

AVALIAÇÃO DO CONTROLE COORDENADO DE TENSÃO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

A. C. ZAMBRONI DE SOUZA¹, B. ISAIAS L. LOPES¹, RAFAEL C. LEME¹,
OTÁVIO A. S. CARPINEIRO¹, VALÉRIO O. ALBUQUERQUE², AMAURI REGADO²

¹ISEE/UNIFEI

Av. BPS 1303, Pinheirinho, Itajubá – MG, 37500-000

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

²CEMIG

Companhia Energética de Minas Gerais

E-mails: voa@cemig.com.br, amauri@cemig.com.br

Abstract— This paper describes the problem of coordinated voltage control using the quasi-dynamic model. Some theoretical aspects are discussed, and the results obtained are commented. The tests were carried out with the help of real systems, and all limits have been taken into consideration. The results obtained render the technique as effective.

Keywords— Control actions, coordinated voltage control, power systems.

Resumo— Este artigo descreve o problema de controle coordenado de tensão tendo como ferramenta de análise o modelo quase dinâmico de sistema. Desta forma, aspectos teóricos são discutidos através da apresentação da proposta de análise, e resultados comentados. Os testes foram realizados com ajuda de sistemas teste reais, onde os limites operativos foram todos considerados. Os resultados obtidos qualificam a técnica como efetiva.

Palavras-chave— Ações de controle, controle coordenado de tensão, sistemas de potência.

1 Introdução

Este artigo propõe uma nova ferramenta de análise de sistemas de potência, com ênfase especial em sistemas de transmissão. A idéia central consiste em propor uma metodologia de controle coordenado de tensão em sistemas de potência. Para este fim, algumas ferramentas recentes na literatura são empregadas, enquanto que outras inéditas são também propostas.

Este trabalho tem o objetivo de estabelecer e propor uma política hierárquica de controle de tensão. Este estabelecimento será consequência, aqui, da escolha de um modelo quase-dinâmico de sistema. Tal modelo tende a considerar as vantagens de uma modelagem complexa do sistema, ao mesmo tempo em que um baixo custo computacional é obtido.

A hierarquia de controle é proposta neste trabalho através da seguinte seqüência:

1- Ações de controle locais, obtidas através de chaveamento de bancos de capacitores e reatores existentes.

2- Variação de taps nos transformadores. Neste caso, enquanto o nível de tensão estiver fora da faixa desejada, variações de tape ocorrem. A parada desta ação de controle obedece a dois critérios;

limite físico de taps e uma sensibilidade proposta neste trabalho.

3- Controle secundário de tensão, que ocorre quando duas ou mais barras de geração controlam a mesma barra de carga.

A implementação desta hierarquia fornece resultados interessantes, que serão explorados aqui através de sistemas teste do IEEE.

2 Modelo Qase-Dinâmico

O modelo dinâmico do sistema de potência permite analisar o processo transitório de colapso de tensão, caso uma contingência seja o elemento que inicia o processo, além de ratificar as simulações estáticas. **Considerando que, após o transitório, um** ponto de operação e obtido, uma alternativa de análise de estabilidade de tensão a longo termo foi proposta em [1]-[3-]. Nesta aproximação, as equações diferenciais do sistema são anuladas e um modelo algébrico é considerado, uma vez que elementos discretos movem o sistema de um ponto de equilíbrio a outro.

Além da manutenção das vantagens da análise estática, o modelo quase-dinâmico pode dispensar a aquisição de uma quantidade considerável de dados e reduzir drasticamente o esforço computacional.

Portanto, o modelo quase-dinâmico considera que o comportamento de sistema é decomposto em escalas de tempo de interesse. Isto permite separar as equações e as variáveis envolvidas como segue:

1. Dinâmica de longo prazo, consequência da evolução lenta da carga:

$$\mathbf{w} = \boldsymbol{\phi}(\mathbf{t}) \quad (1)$$

2. Dinâmicas discretas, associadas com LTC e OXL (limitadores de sobre-excitação).

$$\mathbf{z}(\mathbf{k} + 1) = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}(\mathbf{k}), \mathbf{w}) \quad (2)$$

3. Dinâmicas transitórias, associadas ao comportamento das máquinas síncronas, reguladores de tensão, PSS, etc.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{w}) \quad (3)$$

4. Instantâneas, relacionadas às equações da rede:

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{w}) \quad (4)$$

Note que a equação (4) representa as características de rede, i.e., as equações de fluxo de potência; a equação (3) é associada aos vetores das variáveis de estado transitórias; a equação (1) representa a evolução de carga no tempo e a equação (2) relaciona-se à dinâmica discreta do LTC.

Para a equação (3), o modelo de máquina usado aqui é o modelo IEEE (1.1). Esse modelo consiste em 4 equações diferenciais para cada gerador. O modelo "IEEE Type 1" representa o regulador de tensão. A dinâmica descrita acima pode ser usada para caracterizar o comportamento do sistema durante o período de pós-falta. Como esta abordagem não é o foco deste trabalho, não serão apresentados detalhes associados com a integração das equações diferenciais. O ponto de análise é o comportamento de longo prazo, assumindo que o sistema mantém-se em equilíbrio após a fase transitória. Esta suposição fornece a seguinte consideração em relação a equação (3):

$$\mathbf{0} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{w}) \quad (5)$$

Considerando que a dinâmica transitória é negligenciada, nenhuma integração numérica é necessária. Assim, um método iterativo é usado para calcular as variáveis de estado, como no cálculo do fluxo de carga convencional. Para cada ponto de operação definido pela mudança de tape do LTC, o processo iterativo é executado, e as variáveis de interesse são, então, conhecidas. Se o nível de tensão na barra controlada ainda é baixo, uma nova mudança de tape acontece e o processo é repetido.

3 Método de trabalho

O objetivo deste trabalho é manter a estabilidade do sistema através da determinação clara do instante de bloqueio dos tapes do LTC, usando o modelo quase-dinâmico e a técnica de estabilidade estática nas análises de longo termo. Além de manter a estabilidade, a metodologia proposta identifica o tempo

de bloqueio como o instante associado à máxima carga recuperada.

Inicialmente será utilizado um sistema de 4 barras para analisar o que ocorre em um sistema quando há um distúrbio. A idéia é então estendida ao sistema de 57 barras do IEEE. O estudo é executado conforme o seguinte esquema:

1. O sistema está em uma condição operacional estável;
2. Uma linha de transmissão é então retirada e o período transitório é simulado completamente e superado;
3. Um ponto de operação é obtido e a resposta dinâmica de longo prazo é analisada por um processo iterativo.

Para acompanhar o comportamento do sistema como consequência de várias mudanças de tapes, nenhuma ação de controle adicional é implementada.

Por conveniência, o sistema usado em [2-] também é empregado aqui, assim os resultados podem ser comparados.

As Figuras 1 e 2 mostram, respectivamente, o nível de tensão e o comportamento do ângulo de carga do gerador. Nota-se que o sistema atinge o ponto de colapso em aproximadamente em 100 segundos, caracterizando o processo como de longo prazo.

As figuras 1 e 2 confirmam os resultados descri-

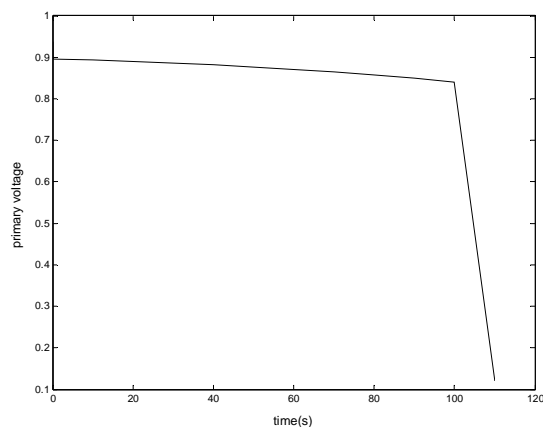


Figura 1. Tensão na Barra 4.

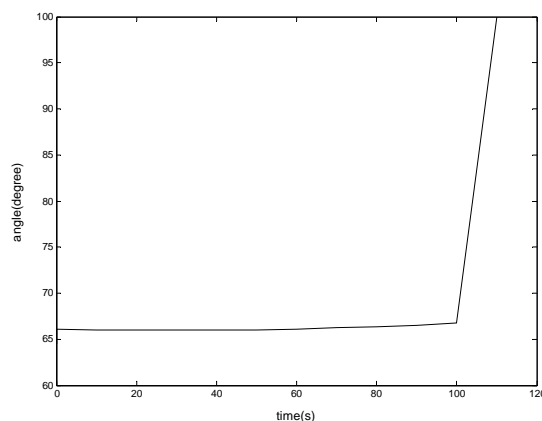


Figura 2. ângulo de fase do gerador.

tos em [2-]. Este sistema será analisado novamente na Seção 4, quando da aplicação do recurso e de bloqueio do LTC, objetivo final do presente estudo.

4 Ferramentas de análise

Nesta seção é proposta uma nova ferramenta na tentativa de se evitar o colapso de tensão. Para conferir a consistência da metodologia, duas outras ferramentas são usadas para comparação: as equações características do LTC e a quantidade de carga recuperada com as mudanças de tapes.

Este montante de carga recuperada é diretamente relacionado ao nível de tensão na barra controlada. A figura 3 apresenta um esboço completo do processo.

Assuma que uma contingência produza um baixo perfil de tensão no sistema após a falta. A dinâmica lenta do LTC tende a recuperar o nível de tensão na barra monitorada. As curvas mostram duas regiões (pré e pós-falta). O ponto Po^* é o ponto de equilíbrio pré-falta e P é imediatamente um ponto após a ocorrência do distúrbio. Nesta situação, um LTC caminha para Po^* seguindo a trajetória mostrada na Figura 3, porém as limitações do sistema são uma barreira para se atingir aquele ponto. Desta forma, o LTC pode deteriorar ainda mais as condições operacionais. O objetivo deste artigo é identificar o momento para o bloqueio do LTC, a partir do qual a continuação de manobras neste dispositivo, provoca efeitos não desejados de controle, podendo levar o sistema ao colapso.

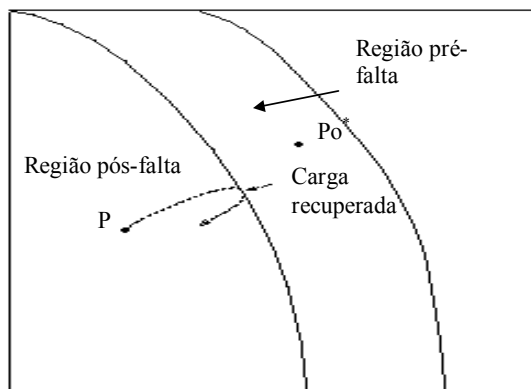


Figura 3. Carga recuperada pelo LTC.

Na subseção 4.1, a metodologia para identificação do instante do bloqueio é descrita. As subseções 4.2 e 4.3 apresentam algumas alternativas já conhecidas na literatura com o fim de comprovar os resultados.

4.1. Vetor Tangente como identificador do instante de bloqueio

A partir do modelo de fluxo de carga, o sistema de equações pode ser representado como segue:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \lambda) = \mathbf{0} \quad (6)$$

Onde λ é um parâmetro qualquer do sistema.

No método da continuação a margem de carga de sistema é o objeto da análise, sendo λ o fator de aumento de carga/geração (parâmetro de sistema). A próxima seção apresenta um resumo do método da continuação, de forma a apresentar ao leitor esta importante ferramenta de análise. Se uma contingência leva o sistema a instabilidade, o modelo usado aqui já não identifica o comportamento transitório. Por outro lado, uma condição pós-falta estável poderia ocorrer, embora com um perfil baixo de tensão. Em uma situação assim, seria desejável aumentar o nível de tensão, o que exigiria uma ação de controle. O parâmetro que desempenha esta ação neste artigo, levando o sistema a um próximo ponto operacional, é um LTC. Consequentemente, neste caso particular, λ não é a variação de carga, mas a mudança de tape. Diferenciando a equação (6) em relação ao parâmetro do sistema em um ponto de equilíbrio j , tem-se:

$$\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \Big|_j \frac{d\mathbf{x}}{d\lambda} \Big|_j + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \lambda} \Big|_j = \mathbf{0} \quad (7)$$

Dessa forma, o vetor tangente é dado por:

$$\frac{d\mathbf{x}}{d\lambda} \Big|_j = - \left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \Big|_j \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \lambda} \Big|_j \quad (8)$$

Onde: $\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \Big|_j$ = matriz Jacobiana em j ;

$\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \lambda} \Big|_j$ = Derivadas parciais em relação ao parâmetro tape.

Trata-se de um vetor nulo, com exceção das derivadas associadas às barras que conectam os LTC.

Note que o modelo descrito é derivado do modelo estático e deveria incorporar as equações dinâmicas para ser aplicado aqui. Porém, desde que o LTC é a única ação de controle considerada, em cada ponto de operação (como mostrado nas seções anteriores), as equações diferenciais desaparecem, e a seguinte redução é válida:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \Delta \mathbf{g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} \\ \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{y}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{y} \end{bmatrix} \quad (9)$$

No ponto de equilíbrio, $\Delta \mathbf{g} = 0$. Entretanto, a equação (9) é apresentada dessa forma apenas para ilustrar a redução matricial. A matriz \mathbf{J}' é então definida como:

$$\mathbf{J}' = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{y}} & - \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}} \frac{\partial \mathbf{f}^{-1}}{\partial \mathbf{y}} \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} \end{bmatrix} \Big|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0)} \quad (10)$$

A equação (10) representa as derivadas parciais das equações de potência reativa com relação aos níveis de tensão, com todos os demais componentes representados. Assim, esta matriz contém implicitamente todos os elementos dinâmicos considerados.

Como o LTC tende a recuperar o nível de tensão, sua ação é refletida em um ponto de operação seguinte. Esta ação tende a produzir um melhor perfil de tensão, e um ponto operacional estável poderia ser

alcançado. Porém, é possível que a partir de um ponto de operação, tal ação produza uma deterioração que pode, eventualmente, dirigir o sistema a um colapso de tensão [4-]. A deterioração do perfil de tensão pela mudança de tape pode ser causada pelo aumento das perdas, pela correção das cargas modeladas, pela interação entre os dispositivos de controle, ou ainda por ajustes de tensão não adequados a uma condição operativa particular.

A equação (8) mostra como as variáveis de estado mudam como função do parâmetro do sistema e, desta forma, será usada como índice.

Assumindo o funcionamento do sistema em uma região normal de operação, há uma correspondência entre a mudança de tape e a variação de tensão na barra controlada. Isto é confirmado diretamente por $dV_{int}/d\lambda$, onde o índice “int”, refere-se à barra de interesse ou controlada. Contanto que $dV_{int}/d\lambda$ apresente o mesmo sinal, o nível de tensão na barra “int” é corretamente controlado. A partir do instante em que este sinal muda, a ação provê efeitos contrários ao desejado. A monitoração deste índice é suficiente para a proposição do momento de bloqueio do LTC. A eficiência desta proposta é verificada pelos índices descritos a seguir.

4.2. Equação característica do LTC

A ação temporal contínua do LTC pode ser representada como segue:

$$\frac{dtape}{dt} = K(V_0 - V) \quad (11)$$

Onde:

K = constante característica do LTC;

V_0 = tensão de “set point”;

V = tensão controlada pelo LTC.

A análise linear no ponto de equilíbrio permite avaliar o comportamento de LTC. No máximo nível de tensão tem-se:

$$\frac{d\Delta tap}{dt} = A \cdot \Delta tap \quad (12)$$

$$\frac{d\Delta tap}{dt} = -K \frac{\partial V}{\partial tape} \Delta tap \quad (13)$$

Quando o nível de tensão é máximo, a equação (13) atinge seu valor máximo.

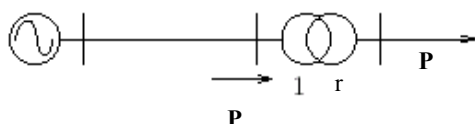


Figura 4. LTC ideal.

4.3. Montante de carga recuperada

Considere um LTC ideal (sem perdas), como mostrado na Figura 4.

Assuma, por simplicidade, que a carga seja modelada por impedância constante:

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \quad (14)$$

O modelo de carga acima descreve uma ligação direta entre a carga consumida e o nível de tensão. Assim, a carga recuperada é máxima quando o nível de tensão também é máximo.

5 Método da continuação

O método da continuação [5-]-[8-] 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, dado pela equação (6), na 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:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (15)$$

Um aumento de carregamento é dado por:

$$\begin{aligned} P &= P_0(1 + \Delta\lambda) \\ Q &= Q_0(1 + \Delta\lambda) \end{aligned} \quad (16)$$

Em (17), 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, podemos reescrever (15) como:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{bmatrix} \Delta\lambda \quad (17)$$

Ou ainda,

$$VT = \begin{bmatrix} \\ \end{bmatrix} \frac{1}{\Delta\lambda} = J^{-1} \begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

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 [9-]-[11-]. O tamanho do passo predictor é dado por:

$$\Delta\lambda = \mathbf{1}/\|\mathbf{VT}\| \quad (19)$$

onde $\|\cdot\|$ representa a norma do vetor tangente. Da expressão (19) é fácil notar que o número 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:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ rshl \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N & kl \\ M & L & \\ FFI & & kFI \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} \quad (20)$$

Onde H, N, M e L são as sub-matrizes do Jacobiano do fluxo de carga, e o vetor kl representa as predeterminadas direções de aumento de geração e carregamento. 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 mal condicionadas, e uma parametrização diferente é usada, conforme a estrutura abaixo:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ rshl \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N & kl \\ M & L & \\ & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} \quad (21)$$

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

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

A Figura 5 ilustra este método, facilitando sua compreensão.

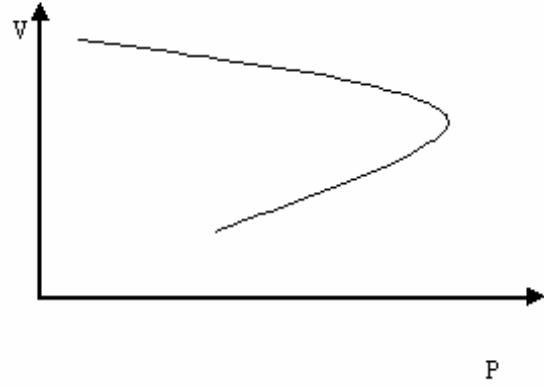


Figura 5. Método da Continuação.

6 Testes e resultados

A idéia proposta na seção anterior é agora testada. Dois sistemas teste são considerados. Para ambos os sistemas, as mudanças de tape ocorrem a cada 10 segundos, e a primeira mudança ocorre após 20 segundos. Primeiramente, um sistema de 4 barras é empregado. Como discutido na Seção III, o modelo usado neste trabalho reproduz convenientemente os resultados discutidos naquela referência. Nesta seção, o sistema de 4 barras é utilizado, desta vez, para detecção do instante de bloqueio do LTC. Os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 6-8. É sabido, da Seção III, que o sistema se desestabiliza em 100 segundos. As Figuras 6 e 7 mostram que a carga recuperada e a equação característica do LTC são máximas em 90 segundos, enquanto a Figura 8 mostra que o vetor tangente muda de sinal em 94 segundos. Isto é suficiente para qualificar esta metodologia como eficiente para determinação do instante de bloqueio, já que além deste tempo (94 segundos), a carga recuperada tende a decrescer em função da redução da tensão controlada pelas novas variações de tape.

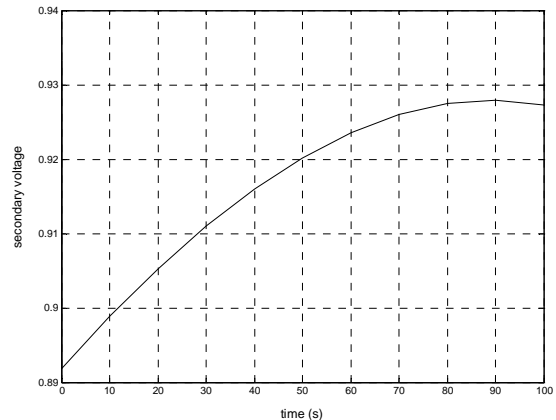


Figura 6. Nível de tensão na Barra 4 (Sistema de 4 barras).

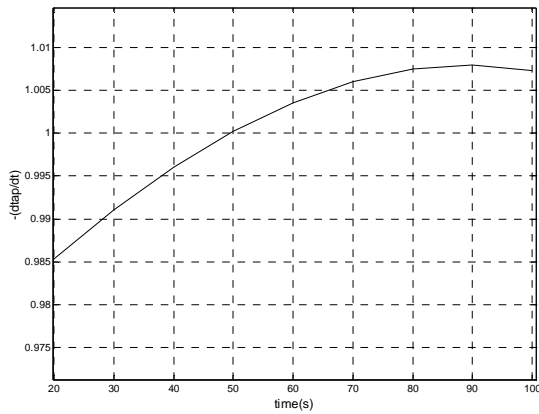


Figura 7. Equação característica LTC (Sistema 4 barras).

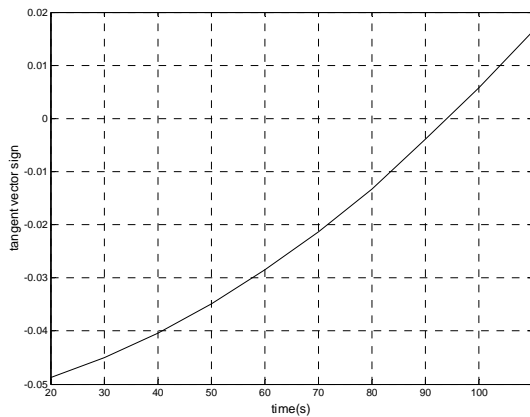


Figura 8. Sinal vetor tangente (Sistema de 4 barras).

Após aplicar a metodologia para este sistema teste, o sistema de 57 barras do IEEE é testado. Os testes são executados considerando as mudanças de *tape* no LTC que conecta as Barras 3 e 4. O processo é iniciado quando a linha de transmissão que conecta as Barras 5 e 6 sofre um curto. A linha é aberta dentro de um tempo suficiente para manter a estabilidade do sistema. A partir desta suposição, variações discretas são assumidas, de forma a obter diferentes pontos de operação. Como o *tape* é situado no lado primário, o nível de tensão secundário melhora quando o *tape* tem seu valor diminuído. Portanto, assumindo o *tape* como variável de controle, o vetor tangente associado à variável de interesse (nível de tensão na Barra 4) deve ser negativo.

A Figura 9 mostra que o sistema colapsa em 280 segundos, caso nenhuma ação seja tomada. O nível de tensão na Barra 4 e a equação característica do LTC são mostrados nas Figuras 10 e 11, respectivamente. Note que as mudanças de *tape* tendem a melhorar o nível de tensão até um determinado instante, a partir do qual o controle tem efeito contrário ao esperado. Este instante de tempo é claramente observado na Figura 12, onde o componente do vetor tangente de interesse é mostrado. Através daquela figura, nota-se que o vetor tangente muda de sinal no instante de 100 segundos, de forma que este deveria ser o instante de bloqueio do LTC.

A Figura 13 mostra o comportamento da carga assumindo o bloqueio do LTC em 100 segundos. O sistema trabalha estável para esta condição, e o nível de tensão obtido é considerado satisfatório ($V=0.9518$ pu). Se for necessário melhorar ainda mais este nível de tensão, outras ações de controle devem ser adotadas, não sendo este o foco do presente artigo.

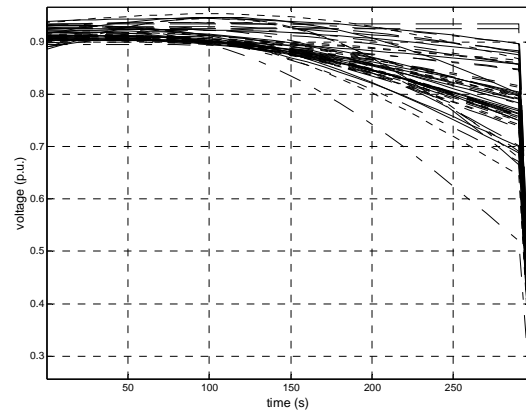


Figura 9. Nível de tensão em todas as barras (IEEE 57-barras).

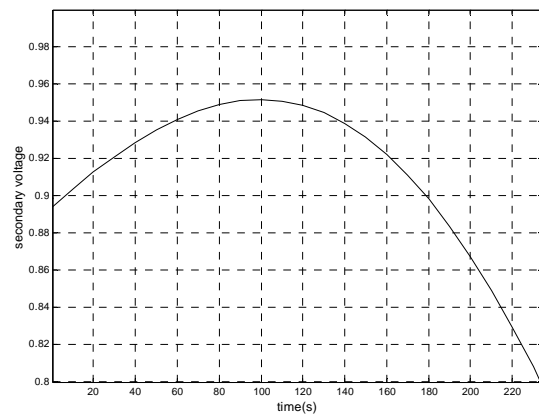


Figura 10. Nível de tensão na Barra 4 (IEEE 57-barras).

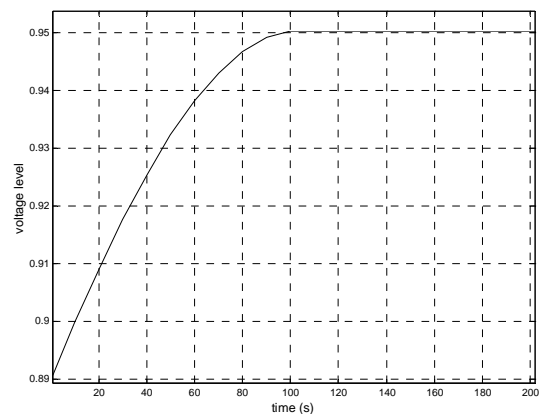


Figura 11. Bloqueio de LTC (IEEE 57-barras).

7 Considerações Finais

Uma nova metodologia para detectar o instante de bloqueio de LTC foi proposta neste trabalho. As mudanças de tape têm por objetivo, melhorar o nível de tensão degradado em função de uma contingência. Um modelo quase dinâmico é considerado, sendo a análise de longo termo o foco do estudo. Isto presume, portanto, que o sistema é capaz de superar o período transitório. Após o período transitório, é assumido, nas simulações, que pequenas perturbações, como entrada de carga seguida de atuação de dispositivos lentos de controle, como os LTC, são os únicos elementos que mudam o ponto operativo do sistema. Foi visto que estas variações podem levar o sistema à instabilidade, já que pontos de operação indesejáveis podem ser obtidos. O ponto a partir do qual tal comportamento pode se manifestar é corretamente identificado através de um índice. Este índice é calculado através da matriz Jacobiana do sistema, considerando as mudanças de tape como o parâmetro do sistema. Os resultados obtidos mostram que o índice pode ser efetivo para este propósito, já que o ponto de bloqueio coincide com o ponto de máxima carga recuperada.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a CAPES, CNPq e Fapemig pelo suporte financeiro.

Referências Bibliográficas

- 1- Van Cutsem, T., Jacquemart, Y., Pruvot, P., "Extensions and Applications of a Mid-term Voltage Stability Method", *Proc. Bulk Power System Voltage Phenomena III-Voltage Stability and Security*, ECC Inc., Switzerland, August 1994.
- 2- Van Cutsem, T., Vournas, C. D., "Voltage Stability Analysis in Transient and Mid-Term Time Scales", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, n.1, pp. 146-154, February 1992.
- 3- Causarano, W. J., Falcão, D. M., Taranto, G. N., "A Fast Time Domain Simulation Method for Voltage Stability Assessment", *Proceedings of the VI SEPOPE*, Salvador, Bahia, May 1998.
- 4- L. C. Araújo Ferreira, A. C. Zambroni de Souza, "Método Estático para Avaliação da Influência de Load Tap Changer na Estabilidade de Tensão", *VII Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning*, Curitiba, Maio 2000.
- 5- 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.
- 6- N. Mithulananthan and C. Cañizares, "Indices to Detect Hopf Bifurcations in Power Systems", *The Proceedings of the Thirty-Second Annual North American Power Symposium*, Volume II, Waterloo, Canada, pp.15-18, 23-24 October 2000.
- 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- A. 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, August 1997, pp. 1380-1387
- 9- A. C. Zambroni de Souza, "Discussion on Some Voltage Collapse Indices", *Electric Power Systems Research*, Vol. 53, No.1, pp. 53-58, January 2000.
- 10- R. Seydel, "From Equilibrium to Chaos-Practical Bifurcation and Stability Analysis," Elsevier Science, North-Holland, 1988.
- 11- A. C. Zambroni de Souza, "Identifying a Vanishing Eigenvalue in Voltage Collapse Analysis with Limits Consideration", *IEE Proceedings, Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 148, No. 3, May 2001, pp. 263-267.