stability assessment for large-scale power systems. *Power Systems, IEEE Transactions*, v. 11, p. 1314-1324, 1996.
- (16) GAO, B.; MORISON, G., K.; KUNDUR, P. Voltage stability evaluation using modal analysis. *Power Systems, IEEE Transactions*, v. 7, p. 1529-1542, 1992.
- (17) KUMANO, T.; YOKOYAMA, A.; SEKINE, Y. Fast monitoring and optimal preventive control of voltage instability. *Electrical Power and Energy Systems*, v. 1, p. 117-125, 1994.
- (18) ZAMBRONI, A., C., S. Tangent vector applied to voltage collapse and loss sensitivity studies. *Electric Power Systems Research*, v. 47, n.1, p. 65-70, 1998.
- (19) ALVES, W., F. Proposition of test-systems to power system analysis, 2007, *Dissertação (Mestrado em Computação) – Universidade Federal Fluminense, Niteroi*, 2007.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Moussa Reda Mansour (Kuwait, 1983) obteve o título de bacharel em ciências da computação na Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) em 2007 e o título de mestre em engenharia elétrica na Universidade de São Paulo (USP) em 2009, na qual atualmente é doutorando desde 2009. É Membro do IEEE desde 2007. Em 2006 até 2007 fez estágio na operação em tempo real da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional, na qual desenvolveu sistemas computacionais para o apoio à operação da usina. Suas principais linhas de pesquisa são estruturas de dados, grafos, computação de alto desempenho, restabelecimento de sistemas de distribuição de energia elétrica e estabilidade de tensão. Email: mrmansour@ieee.org



Luis F. C. Alberto (Santos, 1971) obteve o título de Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (USP), em 1997 e 2000, respectivamente. Atualmente é Professor Associado do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos - USP e editor associado da Revista Controle & Automação. Luis passou um ano na Universidade de Cornell como visitante Pós-Doutor em 2004 e 2005. É Membro do IEEE desde 1994 e ganhador do Prêmio Instituto de Engenharia como o melhor aluno da Escola de Engenharia da USP em 1995. Suas principais linhas de pesquisa são análise de sistemas não-lineares, incluindo aplicações em análise de estabilidade em sistemas elétricos de potência. É autor do livro *Análise de Estabilidade de Sistemas de Potência* e de um

capítulo de livro sobre estabilidade e equilíbrio publicado na Enciclopédia de Automática do SBA. Possui mais de 120 artigos em periódicos e conferências. Email: lfcalberto@usp.br



Rodrigo Andrade Ramos (Franca, 1973) obteve o título de Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (USP), em 1999 e 2002, respectivamente. Atualmente é Professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos - USP. Rodrigo atuou também como Professor Visitante na Universidade de New South Wales, Austrália entre 2007 e 2008. É Membro do IEEE desde 1999 e da Sociedade Brasileira de Automática desde 2006. Suas principais linhas de pesquisa são análise de pequenas perturbações em sistemas de energia elétrica e projeto de estabilizadores de sistemas de potência e controladores de amortecimento. Email: ramos@sc.usp.br