XV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

GAT / 07

17 a 22 de Outubro de 1999
Foz do Iguaçu – Paraná - Brasil

GRUPO IV
GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA (GAT)

IDENTIFICAÇÃO DE RAMOS CRÍTICOS PARA ESTABILIDADE TENSÃO BASEADA NA ANÁLISE MODAL DO SISTEMA

Ariovaldo V. Garcia* Madson Côrtes de Almeida*

UNICAMP-FEEC-DSEE

RESUMO

Neste trabalho, apresenta-se um método capaz de identificar ramos críticos para a estabilidade de tensão do sistema, através da análise modal da matriz de sensibilidades entre a injeção de potência reativa e a magnitude da tensão nas barras de carga. A matriz de sensibilidades utilizada é obtida do Modelo de Acoplamentos Implícitos desenvolvido por J. Carpentier, no qual mantêm-se fixos os fluxos de potência ativa nos bipolos da rede. A grande vantagem deste modelo é que ele mantém a esparsidade das matrizes envolvidas. Assim, a obtenção de autovalores e autovetores é realizada de maneira muito mais rápida e eficiente, tornando viável a utilização do método no controle em tempo-real, sendo uma ferramenta importante na prevenção do colapso de tensão em redes complexas. Foram realizados testes com os sistemas IEEE-30, IEEE-118, e ainda, com sistemas reais brasileiros, a partir dos quais comprovou-se o bom comportamento do método na avaliação da estabilidade, bem como, o baixo custo computacional envolvido. Alguns resultados para o sistema IEEE-30 e para alguns sistemas reais brasileiros são apresentados.

PALAVRAS-CHAVE

Estabilidade de Tensão, Colapso de Tensão, Análise Modal, Acoplamento Implícito (CRIC).

1.0 – INTRODUÇÃO

Atualmente, o fenômeno da Instabilidade de Tensão vem recebendo cada vez mais uma maior atenção e é apontado como uma das maiores fontes de insegurança dos modernos Sistemas de Energia Elétrica [6]. Por isso, tem-se dispensado grandes esforços para compreensão dos mecanismos pelos quais um sistema torna-se instável com relação a tensão, bem como, na busca de soluções e estratégias capazes de prevenir tal problema.

A Instabilidade de Tensão é um fenômeno puramente dinâmico. No entanto, reconhece-se que simulações dinâmicas não fornecem informações sobre sensibilidade e grau de estabilidade, além de exigirem elevados tempos de processamento e análise dos resultados [1]. Assim, as simulações dinâmicas estão limitadas a investigação de situações específicas, incluindo instabilidades de tensão rápidas e transitórias, e coordenação da proteção e controle. A grande maioria dos métodos apresentados na literatura são estáticos e provêem resultados razoavelmente exatos e extremamente rápidos, quando comparados às análises dinâmicas. Kundur e colaboradores [8] compararam resultados de análises estáticas e dinâmicas, e concluíram que os resultados destas análises são consistentes desde que se utilizem os modelos adequados para os componentes chave do sistema, como as cargas, os OLTCs e os limitadores de corrente de excitação dos geradores.

Apresenta-se neste trabalho uma abordagem estática para detecção e prevenção do problema da estabilidade de tensão, baseada na análise dos autovalores e autovetores da matriz de sensibilidades entre a injeção de potência reativa e o módulo da tensão nas barras de carga do sistema. Esta matriz é obtida a partir das equações do modelo de Acoplamentos Implícitos (CRIC-Constrained Reactive Implicit Coupling) desenvolvidas por J. Carpentier [4]. O modelo de Carpentier é obtido a partir de uma solução do fluxo de carga. Ao contrário das matrizes de sensibilidade vistas na literatura, como o Jacobiano Reduzido [1], a matriz

* Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP/FEEC/DSEE
Caixa Postal 6101 - CEP 13.081.970 - São Paulo – SP
Tel.: (019) 788-3708, ramal 73725 – e-mail: ari@dsee.fee.unicamp.br

aqui utilizada mantém a esparsidade característica das matrizes envolvidas na solução do fluxo de carga, tornando o método mais eficiente, além de manter um bom compromisso com a exatidão [6], viabilizando a utilização do método nas aplicações em tempo real .

Dada a matriz de sensibilidades, inicialmente obtém-se 3 ou 4 dos menores autovalores e os respectivos autovetores à direita da matriz de sensibilidades. A magnitude dos autovalores fornecem uma medida relativa da proximidade da instabilidade. A partir dos autovetores, obtém-se informações relativas ao mecanismo da perda da estabilidade de tensão e fatores de participação para os ramos, com os quais é possível determinar ações corretivas em termos de redistribuição de fluxo de carga para aliviar o carregamento nos ramos, além de critérios para seleção de contingências. Os aspectos não-lineares dos geradores e seus controles, os tap's de transformadores e os demais dispositivos de controle de tensão, devem ser detalhadamente incluídos no modelo, já que o comportamento desses componentes, mudam drasticamente quando seus limites de operação são encontrados, o que implica em drásticas mudanças nos autovalores monitorados. Além disso, os modelos das cargas variáveis com a tensão pode ser acrescentados, principalmente nas regiões críticas do sistema[7].

Um aspecto não tratado neste trabalho, são os transitórios provocados por contingências ou por incrementos repentinos na carga do sistema. Assume-se que estes casos não pertencem ao escopo da estabilidade de tensão, mas sim da estabilidade de ângulo. Dessa forma, avaliando-se a estabilidade do sistema com o método proposto, antes e após uma contingência, pode-se concluir que ele é estável, quando na verdade o transitório provocado pela contingência levará o sistema à instabilidade.

2.0 – MATRIZES DE SENSIBILIDADE QV

A estabilidade de tensão é afetada tanto pela potência ativa, quanto pela potência reativa. Todavia, a cada ponto de operação, é possível reduzir as matrizes envolvidas e avaliar-se a estabilidade de tensão comparando-se apenas o relacionamento entre a potência reativa e a tensão em cada barra [1]. Isto é análogo a uso das curvas QV. Com isso, eliminam-se a potência ativa e a parte do ângulo das equações de regime permanente do sistema e estuda-se apenas o problema do suprimento da demanda reativa, ao mesmo tempo em que se minimiza o esforço computacional envolvido.

Nas discussões vistas em [1] fica claro que conforme o sistema vai-se aproximando do ponto de colapso, os acoplamentos entre as potências ativa e reativa, bem como entre a tensão e o ângulo tornam-se maiores, daí a necessidade de se usar técnicas de redução que contemplem estes relacionamentos. Portanto, usar simplesmente a sub-matriz L do jacobiano do fluxo de carga seria uma estratégia incoerente.

2.1 – O Jacobiano Reduzido

Usando uma linearização das equações de regime permanente do sistema, equações (1), as sensibilidades entre a Potência Reativa e Tensão serão obtidas a partir da matriz jacobiana do fluxo de carga.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \tag{1}$$

onde :
ΔP = Incremento na injeção de potência ativa.
ΔQ = Incremento na injeção de potência reativa.
$\Delta \theta$ = Incremento no ângulo da tensão da barra.
ΔV = Incremento na magnitude da tensão da barra.

Par tal, basta fazer com que as injeções de potência ativa nas barras do sistema sejam constantes, ou fazer os incrementos nas injeções de potência ativa nas barras sejam nulos. Assim fazendo $\Delta P = 0$, tem-se :

$$\Delta Q = [L - M.H^{-1}.N].\ \Delta V = J_R\ .\ \Delta V \tag{2}$$

e portanto,

$$J_R = [L - M.H^{-1}.N] \tag{3}$$

J_R é a chamada matriz jacobiana reduzida do sistema, que relaciona diretamente, a magnitude da tensão na barra com sua injeção de potência reativa. Esta matriz não preserva a esparsidade característica das matrizes envolvidas na resolução das equações de regime permanente do fluxo de carga.

2.2 – O Acoplamento Implícito - CRIC

Para obter a matriz de sensibilidades QV pelo modelo Implicitamente Acoplado, ao invés de se fazer diretamente $\Delta P = 0$, utiliza-se o seguinte artificio: mantém-se constantes os fluxos de potência ativa (P_{km}) nos bipolos da rede, garantindo que as injeções de potência ativa nas barras do sistema estarão fixas. Na verdade, esse artificio impõe uma restrição maior que aquela usada na obtenção de J_R . Assim, fazendo P_{km} constante na equação do fluxo de potência ativa do bipolo, gera-se uma expressão para as aberturas angulares, equação (4), que é função só das tensões nas barras terminas do bipolo.

$$S_{km} = \operatorname{sen}\beta = \frac{P_{km} - a_{km}^2 . Y_{km} . V_k^2 . \operatorname{sen}\alpha_{km}}{a_{km} . a_{mk} . Y . V_k . V_m} \qquad (4)$$

Substituindo a equação (4), na equação da injeção de potência reativa, tem-se a equação da injeção de potência reativa na barra, em função do vetor de tensões, equação (5).

$$Q_{km} = V_k (V_k . \eta_k - \sum_{m \neq k} a_{km} . a_{mk} . Y_{km} . \cos\beta . V_m) \qquad (5)$$

$$\text{com :} \quad \eta_k = \sum_{m \neq k} a_{km}^2 (Y_{km} . \cos\alpha_{km} - b_{km}^{sh}) - b_k^{sh}$$

Tomando agora as derivadas parciais da potência reativa com relação as tensões, obtém-se as sensibilidades desejadas.

$$L_{Ckk} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = 2 . V_k . \eta_k - \sum_{k \neq m} a_{km} . a_{mk} . Y_{km} . \left[\frac{V_m + 2 . V_k . S_{km} . (a_{km} / a_{mk}) . a_{km}}{\cos\beta} \right] \qquad (6)$$

e

$$L_{Ckm} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} = \frac{-a_{km} . a_{mk} . Y_{km} . V_k}{\cos\beta} \qquad (7)$$

onde :
$\beta = \theta_{km} - \alpha_{km}$.
Y_{km} = admitância do bipolo.
α_{km} = ângulo das perdas do bipolo.
a_{km} , a_{mk} = taps dos trafos dos lados k e m do bipolo.
b_{km}^{sh} = shunt da linha km.
b_k^{sh} = shunt da barra k.
V_k , V_m = tensão nas barras k e m do bipolo.
θ_k , θ_m = ângulo das tensões nas barras k e m .

Das equações (6) e (7), substituindo-se os parâmetros da rede e o estado do sistema obtém-se a matriz de sensibilidades. Comparando estas equações com a equação (3), vê-se que a obtenção de L_C é muito mais simples que a de J_R , já que não envolve manipulações matriciais. Além disso, a matriz L_C , ao contrário de J_r , é altamente esparsa, tem a mesma estrutura da matriz L - equação (1), sendo simétrica em estrutura, mas não em valores.

3.0 – MODOS DE ESTABILIDADE

Do ponto de vista da análise modal, um sistema é dito estável numa certa condição de operação se, para todas as barras desse sistema, a magnitude da tensão em uma dada barra aumentar, após aumento em sua injeção de potência reativa. Ao contrário, um sistema é dito instável, se para ao menos uma de suas barras, a tensão diminuir ao aumentarmos a sua injeção de potência reativa. De outra forma, um sistema é dito estável se a sensibilidade VQ for positiva em todas as suas barras e instável se esta sensibilidade for negativa em pelo menos uma barra[1].

Similar ao conceito usado na análise dinâmica de sistemas lineares, cada autovalor λ_i, juntamente com os respectivos autovetores a esquerda, e_i, e a direita, d_i, definem o i-ésimo modo de estabilidade do sistema.

Na formação das matrizes de sensibilidade, é importante notar que as barras de tensão fixa não têm sua injeção de potência reativa especificada, e portanto, não se obtém incrementos de potência reativa para elas. Assim, nas matrizes de sensibilidade, as linhas e as colunas correspondentes a estas barras serão nulas e dos n (número de barras) autovalores gerados, têm-se npq (número de barras PQ) Modos de Estabilidade a serem considerados.

A matriz $L_C \in \Re^{n \times n}$ e contém as sensibilidades Q e V. Relacionando esta matriz com os vetores de incrementos da potência reativa e do módulo da tensão, tem-se:

$$\Delta V = L_C^{-1} . \Delta Q \qquad (8)$$

Decompondo L_C em $L_C = D . \Sigma . E$, sendo que:

D = Matriz de autovetores a direita de L_C.
E = Matriz de autovetores a esquerda de L_C.
Σ = Matriz diagonal dos autovalores de L_C.

e sabendo que $D = E^{-1}$, chega-se a $L_C^{-1} = D . \Sigma^{-1} . E$, e portanto,

$$\Delta V = D . \Sigma^{-1} . E . \Delta Q \qquad (9)$$

Pré-multiplicando a equação (9) por E, tem-se:

$$E . \Delta V = \Sigma^{-1} . E . \Delta Q \qquad (10)$$

Rescrevendo esta equação obtém-se a forma:

$$\Delta v = \Sigma^{-1} . \Delta q \qquad (11)$$

onde Δv (= E . ΔV) é o vetor de tensões modais e Δq (= E . ΔQ) é o vetor de injeções reativas modais. Estes novos vetores têm as mesmas unidades dos anteriores e são uma combinação linear das tensões e injeções físicas atuais.

Escrevendo a equação (11) numa forma expandida:

$$\begin{bmatrix} \Delta v_1 \\ \Delta v_2 \\ \vdots \\ \Delta v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1^{-1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2^{-1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_n^{-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta q_1 \\ \Delta q_2 \\ \vdots \\ \Delta q_n \end{bmatrix} \qquad (12)$$

De (12) a i-ésima tensão modal se relaciona com a correspondente injeção modal por:

$$\Delta v_i = \frac{1}{\lambda_i} . \Delta q_i \qquad (13)$$

Nesta equação, a magnitude da tensão modal é amplificada por um fator igual ao inverso do autovalor λ_i . Se $\lambda_i \to 0$, nenhuma variação na injeção reativa será capaz de provocar uma variação infinita na tensão. Se $\lambda_i < 0$, qualquer Δq_i fará com que Δv_i seja negativo, o que implica em instabilidade do sistema. Logo, todos os autovalores de L_C devem ser positivos para que as tensões modais e consequentemente o sistema seja estável [1,5]. Vê-se ainda que, se a i-ésima tensão modal entrar em colapso, as demais tensões permanecerão insensíveis, uma vez que não existe acoplamento entre elas. Portanto, conclui-se que o colapso das tensões do sistema é o colapso de uma tensão modal. Isto é, o sistema não suporta uma particular combinação das cargas reativas [5].

4.0 – IDENTIFICAÇÃO DOS RAMOS CRÍTICOS

Considerando o autovalor λ_i de J_C existe um autovetor à direita desta matriz, d_i , que satisfaz:

$$J_C^{-1} . d_i = \lambda_i^{-1} . d_i \qquad (14)$$

Numa condição particular, assumindo que o k-ésimo elemento de d_i seja um incremento na potência reativa da k-ésima barra do sistema devido ao i-ésimo modo de estabilidade, tem-se:

$$J_C^{-1} . \Delta Q_{Mi} = \lambda_i^{-1} . \Delta Q_{Mi} \qquad (15)$$

Em ΔQ_{Mi} o índice $_{Mi}$ indica que a grandeza é de natureza modal e está associada ao i-ésimo modo. Assim, ΔQ_{Mik} será o k-ésimo elemento do vetor de injeções reativas incrementais referente ao modo i.

Substituindo $\Delta P = 0$ e ΔQ_{Mi} na equação (1), encontram-se vetores de tensões incrementais, ΔV_{Mi} , e de ângulos incrementais, $\Delta \theta_{Mi}$, relacionados ao i-ésimo modo.

Aplicando os dois primeiros termos da série de Taylor a equação das perdas reativas no j-ésimo ramo, Ql_j , e considerando o i-ésimo modo, têm-se que a variação linearizada das perdas reativas neste ramo com relação ao i-ésimo modo é:

$$\begin{aligned} \Delta Ql_{ji} = {} & \frac{\partial Ql_j}{\partial V_k} \cdot \Delta V_{Mik} + \frac{\partial Ql_j}{\partial V_m} \cdot \Delta V_{Mim} + \\ & \frac{\partial Ql_j}{\partial \theta_k} \cdot \Delta \theta_{Mik} + \frac{\partial Ql_j}{\partial \theta_m} \cdot \Delta \theta_{Mim} \end{aligned} \qquad (16)$$

Assim, define-se que o fator de participação do ramo j com relação ao i-ésimo modo é:

$$Pr_{ji} = \frac{\Delta Ql_{ji}}{\Delta Ql_{max\,i}} \qquad (17)$$

onde ΔQl_{maxi} é a maior das ΔQl_{ji} dentro do modo i.

Para identificar os ramos críticos para a estabilidade do sistema, obtém-se fatores de participação dos ramos para cada um dos modos mais críticos. Esse fatores de participação indicam quais ramos consomem mais potência reativa para uma variação incremental na carga reativa. Ramos com altos fatores de participação determinam a fraqueza do modo a que eles pertencem. Analisando os fatores de participação dos ramos, é possível obter informações como ações corretivas para uma redistribuição dos fluxos de potência visando aliviar o carregamento nos ramos e ainda critérios para seleção de contingências, além de identificar as áreas propícias a instabilidade de tensão.

5.0 – IDENTIFICAÇÃO DOS MODOS CRÍTICOS

Na identificação dos modos mais propícios à instabilidade não basta apenas selecionar o modo com menor autovalor, já que após uma contingência ou uma variação nas cargas, um autovalor que não é o menor pode tornar-se o mais crítico. Assim, no contexto da operação, em [1,5] afirma-se que é razoável utilizar-se três ou quatro dos menores autovalores. No contexto do planejamento, as análises devem ser realizadas com o sistema estressado, ou seja, numa condição de carregamento muito próxima do colapso de tensão [5,6]. Ressalta-se que no ponto de colapso não haverá uma solução para o fluxo de carga, já que a matriz jacobiana é singular. Na literatura utilizam-se fluxos de carga baseados no Método da Continuação, com o qual é possível obter soluções para pontos muito próximos do ponto máximo carregamento do sistema [9]. Em [5] apresenta-se uma metodologia interessante para a determinação dos modos críticos.

6.0 – CÁLCULO DOS AUTOVALORES E AUTOVETORES

Na escolha do método para obtenção dos autovalores e autovetores da matriz L_C, deve-se levar em conta que somente alguns poucos pares (autovalor/autovetor) são necessários e que a matriz apresenta um elevado grau de esparsidade. Assim, optou-se por usar o Método da Potência na determinação dos autovalores, em conjunto com a Iteração Inversa para determinação dos autovetores. Dessa forma, é possível obter os pares de interesse, além de se poder explorar a esparsidade inerente à matriz, viabilizando assim, a utilização do software em tempo real.

7.0 – RESULTADOS E COMPARAÇÕES

Foram realizados testes com vários sistemas em diversas condições de carregamento, porém serão apresentados somente testes realizados com o sistema IEEE-30 e com sistemas reais brasileiros. Inicialmente, apresentam-se nas tabelas 1 e 2 os autovalores e os respectivos fatores de participação para os três modos mais críticos do sistema IEEE-30. Estes resultados foram obtidos para as matrizes J_R e L_C num ponto muito próximo do colapso de tensão. Para encontrar este ponto, incrementou-se a carga em pequenos degraus mantendo-se constante o seu fator de potência e analisou-se o sistema no ponto imediatamente anterior à divergência do fluxo de carga.

Na tabela 1 vê-se que os autovalores críticos são praticamente idênticos. Na tabela 2, os ramos mostrados são os cinco mais críticos (maiores fatores) do primeiro modo. Comparando os fatores de participação das duas matrizes para os três modos apresentados, verifica-se que eles são muito semelhantes, e portanto, produziriam a mesma lista de ramos críticos. Assim, afirma-se que a identificação de ramos críticos feita a partir da matriz L_C fornece os mesmos resultados da análise realizada a partir de J_R.

TABELA 1 – AUTOVALORES DE J_R E L_C

Autovalores	λ_1	λ_2	λ_3
J_r	0.1570	0.6404	1.0906
L_C	0.1704	0.6462	1.0910

TABELA 2 – FATORES DE PARTICIPAÇÃO

	J_R			L_C		
Ramos	modo 1	modo 2	modo 3	modo 1	modo 2	modo 3
01-02	0.4101	0.2335	0.0980	0.4277	0.1750	0.1368
09-10	0.2899	0.6963	0.3517	0.3054	0.6611	0.3591
04-12	0.3773	0.5527	0.2596	0.4126	0.5009	0.2930
27-28	1.0000	0.1747	0.1856	1.0000	0.2390	0.2446
27-30	0.4072	0.4162	0.8279	0.4173	0.4770	0.8651

No caso dos sistemas reais, optou-se por isolar os sistemas de FURNAS, da CEMIG de CELG, e então, a partir da matriz L_C, determinou-se os ramos críticos para cada sistema. Para isolar os sistema obteve-se o equivalente *ward-estendido*. O sistema utilizado para obtenção dos equivalentes foi o sistema *Sul-Sudeste* com carga pesada do mês de abril de 1997.

Inicialmente, obteve-se o equivalente do sistema FURNAS com 270 barras e 468 ramos. Na tabela 3 são apresentados os autovalores dos três modos mais propícios à instabilidade, além dos fatores de participação, nestes três modos, para os sete ramos mais críticos do primeiro modo.

TABELA 3 – MODOS CRÍTICOS DO SISTEMA FURNAS

Ramos		λ_1 =	λ_2 =	λ_3 =
Nó Inicial	Nó Final	0.3244	1.1343	1.1537
S.Mesa_230	Niquel_230	1.0000	0.0001	0.0008
S.Mesa_230	Porngat_138	0.6841	0.0010	0.0238
B.Sul_345	Corumb_345	0.5783	0.0231	0.5407
B.Alto_230	Niquel_230	0.5016	0.0015	0.0353
Bandeir_345	B.Sul_345	0.3400	00104	0.2481
Itumbiar_345	Bandeir_345	0.3220	0.0208	0.4785
B.Alto_230	Itapaci_230	0.3215	0.0005	0.0135

Da tabela 3, os ramos mais críticos do primeiro modo são aqueles com maiores fatores de participação. Assim, o ramo mais crítico do primeiro modo é o que conecta as barras S.Mesa_230 e Niquel_230. Para verificar esta informação, simulou-se a saída destes ramos. Na tabela 4 apresenta-se os autovalores relacionados aos três modos monitorados após a saída dos ramos críticos.

TABELA 4 – AUTOVALORES APÓS SAÍDA DOS RAMOS

Ramos		λ_1 =	λ_2 =	λ_3 =
Nó Inicial	Nó Final	0.3244	1.1343	1.1537
S.Mesa_230	Niquel_230	Instabilidade do Sistema		
S.Mesa_230	Poranga_138	Ilhamento		
B.Sul_345	Corumb_345	0.2441	1.1340	1.0952
B.Alto_230	Niquel_230	Ilhamento		
Bandeir_345	B.Sul_345	0.2909	1.1336	1.1384
Itumbiar_345	Bandeir_345	0.2849	1.1341	1.1105
B.Alto_230	Itapaci_230	Ilhamento		

A saída do ramo S.Mesa_230/Niquel_230 levou o sistema à instabilidade, onde um dos autovalores da matriz L_C tornou-se negativo. Neste caso, não se tem solução para o fluxo de carga, já que a matriz jacobiana do sistema tornou-se singular. A saída dos ramos S.Mesa_230/Poranga_138, B.Alto_230/Itapaci_230 e B.Alto_230/Niquel_230 criou ilhas no sistema, impossibilitando a solução do fluxo de carga e consequentemente a avaliação do efeito da saída destes ramos. Com a saída do ramo B.Sul_345/Corumb_345, os autovalores relacionados ao primeiro e terceiro modos decresceram, o que é razoável, já que os fatores de participação deste ramo nestes modos é significativo. Já o autovalor do segundo modo permaneceu idêntico, o que também é razoável, uma vez que fator de participação do ramo

B.Sul_345/Corumb_345 no segundo modo é desprezível. Portanto, ramos com altos fatores de participação, pertencentes a modos com pequenos autovalores, podem levar o sistema à instabilidade de tensão e ramos com fatores de participação desprezíveis não influenciam a estabilidade dos modos aos quais eles pertencem.

A tabela 5 contém os fatores de participação para os ramos mais críticos, em cada um dos três modos mais propícios a instabilidade do sistema equivalente CEMIG. Este sistema tem 155 barras e 228 ramos. Analisando os fatores de participação não é possível afirmar que o ramo Jaguara_500/Neves_500 é mais crítico para a estabilidade do sistema que o ramo Jaguara_500/Opreto2_500, uma vez que ambos são críticos para os dois primeiros modos. Para afirmar isto seria necessário simular a saída destes dois ramos. Portanto, com este método determina-se apenas um conjunto de ramos críticos, onde não é possível afirmar qual é o mais e o menos crítico destes ramos.

TABELA 5 – MODOS CRÍTICOS DO SISTEMA CEMIG

Ramos		λ_1 =	λ_2 =	λ_3 =
Nó Inicial	Nó Final	0.8155	1.1709	1.6626
Jaguara_500	Neves_500	1,0000	0,8313	0,5589
Jaguara_500	Opreto2_500	0,9700	1,0000	0,3115
Emborc_500	Sgotard_500	0,7371	0,2752	1,0000
Neves_500	Sgotard_500	0,6461	0,5766	0,1948
Mesquit_500	Neves_500	0,4928	0,5026	0,1186
Mclaros_345	Vpalma_345	0,4105	0,1077	0,5940
Tmarias_289	Tmaria_6MQ	0,3348	0,0756	0,03779
JaguaraFT_r	Jaguara_345	0,1263	0,0005	0,7349
Emborc_500	Emborc_138	0,0454	0,0168	0,7126

TABELA 6 – MODOS CRÍTICOS DO SISTEMA CELG

Ramos		λ_1 =	λ_2 =	λ_3 =
Nó Inicial	Nó Final	0.0910	0.2515	0.5985
Bandeir_230	Xavante_230	0,0354	0,3938	0,0102
B.Alto_230	Niquel_230	0,6583	0,0214	0,0247
S.Mesa_230	Niquel_230	1,0000	0,1080	0,0088
S.Mesa_138	Poranga_138	0,7316	0,1222	0,0175
Cdourad_230	Anhang_230	0,0464	0,3687	0,1037
Inhum_138IP	Firminop_138	0,0191	0,2840	0,3510
Xavante_138	Daia_138FC	0,0526	1,0000	1,0000
Firminop_138	Ipora_138	0,0228	0,3605	0,5074

Na tabela 6 estão os fatores de participação para o sistema da CELG, o qual contém 111 barras e 132 linhas. Observando as tabelas 6 e 4, vê-se que os ramos B.Alto_230/Niquel_230, S.Mesa_230/Niquel_230 e S.Mesa_230/Poranga_138 aparecem como críticos em ambas os sistemas. Estes ramos estão fronteira entre os sistemas FURNAS e CELG e a redundância observada confirma que tais ramos são realmente críticos, validando as informações extraídas do método.

8.0 – CONCLUSÕES

Neste artigo apresentou-se um método baseado na análise modal da matriz de sensibilidades entre a potência reativa e a tensão. Esta matriz foi obtida a partir das técnicas de Acoplamento Implícito desenvolvidas por J. Carpentier. O método mostrou-se bem comportado e eficiente na determinação de ramos críticos para a estabilidade tensão de sistema de grande porte. A grande dificuldade para implementação deste método é a determinação das rotinas mais adequados ao cálculo dos autovalores e autovetores de interesse, uma vez que nesta etapa é consumida a maior parte do tempo de processamento. A matriz de sensibilidades proposta, por ser esparsa, viabiliza a implementação de rotinas rápidas, tornando promissora a aplicação do método em tempo real.

Cada autovalor da matriz L_C corresponde a um modo de variação entre potência reativa e a tensão. A magnitude destes autovalores fornece uma medida entre o ponto de operação e a perda da estabilidade de tensão do sistema. Quanto menores forem os pequenos autovalores de um sistema, mais próximo ele estará da instabilidade de tensão. Ramos com altos fatores de participação para os modos críticos, determinam a fraqueza destes modos, e portanto, determinam a fraqueza do sistema. Destes fatores de participação é possível sugerir ações de controle e determinar quais contingências provocariam perda de estabilidade.

9.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] P. Kundur, B. Gao e G. K. Morisson, "Voltage Stability Evaluation Using Modal Analisys", *IEEE Trans. Power Systems*, 7(4):1529-1536, November 1992.

[2] H. W. Press, B. P. Flannery, A. S. Teukolsky, " Numerical Recipes in Fortran – The Art of Scientific Computation", Cambridge University Press, Second Edition, 1992.

[3] A. J. Monticelli, "Fluxo de Cara em Redes de Energia Elétrica", Editora Edgard Blücher Ltda, 1983

[4] J. L. Carpentier, "CRIC, a new reactive decoupling process in load flow, optimal power flow and system control", Proc. of IFAC Conf. on Power Syste and Power Plant Control, Beijing, PR China, pp: 65-70, Agust 1986.

[5] F. Alvarado e outros, "SVC Placement Using Critical Modes of Voltage Stabilty", *IEEE Trans. Power Systems*, 9(2):757-763, May 1994.

[6] T. Van Cutsem, "A Method to Compute Reactive Power Margin with respect to Volage Colapse", *IEEE Trans. Power Systems*, 6(1):145–156, February 1991.

[7] W. Xu, e Y. Mansour, "Volage Stability Analisys using Generic Load Model", *IEEE Trans. Power Systems*, 9(1):479–493, February 1994.

[8] P. Kundur, B. Gao e G. K. Morisson, "Voltage Stability Using Static and Dynamic Approaches", *IEEE Trans. Power Systems*, 8(3):1159-1171, August 1993.

[9] F. Alvarado e C. Cañizares "Point of Collpase and Continuation Methods for Large AC/DC Systems", *IEEE Trans. Power Systems*, 8(1):1-8, February 1993.