SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

GOP 12
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO IX
GRUPO DE ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA – GOP

AVALIAÇÃO DO RISCO DE COLAPSO DE TENSÃO EM TEMPO REAL BASEADA EM MEDIÇÃO FASORIAL

Sandro Corsi
CESI
Milão, Itália

Glauco Nery Taranto *
COPPE/UFRJ
Rio de Janeiro, Brasil

RESUMO

Este artigo apresenta um método de avaliação do risco de colapso de tensão em tempo real baseado em medição fasorial. Fasores de corrente e tensão nodais são utilizados para identificar o equivalente de Thevenin "visto" pela barra considerada. O risco da instabilidade de tensão é então detectado, quando o módulo da impedância de Thevenin (à montante da barra) se aproxima do módulo da impedância da carga (à jusante da barra).

O artigo apresenta uma simulação do método num sistema real de grande porte (2550 barras – 2200 linhas) que representa o sistema elétrico Italiano contendo as redes de 380kV e 220kV. O modelo computacional contém a modelagem dinâmica completa dos equipamentos e sistemas de controle para os horizontes de curto e longo prazo.

PALAVRAS-CHAVE

PMU, Estabilidade de Tensão, Colapso de Tensão, Equivalente de Thevenin,

1.0 - INTRODUÇÃO

A tecnologia das unidades de medição fasorial (PMU, do inglês, *Phasor Measurement Units*) avança a passos largos e começa a se estabelecer como um novo paradigma nos sistemas de energia elétrica (SEE) em todo o mundo [1]. A característica fundamental dos PMUs é a de medir os valores de seqüência positiva (negativa e zero, também se necessárias) de tensões e correntes em tempo real com alta precisão de sincronização. Isso permite uma precisa comparação entre medições locais e/ou remotas que podem ser usadas não somente para a melhor monitoração do SEE, assim como no aperfeiçoamento de sistemas de proteção e controle. Alguns exemplos de futura utilização dos PMUs nos SEE são na monitoração e controle da estabilidade angular e de tensão, estimação de estados, análise pós-distúrbios, gerenciamento de gargalos de transmissão, estabilização usando sinais remotos, recomposição, proteção adaptativa, etc.

O bom desempenho e precisão do PMU em rastrear fenômenos dinâmicos na rede elétrica, o coloca em posição privilegiada no problema de monitoração e controle da estabilidade em SEE em geral, e em particular ao problema de estabilidade e colapso de tensão. O problema da instabilidade de tensão em SEE surge devido, entre outros fatores, ao crescimento da demanda sem a devida ampliação da rede de transmissão, da alteração do fluxo de energia, hoje, mais influenciado por uma lógica econômica do que por uma lógica de melhor aproveitamento das disponibilidades de controle, pela má administração ou escassez de fontes de potência reativa, etc.

(*) Centro de Tecnologia – Bloco H – sala H-343 – PEE-COPPE/UFRJ - Cidade Universitária – Ilha do Fundão – CEP 21941-972, Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 2562-8615 – Fax: (+55 21) 2562-8627 – Email: tarang@coep.ufrj.br

Esse artigo apresenta um método de identificação do risco de colapso de tensão em barras de EAT baseado nas medições dos fasores de tensão e corrente nodais. Contrariamente aos tradicionais métodos de avaliação da segurança de tensão baseados em modelos computacionais desenvolvidos para implantação em sistemas EMS, o método apresentado nesse artigo é baseado apenas em medições locais, sendo então, adequados para a aplicação em tempo real em SEE.

O método apresentado no artigo foi desenvolvido tendo-se em mente a avaliação do risco do sistema enfrentar um problema de instabilidade/colapso de tensão em barras de EAT, o que se traduz numa estimação da margem de carregamento do sistema. O método se baseia na identificação dos parâmetros do equivalente de Thevenin (tensão e impedância) “vistos” da barra de EAT [2-5]. O problema da instabilidade de tensão é estimado pela comparação entre a impedância de Thevenin (impedância à montante) e a impedância da carga (impedância à jusante). Os parâmetros do equivalente de Thevenin são estimados a partir dos fasores de tensão e corrente medidos localmente, assim como a impedância da carga é calculada a partir dos mesmos fasores. A monitoração da “distância” relativa entre essas duas impedâncias indica a proximidade do máximo carregamento do sistema à jusante da barra monitorada, consequentemente dando, com adequada precisão, a proximidade do colapso de tensão.

No fenômeno da instabilidade de tensão de médio e longo prazo, é determinante a atuação dos transformadores com mudança automática de tapes e dos limitadores de sobre-excitação dos sistemas de regulação de tensão dos grupos geradores. Essas dinâmicas, presentes nos fasores de corrente e tensão nodais, são fundamentais na estimação da margem de carregamento do sistema. O método proposto tem um alto desempenho na rapidez da estimação dos parâmetros quando essas dinâmicas se fazem presentes.

O artigo apresenta uma simulação do método num sistema real de grande porte (2550 barras – 2200 linhas) que representa o sistema elétrico Italiano contendo as redes de 380kV e 220kV. O modelo computacional contém a modelagem dinâmica completa dos equipamentos e sistemas de controle.

2.0 - FUNDAMENTOS BÁSICOS DO MÉTODO PROPOSTO

Considerando o circuito elétrico mostrado na Fig.1, o objetivo é estimar os parâmetros do equivalente de Thevenin $\vec{E}_{Th}$ e $\overline{Z}_{Th}$, com base nos fasores de tensão e corrente $\vec{V}_L$ e $\vec{I}_L$ medidos na barra de carga.

Da lei de Kirchoff:

$$\vec{V}_L = \vec{E}_{Th} - \overline{Z}_{Th}\vec{I}_L \qquad (1)$$

Onde $\overline{Z}_{Th} = R_{Th} + jX_{Th}$.

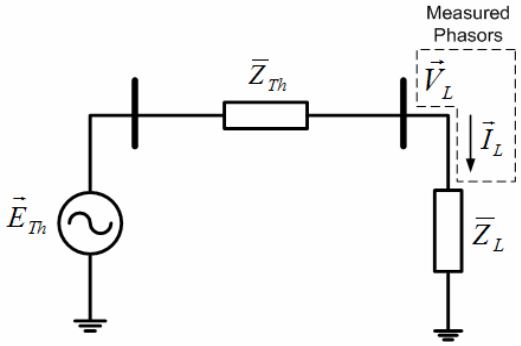

FIGURA 1 – Circuito Equivalente de Thevenin

A equação (1) tem infinitas soluções se forem conhecidos somente os fasores de tensão e corrente. Entretanto, duas medições subseqüentes dos fasores $\vec{V}_L$ e $\vec{I}_L$ podem ser usadas para se calcular $\overline{Z}_{Th}$ e $\vec{E}_{Th}$, sob a hipótese que ambos não sofrem alterações no intervalo de tempo entre as duas medições subseqüentes. De acordo com esse procedimento, a equação matricial correspondente apresenta uma elevada chance de ser singular, especialmente considerando o necessário curto intervalo de tempo entre medições subseqüentes. Dessa forma, métodos de identificação baseados nesse procedimento apresentam dificuldades numéricas e necessitam de uma janela de observação maior para atingir convergência. Apenas na presença de variações significantes entre o tempo de amostragem, é possível se atingir um resultado aceitável. Isso acontece quando o sistema está à beira de um colapso, porém esse aumento de confiabilidade na identificação dos parâmetros poderá chegar um pouco tarde, a fim que se possam ativar os controles preventivos e as proteções especiais. Por esse motivo, se propõe um método que acelera o procedimento de identificação dos parâmetros de Thevenin.

A máxima transferência de potência para a carga do circuito mostrado na Fig.1, ocorre quando:

$$\left|\overline{Z}_L\right| = \left|\overline{Z}_{Th}\right| \quad (2)$$

com $\overline{Z}_L = Z_L \angle\theta = R_L + jX_L$.

O circuito representa de forma equivalente todo o sistema visto da barra considerada. De acordo com o diagrama fasorial mostrado na Fig.2, pode-se escrever:

$$\vec{V}_\Delta = \overline{Z}_{Th} \times \vec{I}_L = R_{Th} I_L + jX_{Th} I_L \quad (3)$$

$$\vec{E}_{Th} = \vec{V}_L + \vec{V}_\Delta \quad (4)$$

com $\vec{E}_{Th} = E_{Th} \angle\beta$, $\vec{V}_L = V_L \angle\theta$ e $\vec{I}_L = I_L \angle 0^\circ$.

Separando (4) nas partes real e imaginária, tem-se:

$$E_{Th} \cos\beta = R_{Th} I_L + V_L \cos\theta \quad (5)$$

$$E_{Th} \sin\beta = X_{Th} I_L + V_L \sin\theta \quad (6)$$

Para a impedância equivalente de Thevenin vista de uma barra de EAT, tem-se $X_{Th} >> R_{Th}$, fazendo com que a aproximação de $R_{Th} \approx 0$ seja bem razoável. Então, uma estimativa inicial para β é dada por:

$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{V_L \cos\theta}{E_{Th}}\right) \quad (7)$$

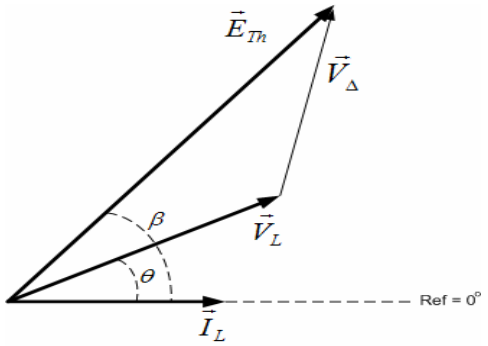

Fig. 2. Diagrama Fasorial do Circuito Equivalente de duas Barras

Como V_L e θ são grandezas medidas pelos PMUs, a estimative inicial de β ainda depende de E_{Th}. De acordo com as leis dos circuitos elétricos e considerando que o sistema se encontra antes do Ponto Máximo de Carregamento (PMC), o valor de E_{Th} se encontra entre o valor mínimo ($E_{Th}^{\min}$), correspondendo à tensão na barra de carga, e o valor máximo ($E_{Th}^{\max}$), correspondendo à tensão quando $Z_L = X_{Th}$ (com $R_{Th} = 0$). Em condições normais de operação a impedância da carga é muito maior que a impedância equivalente de Thevenin. Uma boa estimativa inicial para E_{Th} é a média aritmética dos valores extremos dada por

$$E_{Th}^0 = \frac{E_{Th}^{\max} - E_{Th}^{\min}}{2} \quad (8)$$

Onde $E_{Th}^{\min} = V_L$ e $E_{Th}^{\max} = V_L \cos\theta / \cos\beta$, com β obtido de: $\tan\beta = (Z_L I_L + V_L \sin\theta)/(V_L \cos\theta)$.

Dentro da região admissível de E_{Th}, o objetivo é identificar o valor correto de X_{Th} que é um parâmetro variante no tempo apresentando rápida variação quando próximo ao PMC [6]. Então, a aplicação correta do método proposto requer uma taxa de amostragem bastante elevada de forma assegurar que E_{Th} e X_{Th} sejam constantes no curto intervalo de tempo "*i – (i-1)*" do processo de identificação.

Simulações apresentadas em [7] mostraram que a simplificação de se considerar E_{Th} constante durante, por exemplo, um crescimento de carga em rampa, resultaram numa identificação de X_{Th} criticamente dependente do valor fixado para E_{Th}, sendo capaz de se garantir o correto valor apenas no PMC.

Após a estimativa inicial de E_{Th} baseada em (8), é necessário saber se o valor correto de E_{Th} é maior ou menor que a estimativa inicial. Uma forma analítica de determinação da direção a ser tomada para se atingir o valor correto de E_{Th} é da em [5], porém uma forma simples e intuitiva de se determinar a direção de crescimento ou diminuição de E_{Th}, é dada pelo exemplo numérico a seguir.

Referindo-se à Fig.1, vamos assumir que os valores corretos da tensão e da impedância de Thevenin sejam 20V e 1Ω, respectivamente. Porém para explicar o cerne do método proposto, nós vamos assumir que esses valores não são conhecidos. Na realidade são eles que queremos estimar! Precisamos assumir que os valores de E_{Th} e Z_{Th} são constantes entre duas amostragens subseqüentes (Essa é uma aproximação bastante razoável quando estamos tratando de taxas de amostragens da ordem de 20ms).

Iniciaremos nossa análise assumindo uma impedância de carga igual a 9Ω. Consequentemente, a corrente do circuito é de 2A e a tensão imposta na impedância de carga é de 18V. No próximo passo, consideramos que a impedância de carga diminui para 8Ω. Agora, separamos a análise de duas formas: uma para o caso em que sobreestimamos o valor de E_{Th}, e a outra para o caso em que subestimamos o valor de E_{Th}.

(a) Sobre estimação de E_{Th} – Tabela I (colunas 5 e 6) mostra os valores das variáveis do circuito quando estimamos E_{Th} = 21V. Note que quando sobreestimamos E_{Th}, uma diminuição em Z_L é acompanhada de uma diminuição em Z_{Th}.

Tabela I – Variáveis do Circuito quando sobre e subestimamos E_{Th}

Passo	Variáveis Conhecidas			Variáveis Estimadas			
	Z_L(Ω)	I_L(A)	V_L(V)	E_{Th}(V)	Z_{Th}(Ω)	E_{Th}(V)	Z_{Th}(Ω)
1	9	2	18	21	1,5	19	0,5
2	8	2,22	17,76	21	1,46	19	0,56

(b) Sub estimação de E_{Th} – Tabela I (colunas 7 e 8) mostra os valores das variáveis do circuito quando estimamos E_{Th} = 19V. Note que quando subestimamos E_{Th}, uma diminuição em Z_L é acompanhada de um aumento em Z_{Th}.

Em resumo, para o caso quando a impedância de carga está diminuindo, conclui-se dessa simples análise, que quando a variação da impedância da carga e a variação da impedância de Thevenin têm a mesma direção, o valor da tensão equivalente de Thevenin deve ser reduzida, caso contrário, ela deve ser elevada.

Uma análise similar poderia ter sido feita para o caso quando a impedância de carga aumenta. Nesse caso, as conclusões são opostas, ou seja, quando as variações de ambas impedâncias têm a mesma direção, o valor da tensão equivalente de Thevenin dever ser elevada, caso contrário, ela dever ser reduzida.

Agora que sabemos em qual direção E_{Th} deve ser atualizada em cada intervalo de amostragem, devemos estabelecer quão grande essa variação dever ser. Essa quantidade é calculada da seguinte forma:

$$\varepsilon_E = \min(\varepsilon_{\inf}, \varepsilon_{\sup}, \varepsilon_{\lim}) \tag{9}$$

com

$$\varepsilon_{\inf} = \left| E_{Th}^{i-1} - V_L^i \right| \tag{10}$$

$$\varepsilon_{\sup} = \left| E_{Th}^{i-1} - E_{Th}^{\max(i)} \right| \tag{11}$$

$$\varepsilon_{\lim} = \left| E_{Th}^{i-1} \times k \right| \tag{12}$$

onde k é um parâmetro pré-especificado e escolhido de forma a restringir o erro de identificação, e i é o correspondente intervalo de tempo. Majoritariamente $\varepsilon_{\lim}$ conduz o processo de identificação, fazendo com que a escolha de k seja determinante no bom andamento do processo. As quantidades $\varepsilon_{\inf}$ e $\varepsilon_{\sup}$ são ativas apenas quando o valor estimado de E_{Th} está próximo das fronteiras de sua região factível.

É proposto, então o seguinte algoritmo que rastreia o valor correto de E_{Th} para identificar X_{Th}.

Algoritmo para identificar X_{Th}

Passo 1 – Estimar os valores iniciais para E_{Th}^0 de acordo com (8) e β^0 de acordo com (7) já considerando E_{Th}^0

Passo 2 – Calcular X_{Th}^0 a partir de (6)

Passo 3 – Calcular E_{Th}^i de acordo com a lógica do exemplo numérico anterior.

Passo 4 – Calcular β^i e X_{Th}^i de (7) e (6) respectivamente

Passo 5 – Incrementar i e ir para o Passo 3

Uma possível variante do algoritmo é com respeito ao cálculo de E_{Th}. No Passo 4, o cálculo de β^i e X_{Th}^i pode ser feito através de uma média móvel de E_{Th}, calculada numa janela de tamanho apropriado (*m*), ao invés do valor instantâneo de E_{Th}^i na iteração i. Essa variante tem a vantagem de filtrar as variáveis identificadas, porém pagando o preço do atraso no processo de identificação.

Em síntese, o algoritmo proposto identificará o valor de X_{Th} assim que E_{Th} seja identificado, mantendo uma oscilação de pequena amplitude ao redor dos valores corretos, com uma freqüência igual à metade da taxa de amostragem.

3.0 - RESULTADOS DE SIMULAÇÃO NUM SISTEMA DE GRANDE PORTE

Essa seção mostra a aplicação do algoritmo proposto no sistema elétrico Italiano. A rede analisada consiste das malhas de 380kV e 220kV. O sistema contém 2549 barras, 2258 linhas, 134 grupos de geração térmica e 191 grupos de geração hidráulica. Modelos dinâmicos de curto e longo prazo são utilizados para os geradores, reguladores automáticos de tensão (RAT), limitadores de sobre-excitação (OEL, do inglês *over-excitation limiter*), reguladores automáticos de velocidade (RAV) e transformadores com mudança automática de tape (OLTC, do inglês *on-load tap changing*).

A carga do sistema é de aproximadamente 50 GW, sendo representado por um modelo ZIP estático, tendo α=0,7 e β=2,0 in (13). Apenas os controles primários de tensão e freqüência estão ativos na configuração utilizada.

$$P_L = P_o \times \left(\frac{V_L}{V_o}\right)^{\alpha} \qquad Q_L = Q_o \times \left(\frac{V_L}{V_o}\right)^{\beta} \qquad (13)$$

As simulações foram realizadas considerando uma taxa de amostragem de 20ms. A atualização das variáveis identificadas também é feita a cada 20ms, enquanto que o valor identificado foi baseado nos dados amostrados nos últimos 80ms (*m* = 4, nos testes com o sistema Italiano).

Dois conjuntos de testes foram realizados, um numa barra de carga e outro numa barra de trânsito.

A. Aplicação numa Barra de Carga

Os testes realizados numa barra de carga foram feitos da seguinte forma: aumento da carga em rampa na barra considerada, com uma elevada taxa de variação, conjugado com um aumento da carga, também em rampa, de algumas barras vizinhas com uma taxa de variação menor, sempre mantendo o fator de potência constante. Nosso objetivo em testar o algoritmo de identificação proposto, não foi o de determinar qual barra do sistema sofreria primeiramente o colapso de tensão (barra crítica), mas sim como o método se comportaria à medida que o ponto de instabilidade de tensão fosse se aproximando na barra mais susceptível à instabilidade. Os testes foram realizados na barra Brugherio 380kV na região metropolitana de Milão.

A análise realizada na Área de Milão consistiu em aumentar as cargas locais com uma taxa de variação de 10%/min, e a carga da barra Brugherio 380 kV com uma taxa de variação de 40%/min. Dessa forma, o aumento mais acentuado na barra Brugherio 380 kV, faz com que ela seja a barra crítica da análise da instabilidade de tensão.

A Fig.3 mostra a reatância equivalente de Thevenin e a impedância da carga da barra Brugherio. As curvas mostradas nos gráficos vão até o ponto de instabilidade de tensão (considerado o ponto onde dificuldades numéricas começam a ocorrer no programa de simulação). A Fig.4 mostra a evolução temporal dos tapes dos OLTCs localizados eletricamente próximos à barra Brugherio. As curvas mais grossas do gráfico correspondem aos três OLTCs que alimentam as cargas locais da barra Brugherio. Os OLTCs são representados por um modelo de variação contínua dos tapes disponível no simulador SICRE [8]. A Fig.5 mostra os indicadores de atuação dos OELs de importantes grupos de geração. As curvas mais grossas do gráfico correspondem a três grupos de geradores (Tavazzano 1-2 e Turbigo) eletricamente próximos da barra Brugherio. Quando o indicador atinge o valor zero, significa que o OEL começa operar. Nota-se que quando esses três OELs começam a operar, por volta dos 550s, a reatância equivalente de Thevenin identificada aumenta substancialmente, conforme mostrado na Fig.3. A Fig.6 mostra o indicador de risco de colapso de tensão proposto, definido como a razão entre a reatância de Thevenin identificada (X_{Th}) e a impedância da carga (Z_L).

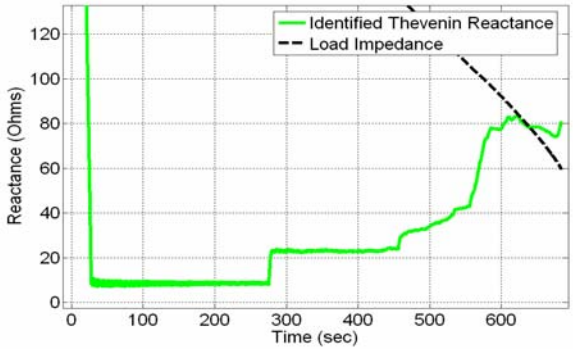

Fig. 3 Reatância de Thevenin Identificada

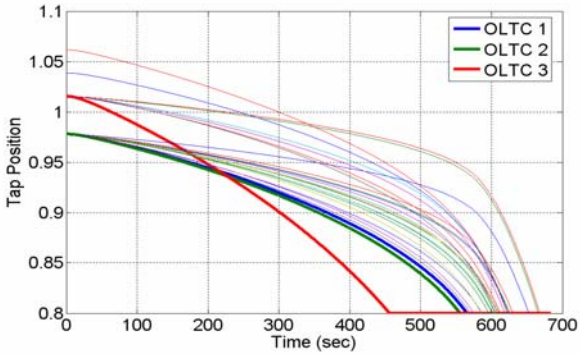

Fig. 4 Evolução dos tapes dos OLTCs próximos à barra de Brugherio

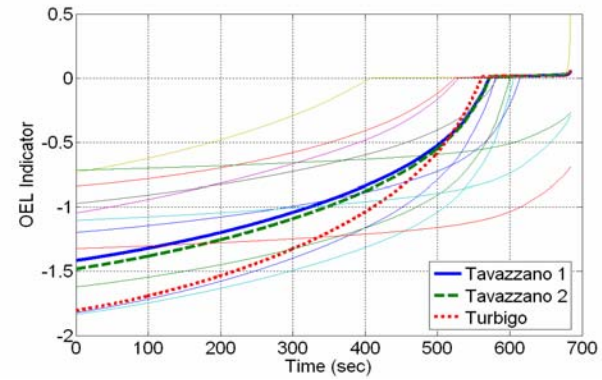

Fig. 5 Indicadores de atuação dos OELs dos geradores próximos à barra de Brugherio

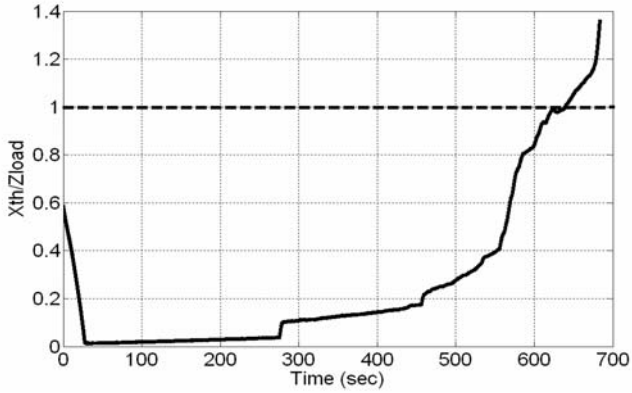

Fig. 6 Indicador do risco de colapso de tensão para a barra de Brugherio

Como as cargas do sistema são realisticamente representadas com um modelo ZIP, a instabilidade de tensão ocorre [6] um pouco depois do PMC (quando as impedâncias são iguais).

B. Aplicação numa Barra de Trânsito

Não somente pelo grande interesse prático, mas também por apresentar maiores dificuldades para testar o algoritmo de identificação, o método proposto foi avaliado numa barra de trânsito. A barra de trânsito é abordada como uma barra de carga de acordo com as considerações feitas em [7], onde as linhas de transmissão cujas correntes deixam a barra, representam a "carga equivalente", e aquelas cujas correntes entram na barra representam o equivalente de Thevenin. O algoritmo foi testado na barra Baggio 380kV também localizada na Área de Milão. As Figs. 7 e 8 mostram a evolução temporal da tensão e da reatância equivalentes de Thevenin, respectivamente. A Fig.7 também mostra os valores limites teóricos para a tensão equivalente de Thevenin ($E_{Th}^{\min}, E_{Th}^{\max}$), e a Fig.8 também mostra a impedância de carga equivalente "vista" da barra Baggio.

As descontinuidades vistas nas curvas da tensão e reatância equivalentes de Thevenin, representam o início de operação dos OELs de grupos de geração vizinhos. De acordo com os resultados de simulação para a barra de Baggio, uma atenção especial deve ser dada após os 400s.

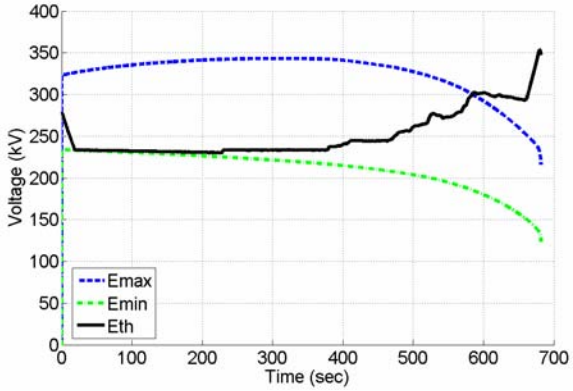

Fig. 7 Tensão equivalente de Thevenin "vista" da Barra de Baggio

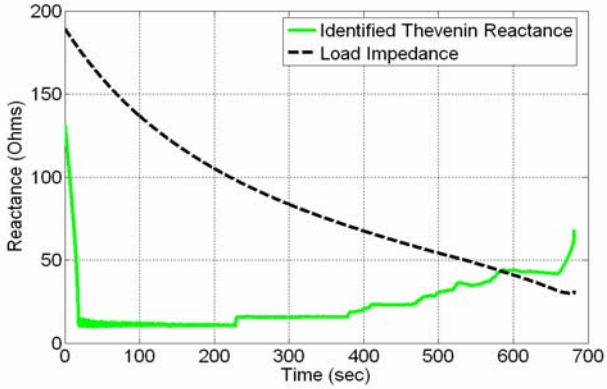

Fig. 8 Reatância equivalente de Thevenin "vista" da barra de Baggio e Impedância equivalente da "carga"

4.0 - CONCLUSÕES

O mundo inteiro, hoje, trabalha na direção de melhor usufruir as novas oportunidades oferecidas pelos PMUs. Esse artigo apresentou uma das possíveis aplicações dos PMUs, voltada para a identificação em tempo real do risco do colapso de tensão num sistema elétrico. Foi apresentado um algoritmo de identificação do equivalente de Thevenin "visto" de uma barra qualquer do sistema, equivalente este que é a base do método utilizado. Resultados de simulação num sistema real de grande porte mostraram que o risco de colapso de tensão pode ser antecipadamente identificado tomando-se como base as medidas dos fasores de tensão e corrente nodais.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] A. G. Phadke, "Synchronized Phasor Measurements in Power Systems", *IEEE Computer Applications in Power*, Vol. 6, No. 2, pp. 10-15, April 1993.

[2] K. Vu, M. M. Begovic, D. Novosel and M. M. Saha, "Use of Local Measurements to Estimate Voltage-Stability Margin", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 14, No. 3, pp. 1029-1035, August 1999.

[3] B. Milosevic and M. Begovic, "Voltage-Stability Protection and Control Using a Wide-Area Network of Phasor Measurements", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 18, No. 1, pp. 121-127, February 2003.

[4] I. Smon, G. Verbic and F. Gubina, "Local Voltage-Stability Index Using Tellegen's Theorem", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 21, No. 3, pp. 1267-1275, August 2006.

[5] S. Corsi and G. N. Taranto, “A Real-Time Voltage Instability Risk Indicator Based on Local Phasor Measurements – Part I: The Identification Algorithm,” submitted to the *IEEE Transactions on Power Systems.*

[6] S. Corsi and G. N. Taranto, “Voltage Instability – the Different Shapes of the “Nose”, accepted for presentation in the *Bulk Power Systems Dynamics and Control VII*, IREP Conference, Charleston, South Carolina, August 2007.

[7] S. Corsi and M. Pozzi, “A Real-Time EHV Bus-Bar Indicator of Local Voltage Instability”, *IFAC Symposium on Power Plants and Power Systems Control*, Calgary, Canada, June 2006.

[8] E.Cima, B. Cova, R. Marconato, G. Salvadori, R. Salvati, P. Scarpellini: “A Powerful Simulator for Investigating Severe Dynamic Phenomena During System Major Distarbance”, Paper No. 38-305, *CIGRE Session,* Paris, August 1996.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Dr. Sandro Corsi
Doutorado (1973): Politécnico de Milano, Itália
Empresa: Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano, CESI – Milão, Itália.

Prof. Glauco Nery Taranto
Pós-doutorado (2006): CESI, Itália; Doutorado (1994): RPI, Estados Unidos; Mestrado (1991): PUC-RJ e Graduação (1988) em Engenharia Elétrica: UERJ, Rio de Janeiro
Empresa: Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ.