



GRUPO IV

GRUPO DE ESTUDOS DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA (GAT)

DETERMINAÇÃO DA COERÊNCIA ENTRE BARRAS DE CARGA: NOVOS CONCEITOS

Luís F. C. Alberto

Newton G. Bretas

EESC - USP

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho é estender o conceito de coerência, já existente para geradores, para barras de carga. Um método para a determinação das barras de carga coerentes, utilizando a matriz de impedância nodal Z_{bus} , é apresentado. Dentre as aplicações da metodologia proposta destacam-se o cálculo de frequências nas barras de carga a partir das frequências dos geradores e a determinação das áreas de controle de tensão nos estudos de colapso de tensão.

PALAVRAS-CHAVE

Coerência, Estabilidade, Sincronismo, Colapso de Tensão

1.0 INTRODUÇÃO

A identificação de máquinas coerentes é algo conhecido e utilizado há vários anos nas análises de estabilidade em sistemas de potência. Muitas técnicas, a maioria delas empíricas e baseadas na observação, foram desenvolvidas para a determinação das máquinas coerentes em um sistema de potência. O conhecimento das máquinas coerentes em um sistema pode auxiliar significativamente nas análises de estabilidade e facilitar a compreensão do comportamento do mesmo.

Neste trabalho, estende-se a idéia de coerência, já existente para geradores, para as barras de carga. Assim como dois geradores são coerentes se estes se comportam dinamicamente de maneira similar, pode-se dizer num sentido mais amplo que duas barras de carga são coerentes se estas se comportam similarmente em termos de tensão e ângulo durante a dinâmica do sistema.

Os resultados de coerência entre as barras de carga podem ser utilizados em diversas aplicações dentre as quais destacam-se: cálculo da frequência nas barras de carga a partir do conhecimento da frequência dos geradores [1] e determinação das áreas de controle de tensão nas análises de colapso de tensão[3,6].

A informação da coerência entre barras de carga provém do conceito de acoplamento elétrico, o qual é introduzido neste trabalho. Define-se neste trabalho o conceito de acoplamento elétrico entre barras de carga e barras de geradores. A informação deste acoplamento elétrico é facilmente extraída da matriz de impedância nodal Z_{BUS} do sistema.

Para cada barra de carga k , define-se um vetor de acoplamento elétrico que define quantitativamente o efeito que cada gerador tem naquela barra de carga. Normalizando os vetores de acoplamento e efetuando-se produtos escalares entre os vetores correspondentes a duas barras de carga, obtém-se um número real entre 0 e 1 que é um índice de acoplamento entre estas barras de carga. Quanto mais próximo de 1 for este índice, mais coerentes são as barras de carga.

O processo de determinação de coerência entre barras de carga proposto neste trabalho é bastante rápido, pois este não requer simulações do sistema e nem cálculos complexos. Este foi concebido a partir de observações experimentais e sua formulação está baseada em considerações físicas o que o torna bastante atrativo. A eficácia da metodologia é mostrada utilizando-se para isto alguns sistemas de potência clássicos.

2.0 COERÊNCIA

A noção de coerência em sistemas de potência é bastante intuitiva. Este conceito surgiu inicialmente nas análises de estabilidade. Diz-se que dois geradores são coerentes se estes comportam-se dinamicamente de maneira semelhante, ou seja, se os ângulos de seus rotores oscilam de maneira semelhante. Matematicamente pode-se dizer que as máquinas i e j são coerentes se [7]

$$\mathbf{d}_i(t) - \mathbf{d}_j(t) \in [D_{ij} - \boldsymbol{\varepsilon}, D_{ij} + \boldsymbol{\varepsilon}] \text{ para } 0 \leq t \leq t_{\text{MAX}}$$

onde D_{ij} é uma constante e $\boldsymbol{\varepsilon}$ é a precisão exigida. Quando $\boldsymbol{\varepsilon}=0$ obtém-se a coerência perfeita entre os geradores. Obviamente a perfeição nunca é obtida nos modelos reais.

Classicamente a coerência entre geradores é determinada a partir de simulações no domínio do tempo. Os ângulos das máquinas são diretamente comparados e aquelas máquinas que possuem os ângulos próximos são consideradas coerentes. Uma outra alternativa de análise de coerência verifica os acoplamentos diretamente na matriz de estados do sistema linearizado. Uma terceira alternativa também bastante utilizada consiste em analisar os autovetores associados aos modos de oscilação do sistema. Máquinas coerentes devem possuir os mesmos modos de oscilação e com amplitudes semelhantes.

Neste trabalho estende-se o conceito de coerência, já existente para geradores, para as barras de carga. Diz-se que duas barras de carga são coerentes se estas se comportam de maneira similar em termos de módulo de tensão e ângulo de fase. Matematicamente diz-se que as barras de carga i e j são coerentes se

$$\begin{aligned} \mathbf{d}_i(t) - \mathbf{d}_j(t) &\in [D_{ij} - \boldsymbol{\varepsilon}, D_{ij} + \boldsymbol{\varepsilon}] \\ V_i(t) - V_j(t) &\in [T_{ij} - \boldsymbol{\varepsilon}, T_{ij} + \boldsymbol{\varepsilon}] \end{aligned} \text{ para } 0 \leq t \leq t_{\text{MAX}}$$

D_{ij} e T_{ij} são constantes, $\boldsymbol{\varepsilon}$ é a precisão exigida para o ângulo de fase e $\boldsymbol{\xi}$ é a precisão para o módulo da tensão.

Assim como a análise de coerência entre geradores é de extrema importância para as análises de estabilidade, a análise de coerência entre barras de carga é de extrema importância para os estudos de colapso de tensão. Nos estudos de colapso entretanto, definem-se áreas de controle de tensão que no fundo são constituídas por barras de carga coerentes.

3.0 MODELO DO SISTEMA

As equações diferenciais que descrevem o comportamento dinâmico do sistema podem ser obtidas através de uma análise de balanço de potência em cada gerador. Para um sistema de n máquinas,

desprezando-se qualquer tipo de amortecimento, tem-se :

$$M_i \frac{d^2 \mathbf{d}_i}{dt^2} = P_{mi} - P_{gi} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

onde M_i é a constante de inércia da máquina i , δ_i o ângulo do rotor da máquina i , P_{mi} a potência mecânica de entrada da máquina i e P_{gi} a potência elétrica de saída da máquina i .

Seja a rede de transmissão do sistema elétrico composta por $n+m$ barras das quais os primeiros n barramentos estão conectados aos geradores e as outras m barras possuem somente cargas conectadas.

Seja $V_i \angle \mathbf{j}_i$ o fasor de tensão da barra “ i ”, incluindo as barras externas dos geradores e $E_i \angle \mathbf{d}_i$ o fasor da f.e.m. do gerador “ i ”. Nas “ n ” barras internas dos geradores a expressão para a potência real gerada é:

$$P_{gi} = \frac{E_i V_i \text{sen}(\mathbf{d}_i - \mathbf{j}_i)}{x_{di}}$$

Para as barras externas do sistema pode-se escrever as seguintes equações algébricas que expressam o fluxo de potência na rede:

- Para as n barras externas dos geradores: ($i = 1, \dots, n$)

$$\begin{aligned} P_{Ci} &= \frac{|V_i||E_i|}{x_{di}} \text{sen}(\mathbf{j}_i - \mathbf{d}_i) + |V_i|^2 G_{ii} + \\ &+ \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n+m} |V_i||V_k||Y_{ik}| \cos(\mathbf{f}_{ik} - (\mathbf{j}_i - \mathbf{j}_k)) \\ Q_{Ci} &= -\frac{|V_i||E_i|}{x_{di}} \cos(\mathbf{j}_i - \mathbf{d}_i) - |V_i|^2 B_{ii} - \\ &- \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n+m} |V_i||V_k||Y_{ik}| \text{sen}(\mathbf{f}_{ik} - (\mathbf{j}_i - \mathbf{j}_k)) \end{aligned}$$

- Para as m barras de carga: ($i = n+1, \dots, n+m$)

$$\begin{aligned} P_{Ci} &= |V_i|^2 G_{ii} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n+m} |V_i||V_k||Y_{ik}| \cos(\mathbf{f}_{ik} - (\mathbf{j}_i - \mathbf{j}_k)) \\ Q_{Ci} &= -|V_i|^2 B_{ii} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n+m} |V_i||V_k||Y_{ik}| \text{sen}(\mathbf{f}_{ik} - (\mathbf{j}_i - \mathbf{j}_k)) \end{aligned}$$

onde Y_{ij} 's são os elementos da matriz admitância nodal do sistema de transmissão, $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} = |Y_{ij}| \angle \mathbf{f}_{ij}$, x_{di} é a reatância transitória do gerador “ i ” e P_{Ci} e Q_{Ci} são respectivamente as potências ativas e reativas injetadas pelas cargas na barra i .

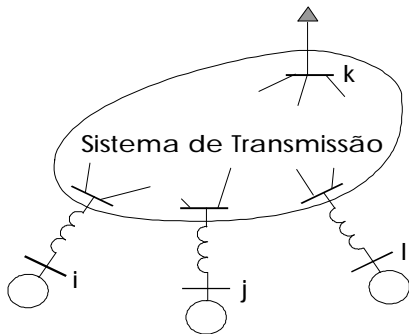


FIGURA 1 – Sistema de Potência

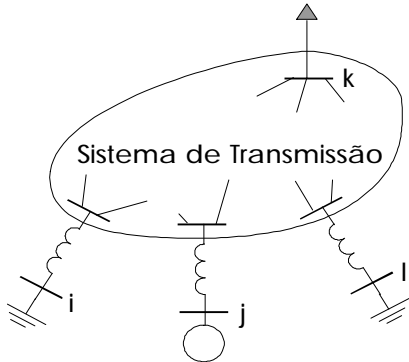


FIGURA 2 – Configuração do sistema para cálculo do acoplamento elétrico entre a barra de carga k e o gerador j

4.0 ACOPLAMENTO ELÉTRICO

A idéia fundamental por trás da técnica de análise de coerência entre barras de carga proposta neste artigo provém do conceito de acoplamento elétrico, o qual é introduzido neste trabalho. Intuitivamente pode-se concluir que duas barras de carga (estáticas) coerentes devem estar eletricamente acopladas aos mesmos geradores de maneira semelhante, ou seja, as dinâmicas destas barras devem ser regidas pelos mesmos geradores de forma similar. Propõe-se neste trabalho a obtenção da informação do acoplamento elétrico entre barras de carga e geradores através da matriz de impedância nodal Z_{BUS} .

Seja o sistema de potência da Figura 1. Deseja-se calcular o acoplamento elétrico entre a barra de carga k e o gerador j. Para isto, todas as barras das f.e.m's de todos os geradores são curto-circuitadas exceto a f.e.m do gerador j conforme mostrado na Figura 2. Com esta configuração calcula-se o acoplamento elétrico entre a barra de carga k e o gerador j através da seguinte equação:

$$C(j,k) = |z_j(k,j)/z_j(j,j)|$$

Onde $z_j(k,l)$ é o elemento (k,l) da matriz Z_{bus} na qual apenas o gerador j não foi curto-circuitado e as cargas

foram inseridas na matriz por uma impedância equivalente determinada pela expressão:

$$P_k = P_{k0} \left(\frac{|V_k|}{|V_{k0}|} \right)^2$$

Faz-se isto para cada gerador e obtém-se um *vetor de acoplamentos* da barra de carga k com cada um dos geradores do sistema, ou seja,

$$C_k = [C(1,k), C(2,k), \dots, C(j,k), \dots, C(n,k)]^T$$

O vetor C_k informa quais são os geradores mais influente na determinação da dinâmica da barra de carga k. Calculando-se os vetores de acoplamento para todas as barras de carga obtém-se uma matriz C composta por vetores de acoplamento, ou seja,

$$C = [C_1 \quad \dots \quad C_m]$$

A matriz C será denominada matriz de acoplamentos entre as barras de carga e os geradores.

4.0 COERÊNCIA ENTRE BARRAS DE CARGA

Com o cálculo da matriz de acoplamento elétrico entre as barras de carga e os geradores, pode-se determinar a coerência entre as barras de carga. Duas barras de carga são coerentes se estas são influenciadas de maneira semelhante pelos mesmos geradores. Matematicamente, podemos dizer que se duas barras são coerentes, então os vetores de acoplamento correspondentes a estas barras devem apontar aproximadamente na mesma direção. Do ponto de vista da coerência não é muito importante a magnitude dos vetores de acoplamento. Portanto é interessante normalizar-se os vetores de acoplamento e construir uma matriz de acoplamentos normalizada C_N .

Normalizando os vetores de acoplamento e efetuando-se produtos escalares entre os vetores correspondentes a duas barras de carga em análise, obtém-se um número real entre 0 e 1 que é um índice de acoplamento entre estas barras de carga. Quando este índice é próximo de 1, tem-se que os vetores de acoplamento destas barras de carga com os geradores possuem aproximadamente a mesma direção, o que significa que estas barras são regidas aproximadamente da mesma forma pelos mesmos geradores, indicando assim a coerência. Em outras palavras, estes vetores são quase que linearmente dependentes. Por outro lado, se este número é próximo de zero, então os vetores são aproximadamente perpendiculares, o que significa que as barras de carga são regidas por geradores diferentes, ou seja, os vetores são linearmente independentes. O processo de cálculo destes produtos escalares pode ser resumido ao seguinte produto de matrizes.

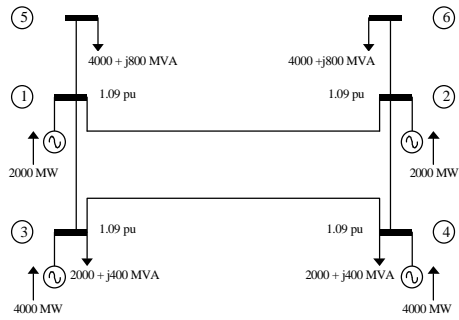


FIGURA 3 - Sistema de 6 barras e 4 geradores

$$W = C_N^T C_N$$

W será chamada de matriz de índices de coerência. O elemento (i,j) desta matriz será chamado de índice de coerência entre a barra de carga i e a barra de carga j .

Exemplo 1: Sistema de 6 barras e 4 geradores

O sistema de 6 barras e 4 geradores apresentado na Figura 3 possui 2 áreas bem determinadas. As linhas de transmissão 1-2 e 3-4 são linhas fracas que interligam as áreas. Calculando a matriz de acoplamento normalizada e a matriz de índices de coerência obtêm-se os resultados apresentados nas Tabelas 1 e 2 respectivamente. Observe na Tabela 2 que os índices de coerência entre as barras 1,3 e 5 são muito maiores do que os índices destas barras com as barras 2,4 e 6. O mesmo ocorre com as barras 2,4 e 6 que possuem índices de coerência elevados entre elas e baixos com as demais. Isto permite separar o sistema em duas áreas compostas por barras de carga coerentes.

A Tabela 1 por sua vez indica quais os geradores que são mais importantes na determinação da dinâmica de cada uma das áreas. Cada linha i desta matriz corresponde ao vetor de acoplamentos entre a barra de carga i com os geradores. Observe que as barras 1, 3 e 5 estão mais fortemente acopladas com os geradores 1 e 3 ao passo que as barras 2,4 e 6 estão mais fortemente acopladas com os geradores 4 e 6.

5.1 Barras de transição

Obviamente o exemplo 1 é um caso muito particular no qual pode-se identificar claramente a existência de duas áreas de controle. Na maioria dos casos esta separação clara entre as áreas não ocorre. Sendo assim fica às vezes difícil de dizer se uma barra pertence à uma área ou à outra. Com o intuito de evitar este problema cria-se o conceito de barra de transição. Uma barra de transição caracteriza-se por não pertencer à nenhuma área de controle. Esta em geral separa duas áreas distintas.

TABELA 1 – Matriz de acoplamentos normalizada

		Geradores			
	1	2	3	4	
1	0.8905	0.0039	0.4543	0.0234	
2	0.0024	0.9635	0.0057	0.2677	
3	0.0164	0.0085	0.9169	0.0469	
4	0.0093	0.1832	0.0214	0.9828	
5	0.8907	0.0041	0.4540	0.0228	
6	0.0025	0.9633	0.0061	0.2682	

TABELA 2 – Matriz de Índices de Coerência

	1	2	3	4	5	6
1	1	0,0147	0,7706	0,0416	1,0000	0,0149
2	0,0147	1	0,0272	0,4398	0,0152	1,0000
3	0,7706	0,0272	1	0,0710	0,7704	0,0273
4	0,0416	0,4398	0,0710	1	0,0416	0,4404
5	1,0000	0,0152	0,7704	0,0416	1	0,0153
6	0,0149	1,0000	0,0273	0,4404	0,0153	1

Em seguida um algoritmo é proposto para determinar as áreas de controle compostas por barras de carga coerentes.

Algoritmo :

1. Número de áreas=0
2. Para um certo valor γ previamente definido, determina-se para cada barra i de carga ainda não classificada qual é o conjunto de barras j 's, também não classificadas, que estão fortemente acopladas com a barra i . Ou seja, $J_i = \{\text{barras } i\text{'s não classificadas} : W(i,j) > \gamma\}$.
3. Seleciona-se dentre as barras não-classificadas qual que possui o conjunto J com o maior número de elementos. Seja esta a barra k .
4. Incrementa-se o número de áreas: $NA = NA + 1$ e associa-se a barra k à área NA .
5. Para cada barra $l \in J_k$, verifica-se se $J_l \subset J_k$. Se isto for verdadeiro associa-se a barra l à área NA caso contrário a barra l é classificada como sendo uma barra de transição.
6. Se existirem barras ainda não classificadas retorna-se ao passo 2.

A determinação de áreas de controle compostas por barras de carga coerentes proposta anteriormente está bem definida no sentido de que para um dado sistema a separação em áreas de controle é realizada de forma única para cada γ fixado.

Exemplo 2: Sistema New England de 39 barras e 10 geradores

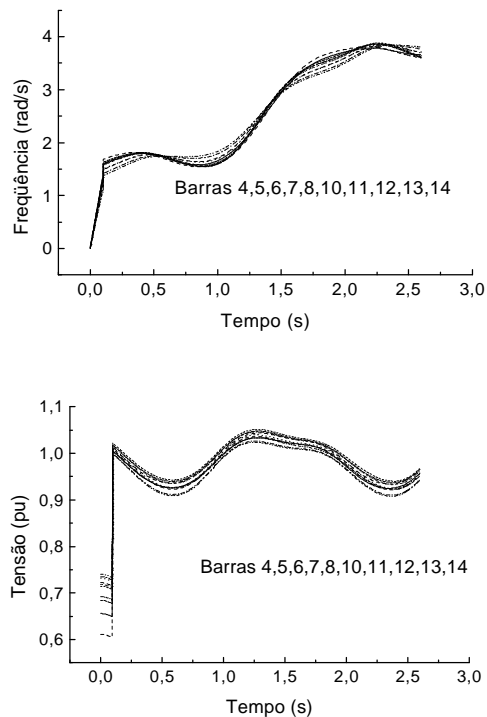


FIGURA 4 - Tensão e frequência das barras da área de controle 1 do sistema de 39 barras e 10 geradores após a ocorrência de uma perturbação

Testou-se a aplicabilidade desta metodologia no sistema New England de 39 barras e 10 geradores do IEEE. A Figura 6 mostra o sistema com as áreas de controle identificadas. Sete áreas de controle compostas por barras de carga coerentes foram identificadas utilizando-se $\gamma=0.97$. A área de controle mais significativa encontrada é composta por 10 barras de carga (4,5,6,7,8,10,11,12,13,14) conforme mostrado na Figura 6. Para simplificar a referência, denotar-se-á esta área por área de controle 1. As barras que não pertencem à nenhuma área foram classificadas ou como áreas compostas por uma única barra ou como sendo barras de transição.

As barras de carga contidas dentro de uma mesma área de controle são coerentes, logo, o comportamento destas é semelhante ao longo da dinâmica do sistema. Portanto, espera-se que tanto as frequências como as tensões sejam semelhantes nestas barras. Para comprovar isto, perturbou-se o sistema de 39 barras analisado anteriormente com um curto na barra 24. O curto foi eliminado em 0,1 segundos e as curvas de tensão e frequência correspondentes às barras da área de controle 1 estão apresentadas na Figura 4. Observa-se que de fato o comportamento das barras 4,5,6,7,8, 10,11,12,13 e 14, no que se refere à variação de tensão

e frequência, são muito semelhantes comprovando a eficácia da metodologia proposta

5.0 APLICAÇÕES

Dentre as aplicações para a metodologia de análise de coerência destaca-se a identificação das áreas de controle de tensão nos estudos de colapso de tensão.

No mesmo sistema de 39 barras do exemplo 2, incrementou-se a potência consumida pelas cargas na barra 7 até o momento da ocorrência do colapso de tensão. Verifica-se no gráfico da Figura 5 que as barras contidas dentro da área de controle 1 possuem um perfil de tensão mais baixo se comparado às demais barras do sistema. Portanto conclui-se que a análise de coerência nas condições normais de operação pode fornecer informações bastante significativas do comportamento do sistema durante o processo de colapso de tensão. Melhores resultados poderiam ter sido obtidos recalculando-se as áreas de controle para um nível de carga mais próximo do ponto de colapso. Resultados similares são obtidos quando incrementa-se a carga das outras barras pertencentes à área de controle 1.

6.0 CONCLUSÕES

Neste trabalho estendeu-se o conceito de coerência, já existente para geradores, para as barras de carga. Propôs-se um método de identificação das barras coerentes utilizando-se o conceito de acoplamento elétrico entre barras de carga e geradores. A metodologia assim proposta é bastante simples e não envolve grande quantidade de cálculos. Esta metodologia foi testada no sistema New England de 39 barras e 10 geradores. Os resultados obtidos mostram que a metodologia de análise de coerência e identificação de áreas de controle proposta neste trabalho são bastante eficazes.

7.0 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração do Eng. André Christóvão Pio Martins o qual realizou diversos testes de colapso de tensão para validar a metodologia proposta.

8.0 BIBLIOGRAFIA

(1) ALBERTO, L.F.C., BORELLI, J.R., BRETAS, N.G. Estimating the Frequencies of Load Buses and their effects on the critical clearing time, Proceedings of XII Brazilian Automatic Control Conference, pp 1197-1202, 1998

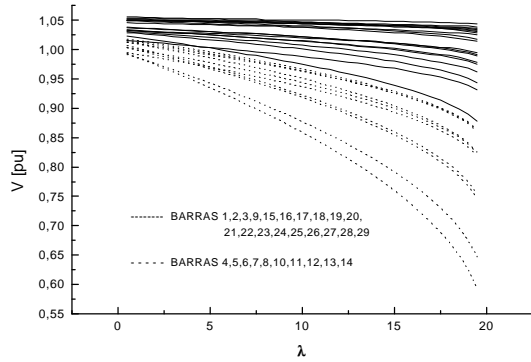


FIGURA 5 - Teste de colapso de tensão na área 1 (λ - parâmetro de incremento de carga)

(2) GACIC, N., ZECEVIC, A.I., SILJAK, D.D. Coherency recognition using epsilon decomposition, IEEE trans. on Power Systems, v.13, n.2, pp. 314-319, 1998

(3) NUHANOVIC, A., GLAVIC, M., PRLJACA, N. Validation of a clustering algorithm for voltage stability analysis on the Bosnian electric power system, IEE Proc. – Generation, Transmission and Distribution, v.145, n.1, pp 21-26, jan, 1998

(4) RAMASWAMY, G.N., EVRARD, C., VERGHESE, G.C., FILLATRE, O., LESIEUTRE, B.C. Extensions, simplifications, and tests of synchronic modal equivalencing (SME), IEEE Trans. on Power Systems, v.12, n.2, pp 896-905, 1997

(5) RAMASWAMY, G.N., ROUCO, L., FILLATRE,

O., VERGHESE, G.C., PANCIATICI, P. Synchronic modal equivalencing (SME) for structure-preserving dynamic equivalents, IEEE Trans. on Power Systems, v.11, n.1, pp 19-29, 1996

(6) SCHLUETER, R.A., HU, I., CHANG, M.W., LO, J.C., COSTI, A. Methods for determining proximity to voltage collapse, IEEE Trans. on Power Systems, v.6, n.1, fev., pp 285-292, 1991

(7) WANG, M-H., CHANG, H-C. Novel clustering method for coherency identification using an artificial neural network, IEEE Trans. on Power Systems, v.9, n.4, pp 2056-2062, 1994

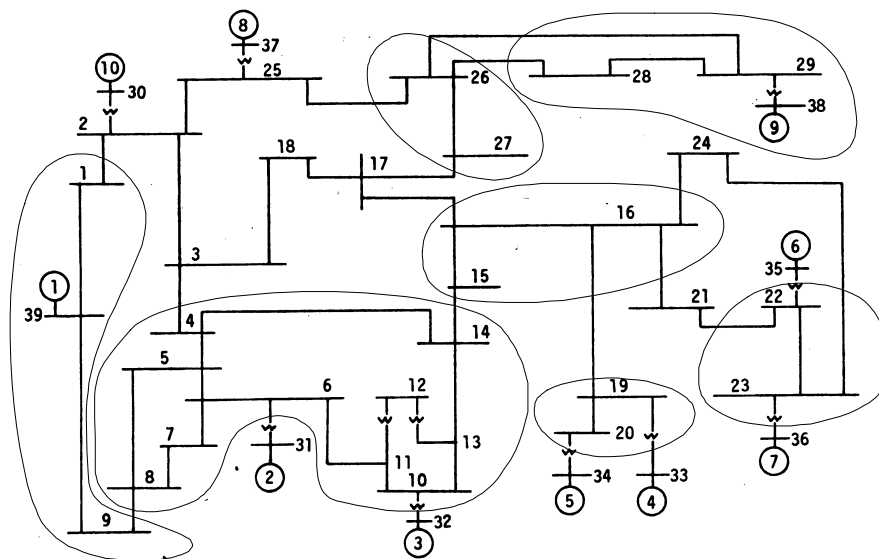


FIGURA 6 – Sistema New England de 39 barras e 10 geradores