

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA — FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

MÉTODO AUTOMÁTICO DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE
TRANSITÓRIA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA
CONSIDERANDO MODELOS DETALHADOS:
UM DESENVOLVIMENTO

Laurence Duarte Colvara

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia
de Ilha Solteira (UNESP) como parte dos
requisitos necessários ao concurso de Livre-
Docência na disciplina "Introdução a Sistemas
de Energia Elétrica", do Departamento de
Engenharia Elétrica.

Ilha Solteira, SP - Dezembro de 1995.

1210001020



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA - FACULDADE DE ENGENHARIA

Departamento de Engenharia Elétrica

Área de Sistemas de Energia Elétrica

**MÉTODO AUTOMÁTICO DE ANÁLISE DE
ESTABILIDADE TRANSITÓRIA
DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA
CONSIDERANDO MODELOS DETALHADOS:
UM DESENVOLVIMENTO**

Laurence Duarte Colvara

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP) como parte dos requisitos necessários ao concurso de Livre-Docência na disciplina "Introdução a Sistemas de Energia Elétrica", do Departamento de Engenharia Elétrica.

Dezembro de 1995.

BCpIS
FEIS-UNESP

SUMÁRIO

	Página
Capítulo I - INTRODUÇÃO	1
Capítulo II - REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA	4
II.1 - A Rede	4
II.2 - A máquina síncrona	4
II.3 - Os Reguladores.	6
II.3.1 - Regulador Automático de Tensão (RAT).	6
II.3.2.- Regulador de Velocidade.	6
II.4 - O Estabilizador de Sistema de Potência (ESP).	7
II.5 - O Sistema de Energia Elétrica	8
II.5.1 - Caso de uma máquina contra barra infinita (MBI).	8
II.5.2 - Caso de Sistema Multimáquinas (SM).	11
Capítulo III - FUNÇÃO DE LYAPUNOV (ENERGIA) PARA O SEE COM DISPOSITIVOS DE CONTROLE	18
III.1 - FUNÇÃO DE LYAPUNOV: SISTEMAS DE PERSIDSKII.	18
III.2 - FUNÇÃO DE LYAPUNOV PARA O SISTEMA MBI	20
III.3 - FUNÇÃO DE LYAPUNOV PARA O SISTEMA MULTIMÁQUINAS.	23
Capítulo IV - MÉTODO DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE PÓS-CONTINGÊNCIA	28
IV.1 - INTRODUÇÃO: RESULTADOS PRÉVIOS	28
IV.2 - MÉTODO DA RSP CONSIDERANDO A MÁQUINA SÍNCRONA COM ENROLAMENTO AMORTECEDOR DE EIXO EM QUADRATURA: o caso MBI	31
IV.2.1 - A Potência Elétrica	32
IV.2.2 - A Região de Sincronização Positiva (RSP)	33
IV.2.3 - O Teste de Estabilidade	35
IV.3 - MÉTODO DA RSP CONSIDERANDO A MÁQUINA SÍNCRONA COM ENROLAMENTO AMORTECEDOR DE EIXO EM QUADRATURA: o caso de Sistema Multimáquinas (SM)	37
IV.3.1 - A RSP e suas Fronteiras	37

BCpIS
FEIS-UNESP

IV.3.2 - A evolução da trajetória em relação às fronteiras da RSP.	39
IV.3.3 - Identificação dos pares críticos	41
IV.3.4 - Estabilidade na fronteira da RSP: aceleração relativa.	41
IV.3.5 - O algoritmo para o teste de estabilidade.	42
IV.3.6 - Conclusão	43
Capítulo V - EXEMPLO DE APLICAÇÃO	44
Capítulo VI - CONCLUSÃO	49

REFERÊNCIAS	51
-------------	----

Neste trabalho, apresenta-se uma abordagem de análise de transitoria de Sistemas de Energia Elétrica por método automático, incluindo modelos elaborados para representação do sistema, em continuidade a trabalhos anteriores que já trataram os Reguladores Automáticos de Tensão e de Velocidade.

O objetivo desta abordagem consiste em desenvolver a metodologia no sentido de melhor representar a própria máquina síncrona pela consideração, além do campo, de um enrolamento amortecedor no eixo em quadratura. Apresenta-se o desenvolvimento de uma Função de Lyapunov (energia) para este sistema e se amplia o conceito de Região de Sincronização Positiva (RSP) para incluir a melhoria do modelo.

Simulações de vários casos mostraram bom desempenho do método automático, resultando, invariavelmente, as conclusões idênticas às obtidas pelo método convencional (análise das curvas de oscilação).

RESUMO

Neste trabalho, apresenta-se uma abordagem de análise de estabilidade transitória de Sistemas de Energia Elétrica por método automático, incluindo modelos elaborados para representação do sistema, em continuidade a trabalhos anteriores que já trataram os Reguladores Automáticos de Tensão e de Velocidade.

O objetivo desta abordagem consiste em desenvolver a metodologia no sentido de melhor representar a própria máquina síncrona pela consideração, além do campo, de um enrolamento amortecedor no eixo em quadratura. Apresenta-se o desenvolvimento de uma Função de Lyapunov (energia) para este sistema e se amplia o conceito de Região de Sincronização Positiva (RSP) para incluir a melhoria do modelo.

Simulações de vários casos mostraram bom desempenho do método automático, resultando, invariavelmente, em conclusões idênticas às obtidas pelo método convencional (análise das curvas de oscilação).



Capítulo I

INTRODUÇÃO

ABSTRACT

An approach to the power system transient stability analysis with sophisticate system models by means of an automatic method is presented in this thesis, providing a continuation to previous works that considered Automatic Voltage Regulators and Velocity Regulators.

The main objective now concerns to improve the methodology in the sense of having a better representation of the synchronous machine itself, taking into account the effects of a quadrature-axis damper winding beyond the field effects. The derivation of a Lyapunov Function (energy) for this case is shown and the concept of Positive Synchronization Region is improved in order to include the new power system model taken into account.

In various test case simulations the automatic method have shown good performance, with agreement between its results and the ones given by the traditional method (visual analysis of the oscillation curves).

Diversos trabalhos foram realizados no sentido de melhorar o modelo considerado em estudos de estabilidade, pela inclusão do decaimento de fluxo, como KAKIMOTO, OSAMA e HAYASHI (1980), do Regulador Automático de Tensão, como MIYAGI (1984) e MIYAGI AND BERGEN (1985), embora ainda com certas limitações impostas pelo modelo (chamado de 1^o eixos, incluindo somente a dinâmica do campo na tensão interna da máquina). Estas limitações, devidas principalmente a dificuldades encontradas no desenvolvimento de uma Função de Lyapunov para o sistema foram contornadas em HSU e COLVARA (1987), COLVARA (1988), COLVARA E HSU (1988, 1990), e COLVARA (1992). Nestes últimos citados, desenvolveu-se o conceito de Região de Sincronização Positiva (RSP), onde o torque líquido se caracteriza como ação restauradora do equilíbrio e o comportamento do sistema é analisado com respeito às fronteiras desta região. Os efeitos do Regulador de Velocidade (RV) foram incluídos por LOURENÇO (1993) e LOURENÇO e COLVARA (1993), passando então a máquina

Capítulo I

INTRODUÇÃO

A análise de estabilidade de sistemas de potência tem merecido um considerável esforço de pesquisa, sendo que o estudo dos chamados métodos diretos, originários ou desenvolvidos do Segundo Método de Lyapunov (vide PAI, 1981; RIBBENS-PAVELLA and EVANS, 1983), conta já com mais de duas décadas havendo alcançado resultados importantes. A princípio, considerou-se a energia do sistema, limitando o chamado "Domínio de Estabilidade (DE)", pela condição mais restritiva possível que era adotar como valor máximo da energia no DE aquele calculado no ponto de equilíbrio instável de menor energia potencial. A evolução posterior caminhou no sentido de se dotar o método de mais informações, como a direção da trajetória do sistema - que não tem nenhum compromisso com o ponto de equilíbrio instável de mínima energia - e o ponto em que a mesma abandona o DE, que, afinal, nem é necessariamente um ponto de equilíbrio instável. Produzem-se, assim, resultados de alta qualidade para o sistema em estudo - em que as máquinas são dadas pelo modelo clássico. Entretanto, o mesmo não se verifica ao se considerar modelos mais elaborados, visto que o embasamento do método - calcado na conservatividade do sistema - não mais se aplica.

Os resultados obtidos com o modelo clássico, embora acurados nas abordagens mais atuais, são naturalmente limitados pelas imprecisões do modelo empregado, e, na realidade, devem ser tidos como estimativas do comportamento real do sistema. O refinamento ou a verificação da fidedignidade deve então ser realizada através de simulações do sistema empregando modelos mais elaborados. Neste sentido, é de interesse dispor-se de um método de análise que forneça imediatamente resultados confiáveis, ou seja, que prescindam de uma verificação posterior. Para isto, faz-se necessário considerar modelos sofisticados da máquina síncrona, assim como incluir os efeitos de seus reguladores e compensadores em uma metodologia automática de análise de estabilidade.

Diversos trabalhos foram realizados no sentido de melhorar o modelo considerado em estudos de estabilidade, pela inclusão do decaimento de fluxo, como KAKIMOTO, OSAWA e HAYASHI (1980), do Regulador Automático de Tensão, como MIYAGI (1984) e MIYAGI AND BERGEN (1985), embora ainda com certas limitações impostas pelo modelo (chamado de $1\frac{1}{2}$ eixos, incluindo somente a dinâmica do campo na tensão interna da máquina). Estas limitações, devidas principalmente a dificuldades encontradas no desenvolvimento de uma Função de Lyapunov para o sistema foram contornadas em HSU e COLVARA (1987), COLVARA (1988), COLVARA E HSU (1988,1990), e COLVARA (1992). Nestes últimos citados, desenvolveu-se o conceito de Região de Sincronização Positiva (RSP), onde o torque líquido se caracteriza como ação restauradora do equilíbrio e o comportamento do sistema é analisado com respeito às fronteiras desta região. Os efeitos do Regulador de Velocidade (RV) foram incluídos por LOURENÇO (1995) e LOURENÇO e COLVARA (1995), passando então a máquina



síncrona com os reguladores a ser representada por 8 variáveis de estado e considerando as fronteiras da RSP variantes sob a influência do RV.

No presente trabalho, avança-se no sentido de melhor representar a própria máquina síncrona, pela inclusão dos efeitos de um enrolamento amortecedor no eixo em quadratura. Com isto, além da melhoria da representação do amortecimento, têm-se a tensão interna da máquina representada com dinâmicas ao longo dos eixos direto e quadratura e eliminam-se as aproximações consideradas nas abordagens anteriores que incluíram o campo. A tensão atrás da reatância transitória de eixo direto (X'_d), E' , não mais é considerada igual ou proporcional a E'_q , a tensão gerada, assim como o ângulo entre E' e E'_q não mais é considerado constante (nem nulo, evidentemente).

Tomando-se um sistema de potência operando em regime permanente, define-se uma região em torno do ponto de equilíbrio estável tal que no seu interior o torque líquido da(s) máquina(s) síncronas se caracteriza como ação restaurativa do equilíbrio, denominando-a **Região de Sincronização Positiva (RSP)**. Analisa-se então o comportamento da trajetória após uma perturbação em relação às fronteiras desta região, concluindo-se pela estabilidade quando a trajetória evolui no sentido do interior da RSP e pela instabilidade quando uma fronteira é ultrapassada sendo a RSP definitivamente abandonada.

Sendo o teste de estabilidade da RSP consideravelmente envolvente, principalmente no caso de sistema multimáquinas quando se observa o comportamento de cada par de máquinas do sistema, é interessante poder-se discriminar dentre os numerosos pares aqueles que são mais afetados pela perturbação considerada para estudo detido, economizando o esforço que seria dedicado àqueles inexpressivos para o comportamento do sistema. Com este objetivo, e observando que o comportamento do sistema é "governado" pelo desempenho das máquinas (ou pares de máquinas) mais afetadas e presumindo, em decorrência, que o comportamento da energia transitória do sistema é de certo modo regido pelo comportamento da energia associada a essas máquinas supõe-se que os pares mais críticos são aqueles cuja energia potencial está mais próxima de máximo quando a energia potencial do sistema global passa por máximo. Este critério é empregado para escolher os pares a serem observados, e tem conduzido a resultados bastante razoáveis.

O trabalho é organizado nos capítulos que seguem da seguinte forma:

- o Capítulo II apresenta os modelos empregados para a representação do sistema de potência em estudo;
- no Capítulo III, apresenta-se sumariamente o desenvolvimento da FL empregada;
- no Capítulo IV desenvolve-se, com detalhes, a Região de Sincronização Positiva, suas fronteiras, e o teste de estabilidade. Inicialmente apresenta-se o caso de máquina contra barra infinita pois permite uma mais fácil

visualização dos conceitos empregados e, em sequência, desenvolve-se o estudo genérico de sistema multimáquinas.

- O Capítulo V mostra aplicações do método desenvolvido em vários casos considerados em um sistema exemplo.
- No Capítulo VI são apresentadas a conclusão do presente trabalho e são indicados os desenvolvimentos futuros do estudo.

máquinas síncronas, o Regulador Automático de Tensão (RAT), e o Regulador de Velocidade (RV). Finalmente, reunindo todos os elementos considerados neste estudo, têm-se uma representação bastante realista do sistema dinâmico considerado.

II.1 - A Rede.

Os elementos da rede, cuja dinâmica é de natureza eletromagnética com constantes de tempo em muito inferiores às do comportamento eletromecânico do sistema, e para os propósitos deste trabalho, considerada em regime permanente e expressa genericamente por

$$I = YE \quad (II.1)$$

onde I é o vetor das injeções de correntes de barra, E é o vetor das tensões de barra e

$$Y = G + jB \quad (II.2)$$

com G e B , respectivamente, as matrizes condutância e susceptância de barra.

II.2 - A máquina síncrona.

Os geradores, ou as máquinas síncronas, são, neste estudo, modelados por algumas vezes chamado "modelo de dois eixos", ou seja, de 4ª (quarta) ordem, visto que, além da dinâmica mecânica descrita pela posição angular (δ) e velocidade do eixo da máquina (ω), considera-se também a dinâmica do campo (eixo direto) e de um enrolamento amortecedor no eixo em quadratura, cujas variáveis de estado são, respectivamente, E_d e E_q . O diagrama fasorial apresentado na Figura 1 mostra as relações de tensões. As entradas do sistema são: potência mecânica (P_M) no eixo e tensão de excitação (E_{ex}) aplicada no circuito de campo. As equações de estado, então, são (vide KIMBARK, 1968)

$$\dot{\delta} = \omega$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M} [-D\omega + P_M - P_e]$$

$$(II.3)$$

Capítulo II

REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA

Neste capítulo, apresenta-se o modelo empregado para representar o Sistema de Energia Elétrica (SEE) em estudo: a rede, as máquinas síncronas, o Regulador Automático de Tensão (RAT), e o Regulador de Velocidade (RV). Finalmente, reunindo todos os elementos considerados neste estudo, têm-se uma representação bastante realista do sistema dinâmico considerado.

II.1 - A Rede.

Os elementos da rede, cuja dinâmica é de natureza eletromagnética com constantes de tempo em muito inferiores às do comportamento eletromecânico do sistema, é para os propósitos deste trabalho, considerada em regime permanente e expressa genericamente por

$$I = YE \quad (\text{II.1})$$

onde I é o vetor das injeções de correntes de barra, E é o vetor das tensões de barra e

$$Y = G + jB \quad (\text{II.2})$$

onde G e B , respectivamente, as matrizes condutância e susceptância de barra.

II.2 - A máquina síncrona.

Os geradores, ou as máquinas síncronas, são, neste estudo, modelados por algumas vezes chamado "modelo de dois eixos", ou seja, de 4ª (quarta) ordem, visto que, além da dinâmica mecânica descrita pela posição angular (δ) e velocidade do eixo da máquina (ω), considera-se também a dinâmica do campo (eixo direto) e de um enrolamento amortecedor no eixo em quadratura, cujas variáveis de estado são, respectivamente, E'_q e E'_d . O diagrama fasorial apresentado na Figura 1 mostra as relações de tensões. As entradas do sistema são: potência mecânica (P_M) no eixo e tensão de excitação (E_{fd}) aplicada no circuito de campo. As equações de estado, então, são (vide KIMBARK, 1968)

$$\dot{\delta} = \omega$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M} [-D\omega + P_M - P_e]$$

(II.3)

II.3 - Os Reguladores

$$T'_{do} \dot{E}'_q = -E'_q - (X_d - X'_d) i_d + E_{fd}$$

II.3.1 - Regulador Automático de Tensão (RAT)

$$T'_{qo} \dot{E}'_d = -E'_d + (X_q - X'_q) i_q$$

O RAT é representado por um bloco linear de primeira ordem, definido por um ganho K e constante de tempo T_r , o que é uma boa aproximação para a maioria dos casos. Em outro caso, pode ser obtido por redução de ordem, sendo o polo localizado na faixa de frequência de interesse, o que também é razoável. Assim,

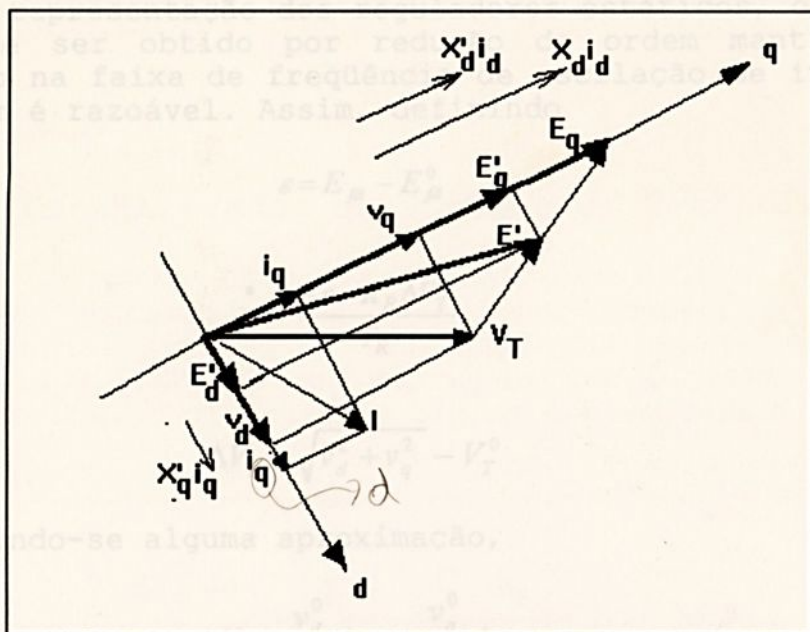


Figura 1 - Diagrama fasorial

onde M [s^2] é a constante de inércia, D [s] é a constante de amortecimento, X_d (X_q) é a reatância de eixo direto (quadratura), e T'_{do} (T'_{qo}) é a constante de circuito aberto de eixo direto (quadratura). A potência elétrica P_e entregue pela máquina é dada por

$$P_e = v_d i_d + v_q i_q \quad (\text{II.4})$$

e, sendo v_d e v_q as componentes de eixo direto e quadratura da tensão terminal da máquina dadas por

$$\begin{aligned} v_d &= E'_d + X'_q i_q \\ v_q &= E'_q - X'_d i_d \end{aligned} \quad (\text{II.5})$$

vem

$$P_e = E'_d i_d + E'_q i_q + (X'_q - X'_d) i_d i_q \quad (\text{II.6})$$

Se, adicionalmente, desconsiderar-se a saliência transitória, ou seja, considerar-se $X'_q \cong X'_d$, têm-se a potência elétrica dada por

$$P_e \cong E'_d i_d + E'_q i_q \quad (\text{II.7})$$

com o que se tem a representação da máquina síncrona.

II.3 - Os Reguladores.

II.3.1 - Regulador Automático de Tensão (RAT).

O RAT é representado por um bloco linear de primeira ordem, definido por um ganho K_R e constante de tempo T_R , o que é uma boa representação dos reguladores estáticos, ou, em outro caso, pode ser obtido por redução de ordem mantido o polo localizado na faixa de frequência de oscilação de interesse, o que também é razoável. Assim, definindo

$$\varepsilon = E_{fd} - E_{fd}^0 \quad (\text{II.8})$$

vem

$$\dot{\varepsilon} = \frac{-\varepsilon - K_R \Delta V_T}{T_R} \quad (\text{II.9})$$

com

$$\Delta V_T = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} - V_T^0 \quad (\text{II.10})$$

ou, admitindo-se alguma aproximação,

$$\Delta V_T \cong \frac{v_d^0}{V_T^0} \Delta v_d + \frac{v_q^0}{V_T^0} \Delta v_q \quad (\text{II.11})$$

onde as variações das componentes de eixo direto e quadratura da tensão terminal podem ser não lineares, bem como não são necessariamente "pequenas".

II.3.2.- Regulador de Velocidade.

O regulador de velocidade considerado é apresentado em diagrama de blocos na Figura 2 e adiante expresso em equações de estado.

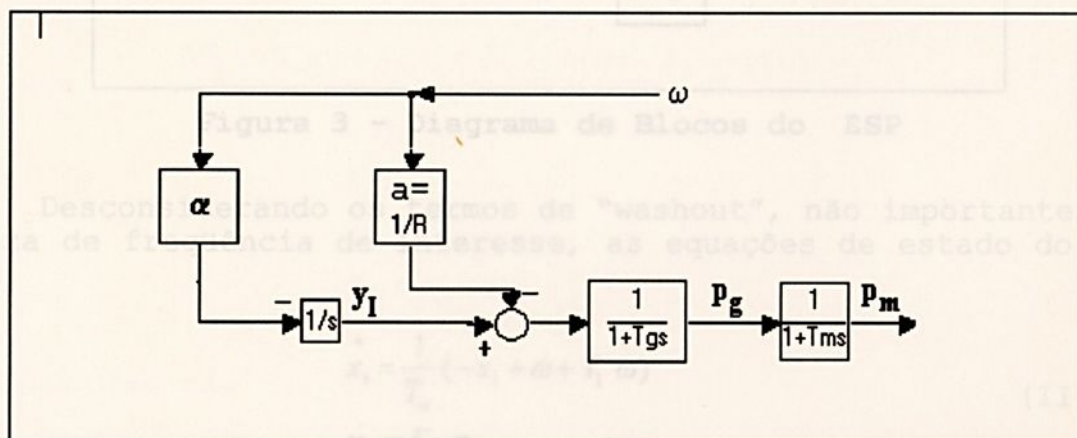


Figura 2 - Diagrama de blocos do Regulador de Velocidade

As equações relativas ao regulador de velocidade são

$$\dot{p}_g = \frac{-p_g - a\omega + y_I}{T_g} \quad (\text{II.12})$$

$$\dot{p}_m = \frac{-p_m + p_g}{T_m} \quad (\text{II.13})$$

$$\dot{y}_I = -\alpha\omega \quad (\text{II.14})$$

II.4 - O Estabilizador de Sistema de Potência (ESP).

O ESP é apresentado como ilustração, visto que não será explicitamente considerado nos desenvolvimentos posteriores neste trabalho. Incluem-se realimentações de velocidade e de potência ativa, podendo ser empregada uma ou outra ou as duas simultaneamente. O diagrama de blocos é apresentado a seguir.

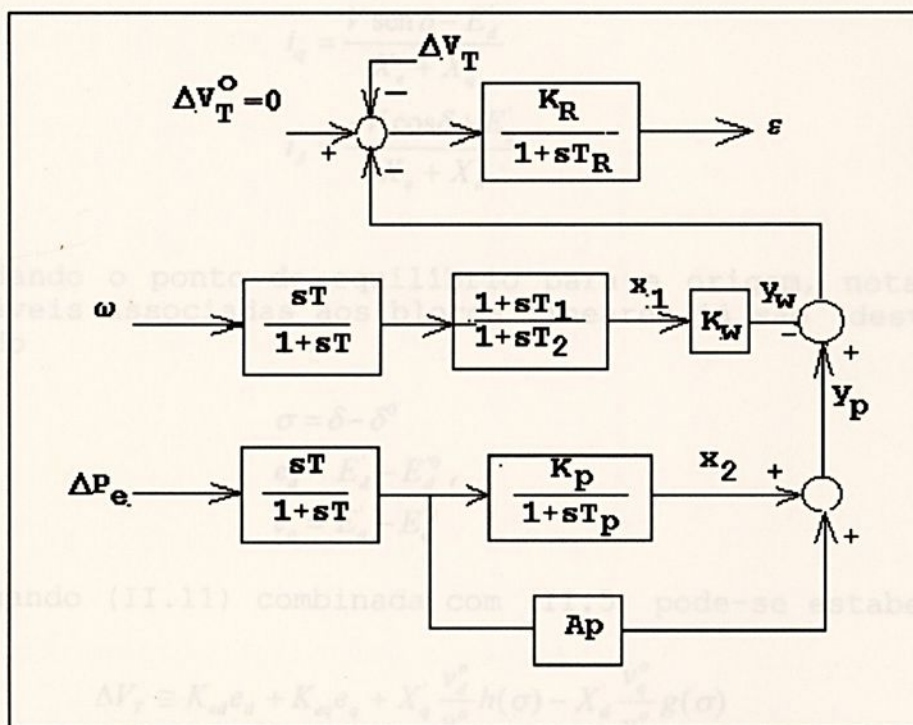


Figura 3 - Diagrama de Blocos do ESP

Desconsiderando os termos de "washout", não importantes na faixa de frequência de interesse, as equações de estado do ESP são

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{T_w} (-x_1 + \omega + T_1 \dot{\omega}) \quad (\text{II.15})$$

$$y_w = K_w x_1$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_2 &= \frac{1}{T_p}(-x_2 + K_p \Delta P_e) \\ y_p &= A_p \Delta P_e + x_2\end{aligned}\quad (\text{II.16})$$

II.5 - O Sistema de Energia Elétrica.

Reunindo agora os vários elementos anteriormente descritos isoladamente, têm-se o Sistema Elétrico de Potência. Apresenta-se a seguir, primeiramente, o caso de uma máquina operando contra uma barra infinita e posteriormente evolui-se para o sistema multimáquinas.

II.5.1 - Caso de uma máquina contra barra infinita (MBI).

Sendo δ a posição angular do rotor em relação à barra infinita, cuja tensão é V , sem dificuldades pode-se obter

$$\begin{aligned}i_q &= \frac{V \sin \delta - E'_d}{X_e + X'_q} \\ i_d &= \frac{-V \cos \delta + E'_q}{X_e + X'_d}\end{aligned}\quad (\text{II.17})$$

Transladando o ponto de equilíbrio para a origem, notando que as variáveis associadas aos blocos lineares já são "desvios", e definindo

$$\begin{aligned}\sigma &= \delta - \delta^0 \\ e_d &= E'_d - E_d^0, \\ e_q &= E'_q - E_q^0\end{aligned}\quad (\text{II.18})$$

e empregando (II.11) combinada com (II.5) pode-se estabelecer

$$\Delta V_T \cong K_{ed} e_d + K_{eq} e_q + X'_q \frac{v_d^0}{v_T^0} h(\sigma) - X'_d \frac{v_q^0}{v_T^0} g(\sigma) \quad (\text{II.19})$$

sendo

$$\begin{aligned}K_{ed} &= \frac{X_e}{X_e + X'_q} \frac{v_d^0}{V_T^0}; \\ K_{eq} &= \frac{X_e}{X_e + X'_d} \frac{v_q^0}{V_T^0}\end{aligned}\quad (\text{II.20})$$

e as funções não lineares

$$g(\sigma) = \frac{V}{X_e + X'_d} [-\cos(\sigma + \delta^0) + \cos \delta^0] \quad (\text{II.21})$$

$$h(\sigma) = \frac{V}{X_e + X'_q} [\sin(\sigma + \delta^\circ) - \sin \delta^\circ] \quad (\text{II.22})$$

A potência elétrica fornecida pela máquina, de (II.7), é dada por

$$P_e = \frac{E'_q V}{X_e + X'_d} \sin \delta - \frac{E'_d V}{X_e + X'_q} \cos \delta \quad (\text{II.23})$$

ou, em termos de desvio em relação ao valor de equilíbrio:

$$\begin{aligned} \Delta P_e &= f(\sigma, e_d, e_q) = \\ &= BV[(E_q'^0 + e_q) \sin(\sigma + \delta^\circ) - E_q'^0 \sin \delta^\circ - (E_d'^0 + e_d) \cos(\sigma + \delta^\circ) + E_d'^0 \cos \delta^\circ] \end{aligned} \quad (\text{II.24})$$

onde $B = (X_e + X'_d)^{-1} = (X_e + X'_q)^{-1}$.

Deste modo, escreve-se o SEE com reguladores de tensão e velocidade na forma dita de Persidskii generalizada (KASZKUREWICZ and HSU, 1979) como

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ \dot{\sigma} \\ \dot{e}_d \\ \dot{e}_q \\ \dot{\varepsilon} \\ \dot{p}_g \\ \dot{p}_m \\ \dot{y}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D}{M} & -\frac{1}{M} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{M} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\eta_{1d} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\eta_{1q} & \eta_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\eta_{5d} & -\eta_{5q} & -\eta_4 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{a}{T_g} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_g} & 0 & -\frac{1}{T_g} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_M} & -\frac{1}{T_M} & 0 \\ \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ f(\sigma, e_d, e_q) \\ e_d \\ e_q \\ \varepsilon \\ p_g \\ p_m \\ y_I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \eta_{2d} h(\sigma) \\ -\eta_{2q} g(\sigma) \\ \eta_6 g(\sigma) - \eta_7 h(\sigma) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

sendo os parâmetros definidos a seguir:

$$\begin{aligned} \eta_{1q} &= \frac{x_e + x_d}{x_e + x'_d} \frac{1}{T'_{d0}}; \quad \eta_{1d} = \frac{x_e + x_q}{x_e + x'_q} \frac{1}{T'_{q0}}; \quad \eta_{2q} = \frac{x_d - x'_d}{x_e + x'_d} \frac{1}{T'_{d0}}; \quad \eta_{2d} = \frac{x_q - x'_q}{x_e + x'_q} \frac{1}{T'_{q0}}; \quad \eta_3 = \frac{1}{T'_{d0}}; \\ \eta_4 &= \frac{1}{T_R}; \quad \eta_{5q} = \frac{K_R}{T_R} \frac{x_e}{x_e + x'_d} \frac{v_q^0}{V_T^0}; \quad \eta_{5d} = \frac{K_R}{T_R} \frac{x_e}{x_e + x'_q} \frac{v_d^0}{V_T^0}; \\ \eta_6 &= \frac{K_R}{T_R} X'_d \frac{v_q^0}{V_T^0}; \quad \eta_7 = \frac{K_R}{T_R} X'_q \frac{v_d^0}{V_T^0}. \end{aligned} \quad (\text{II.26})$$

Adicionalmente, observando que, sem incorrer em maiores erros, pode-se colocar

$$f(\sigma, e_d, e_q) \cong E_q'^0 h(\sigma) + E_d'^0 g(\sigma) + \mu_q e_q - \mu_d e_d \quad (\text{II.27})$$

com

$$\mu_q = (BV \sin \delta^0); \mu_d = (BV \cos \delta^0)$$

e, usando-se de certo artifício, podem-se expressar as variações da tensão terminal como

$$\Delta V_T \cong \xi f(\sigma, e_d, e_q) + \kappa_{ed} e_d + \kappa_{eq} e_q + \kappa_h h(\sigma) - \kappa_q g(\sigma) \quad (\text{II.28})$$

onde ξ é um número real escolhido para dotar o sistema de uma certa estrutura. Consequentemente, os demais parâmetros ficam alterados como:

$$\kappa_{ed} = K_{ed} + \xi BV \cos \delta^0 = \frac{1}{X_e + X'_q} (X_e \frac{v_d^0}{V_T^0} + \xi \mu_d) \quad (\text{II.29})$$

$$\kappa_{eq} = K_{eq} - \xi BV \sin \delta^0 = \frac{1}{X_e + X'_d} (X_e \frac{v_q^0}{V_T^0} - \xi \mu_q^0)$$

$$\kappa_h = X'_q \frac{v_d^0}{V_T^0} - \xi E'_q \quad (\text{II.30})$$

$$\kappa_q = X'_d \frac{v_d^0}{V_T^0} + \xi E'_d \quad (\text{II.31})$$

Além do colocado, observa-se que as constantes de tempo do laço de regulação de velocidade apresentam-se tais que

$$T_g \ll T_M$$

indicando que a dinâmica do regulador de velocidade é muito mais rápida do que a da turbina. Portanto não há maiores prejuízos à representação da dinâmica do sistema global se aquela for desconsiderada diante desta, visto que o interesse da análise reside nas oscilações eletromecânicas - relativamente lentas, por natureza. Então, no laço de regulação de velocidade, reduz-se de uma variável a ordem do sistema.

Isto posto, incluindo-se a representação do ESP, dado por (II.15) e (II.16), o sistema MBI fica com a forma

II.5.2 - Caso de Sistema Multimáquinas (SM).

A Figura 4 ilustra a interconexão entre máquinas de um SM. A rede, como já foi observado, é considerada em regime permanente e as cargas são modeladas como impedâncias (ou admitâncias) constantes, de modo que toda dinâmica é devida às máquinas e seus dispositivos de controle. As admitâncias das cargas são incluídas na rede, assim como o são as barras internas das máquinas. A tensão

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_m \\ \dot{y}_l \\ \dot{\omega} \\ \dot{\sigma} \\ \dot{e}_d \\ \dot{e}_q \\ \dot{\varepsilon} \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_M} & -\frac{1}{T_M} & -\frac{a}{T_M} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{M} & 0 & -\frac{D}{M} & -\frac{1}{M} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\eta_{ld} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\eta_{lq} & \eta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\mu & -\eta'_{sd} & -\eta'_{sq} & -\eta_4 & \eta_4 K_R K_w & -\eta_4 K_R \\ 0 & 0 & \gamma & 0 & -\frac{T_1}{MT_w} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_w} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_p}{T_p} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_m \\ y_l \\ \omega \\ f(\sigma, e_d, e_q) \\ e_d \\ e_q \\ \varepsilon \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \eta_{2d} h(\sigma) \\ -\eta_{2q} g(\sigma) \\ \frac{\eta'_6 g(\sigma) - \eta'_7 h(\sigma)}{\eta'_6 g(\sigma) - \eta'_7 h(\sigma)} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (II.31)$$

onde

$$\gamma = \frac{1}{T_w} (1 - T_1 \frac{D}{M}); \quad \mu = \frac{K_R}{T_R} \xi \quad (II.32)$$

$$\begin{aligned} \eta'_{sd} &= \frac{K_R}{T_R} (\kappa_{ed} - A_p \mu_d); \quad \eta'_{sq} = \frac{K_R}{T_R} (\kappa_{eq} + A_p \mu_q); \\ \eta'_6 &= \frac{K_R}{T_R} (\kappa_g - A_p E_d^0); \quad \eta'_7 = \frac{K_R}{T_R} (\kappa_h + A_p E_q^0) \end{aligned} \quad (II.33)$$

II.5.2 - Caso de Sistema Multimáquinas (SM).

A Figura 4 ilustra a interconexão entre máquinas de um SM. A rede, como já foi observado, é considerada em regime permanente e as cargas são modeladas como impedâncias (ou admitâncias) constantes, de modo que toda dinâmica é devida às máquinas e seus dispositivos de controle. As admitâncias das cargas são incluídas na rede, assim como o são as barras internas das máquinas. A tensão

$$\begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta & -\cos \delta \\ \cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \quad (II.36)$$

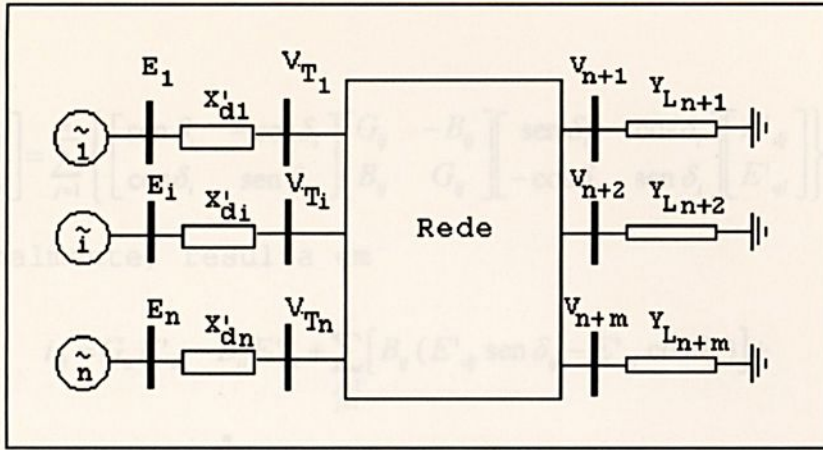


Figura 4 - Sistema Multimáquinas

interna de um gerador genérico i , E'_i , cujas componentes de eixos direto e em quadratura são E'_{di} e E'_{qi} , respectivamente, é a tensão atrás de X'_d . A rede é reduzida às barras internas dos geradores, resultando na rede equivalente ilustrada na Figura 5.

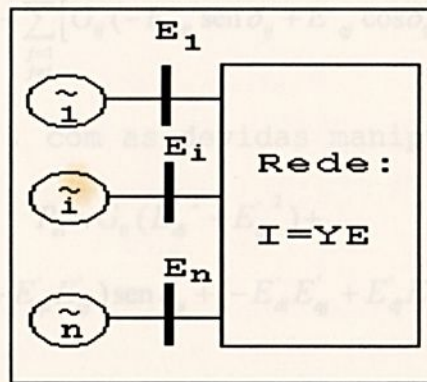


Figura 5 - Rede reduzida às barras internas

Com base nesta rede reduzida, pode-se calcular a corrente terminal de uma máquina genérica i , como

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} E_j, \quad (\text{II.34})$$

ou, colocado em termos de componentes na referência da rede, com os índices R e I indicando as partes real e imaginária, respectivamente, e G_{ij} e B_{ij} sendo a condutância e susceptância de transferência entre as barras i e j :

$$\begin{bmatrix} I_{Ri} \\ I_{Ii} \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^n \begin{bmatrix} G_{ij} & -B_{ij} \\ B_{ij} & G_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{Rj} \\ E_{Ij} \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

Para obter as componentes de eixo direto e em quadratura da corrente da i -ésima máquina, aplica-se a transformação

$$\begin{bmatrix} i_{di} \\ i_{qi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta_i & -\cos \delta_i \\ \cos \delta_i & \sin \delta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Ri} \\ I_{Ii} \end{bmatrix} \quad (\text{II.36})$$

levando a

$$\begin{bmatrix} i_{di} \\ i_{qi} \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^n \left\{ \begin{bmatrix} \sin \delta_i & -\cos \delta_i \\ \cos \delta_i & \sin \delta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{ij} & -B_{ij} \\ B_{ij} & G_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \delta_i & \cos \delta_i \\ -\cos \delta_i & \sin \delta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_{dj} \\ E'_{qj} \end{bmatrix} \right\} \quad (\text{II.37})$$

o que, finalmente, resulta em

$$\begin{aligned} i_{di} = & G_{ii} E'_{di} - B_{ii} E'_{qi} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n [B_{ij} (E'_{dj} \sin \delta_{ij} - E'_{qj} \cos \delta_{ij})] + \\ & + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n [G_{ij} (E'_{dj} \cos \delta_{ij} + E'_{qj} \sin \delta_{ij})] \end{aligned} \quad (\text{II.38})$$

e

$$\begin{aligned} i_{qi} = & G_{ii} E'_{qi} + B_{ii} E'_{di} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n [B_{ij} (E'_{dj} \cos \delta_{ij} + E'_{qj} \sin \delta_{ij})] + \\ & + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n [G_{ij} (-E'_{dj} \sin \delta_{ij} + E'_{qj} \cos \delta_{ij})] \end{aligned} \quad (\text{II.39})$$

e, empregando (II.7), com as devidas manipulações algébricas:

$$\begin{aligned} P_{ei} = & G_{ii} (E'^2_{di} + E'^2_{qi}) + \\ & + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \left\{ B_{ij} [(E'_{di} E'_{dj} + E'_{qi} E'_{qj}) \sin \delta_{ij} + (-E'_{di} E'_{qj} + E'_{dj} E'_{qi}) \cos \delta_{ij}] \right\} + \\ & + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \left\{ G_{ij} [(E'_{di} E'_{dj} + E'_{qi} E'_{qj}) \cos \delta_{ij} + (E'_{di} E'_{qj} - E'_{dj} E'_{qi}) \sin \delta_{ij}] \right\} \end{aligned} \quad (\text{II.40})$$

Sendo n o número de máquinas, e, portanto, $\delta \in R^n$, há m ($= \frac{n(n-1)}{2}$) pares de máquinas, ou seja, m defasagens angulares $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ e, trasladando o ponto de equilíbrio para a origem, utilizando-se a matriz de incidência $K \in R^{m \times n}$ (vide PAI, 1981) definem-se novas variáveis

$$\sigma = K(\delta - \delta^0) \quad (\text{II.41})$$

com $\sigma \in R^m$ de modo que, para um par de máquinas genérico $k = (i, j)$, têm-se

$$\sigma_k = \delta_{ij} - \delta^0_{ij} \quad (\text{II.42})$$

Efetuada a translação para a origem, definem-se as novas variáveis

$$\begin{aligned}
 e_{di} &= E'_{di} - E^0_{di} \\
 e_{qi} &= E'_{qi} - E^0_{qi} \\
 \varepsilon_i &= E_{fdi} - E^0_{fdi} \\
 i &= 1, 2, \dots, n;
 \end{aligned}
 \tag{II.43}$$

e as variações de potência elétrica são escritas como

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{ei} &= \\
 &+ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \{ B_{ij} [(E'_{di} E'_{dj} + E'_{qi} E'_{qj}) \sin(\sigma_k + \delta_{ij}^0) - (E^0_{di} E^0_{dj} + E^0_{qi} E^0_{qj}) \sin \delta_{ij}^0 + \\
 &\quad + (-E'_{di} E'_{qj} + E'_{dj} E'_{qi}) \cos(\sigma_k + \delta_{ij}^0) - (-E^0_{di} E^0_{qj} + E^0_{dj} E^0_{qi}) \cos \delta_{ij}^0] \} \\
 &+ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \{ G_{ij} [(E'_{di} E'_{dj} + E'_{qi} E'_{qj}) \cos(\sigma_k + \delta_{ij}^0) - (E^0_{di} E^0_{dj} + E^0_{qi} E^0_{qj}) \cos \delta_{ij}^0 + \\
 &\quad + (E'_{di} E'_{qj} - E'_{dj} E'_{qi}) \sin(\sigma_k + \delta_{ij}^0) - (E^0_{di} E^0_{qj} + E^0_{dj} E^0_{qi}) \sin \delta_{ij}^0] \}
 \end{aligned}
 \tag{II.44}$$

ou, definindo o vetor $f(\sigma, e_d, e_q) \in R^m$ tal que seus elementos são

$$\begin{aligned}
 f_k(\sigma, e_d, e_q) &= \\
 &= B_{ij} [(E'_{di} E'_{dj} + E'_{qi} E'_{qj}) \sin(\sigma_k + \delta_{ij}^0) - (E^0_{di} E^0_{dj} + E^0_{qi} E^0_{qj}) \sin \delta_{ij}^0 + \\
 &\quad + (-E'_{di} E'_{qj} + E'_{dj} E'_{qi}) \cos(\sigma_k + \delta_{ij}^0) - (-E^0_{di} E^0_{qj} + E^0_{dj} E^0_{qi}) \cos \delta_{ij}^0] \\
 &\quad k = 1, 2, \dots, m
 \end{aligned}
 \tag{II.45}$$

as variações de potência ativa, desconsideradas as condutâncias de transferência cujos efeitos serão posteriormente incluídos, são dadas por

$$\Delta P_{ei} = K_i^T f(\sigma, e_d, e_q)
 \tag{II.46}$$

onde K_i é a i -ésima coluna da matriz K .

Para as correntes, têm-se

$$\Delta i_{di} = G_{ii} e_{di} - B_{ii} e_{qi} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \{ B_{ij} [E'_{dj} (\sin(\sigma_k + \delta_{ij}^0) - \sin \delta_{ij}^0) - E'_{qj} (\cos(\sigma_k + \delta_{ij}^0) - \cos \delta_{ij}^0)] \}
 \tag{II.47}$$

$$\Delta i_{di} = G_{ii} e_{di} - B_{ii} e_{qi} + g_i(\sigma, e_d, e_q)
 \tag{II.48}$$

e

$$\Delta i_{qi} = G_{ii} e_{qi} + B_{ii} e_{di} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \{ B_{ij} [E'_{dj} (\cos(\sigma_k + \delta_{ij}^0) - \cos \delta_{ij}^0) + E'_{qj} (\sin(\sigma_k + \delta_{ij}^0) - \sin \delta_{ij}^0)] \}
 \tag{II.49}$$

$$\Delta i_{qi} = G_{ii} e_{qi} + B_{ii} e_{di} + h_i(\sigma, e_d, e_q).
 \tag{II.50}$$

Note-se que, por simplicidade de notação, não foi explicitado que

$$E'_{qi} = E'^0_{qi} + e_{qi}; E'_{di} = E'^0_{di} + e_{di} \quad (\text{II.51})$$

Com o colocado, pode-se estabelecer uma expressão para a tensão terminal da i -ésima máquina, dada por (II.11), com (II.5) e empregando (II.57) e (II.59):

$$\Delta V_{Ti} \cong K_{edi} e_{di} + K_{eqi} e_{qi} - K_{gi} g_i(\sigma, e_d, e_q) + K_{hi} h_i(\sigma, e_d, e_q) \quad (\text{II.52})$$

onde

$$K_{edi} = (1 + X'_q B_{ii}) \frac{v_d^0}{V_T^0} - X'_d G_{ii} \frac{v_q^0}{V_T^0} \quad (\text{II.53})$$

$$K_{eqi} = (1 + X'_q B_{ii}) \frac{v_q^0}{V_T^0} + X'_d G_{ii} \frac{v_d^0}{V_T^0} \quad (\text{II.54})$$

$$K_{gi} = X'_{di} \frac{v_{qi}^0}{V_{Ti}^0} \quad (\text{II.55})$$

$$K_{hi} = X'_{qi} \frac{v_{di}^0}{V_{Ti}^0} \quad (\text{II.56})$$

Analogamente ao que foi colocado para o sistema MBI, e novamente ressaltando que exclusivamente no laço de regulação de tensão e estabilização, a potência elétrica é representada - aproximadamente - por

$$\Delta P_{ei} \cong -\mu_{dii} e_{di} + \mu_{qi} e_{qi} + g(\sigma, e_d, e_q) + h(\sigma, e_d, e_q) \quad (\text{II.57})$$

onde

$$\mu_{di} = \frac{V_{Thi}}{X_{Thi} + X'_{di}} \cos \delta_{Thi} \quad (\text{II.58})$$

$$\mu_{qi} = \frac{V_{Thi}}{X_{Thi} + X'_{di}} \sin \delta_{Thi} \quad (\text{II.59})$$

sendo V_{Thi} , X_{Thi} , respectivamente, a tensão de circuito aberto e a reatância equivalente do equivalente de Thevenin da rede vista dos terminais da i -ésima máquina e δ_{Thi} o ângulo de equilíbrio da máquina i conectada ao equivalente. Observa-se que isto é efetuado para preservar a estrutura descentralizada por máquina.

Além das variáveis já definidas, têm-se $\omega, p_m, y_1, x_1, e x_2$, todas vetores de dimensão n , com as quais o sistema pode ser escrito como segue

$$\begin{bmatrix} \cdot \\ p_m \\ \cdot \\ y_I \\ \cdot \\ \omega \\ \cdot \\ \sigma \\ \cdot \\ e_d \\ \cdot \\ e_q \\ \cdot \\ \varepsilon \\ \cdot \\ x_1 \\ \cdot \\ x_2 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} -T_M^{-1} & -T_M^{-1} & -T_M^{-1}A & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M^{-1} & 0 & -M^{-1}D & -M^{-1}K^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -N_{1d} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -N_{1q} & N_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -N'_{5d} & -N'_{5q} & -N_4 & N_4K_RK_w & -N_4K_R & 0 \\ 0 & 0 & \gamma & 0 & T_w^{-1}T_1M^{-1}\mu_d & -T_w^{-1}T_1M^{-1}\mu_q & 0 & -T_w^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -T_p^{-1}K_p\mu_d & T_p^{-1}K_p\mu_q & 0 & 0 & -T_p^{-1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_m \\ y_I \\ \omega \\ f(\sigma, e_d, e_q) \\ e_d \\ e_q \\ \varepsilon \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ N_{2d}h(\sigma) \\ -N_{2q}g(\sigma) \\ \frac{N'_6g(\bullet) - N'_7h(\bullet)}{-T_w^{-1}M^{-1}T_1[E_q^0h(\bullet) + E_d^0g(\bullet)]} \\ \frac{T_p^{-1}K_p[E_q^0h(\bullet) + E_d^0g(\bullet)]}{T_p^{-1}K_p[E_q^0h(\bullet) + E_d^0g(\bullet)]} \end{bmatrix} \quad (\text{II.60})$$

onde as matrizes são:

$M = \text{diag}[M_i]$; $D = \text{diag}[D_i]$; $T_M = \text{diag}[T_{Mi}]$; $A = \text{diag}[a_i]$; $N_j = \text{diag}[\eta_{ji}]$, $T_j = \text{diag}[T_{ji}]$; $\gamma = \text{diag}[\gamma_i]$; $\mu_d = \text{diag}[\mu_{di}]$, $\mu_q = \text{diag}[\mu_{qi}]$, e os elementos ainda não definidos são

$$\eta_{1di} = [1 - (X_{qi} - X'_{qi})B_{ii}] \frac{1}{T'_{qoi}} \quad (\text{II.61})$$

$$\eta_{1qi} = [1 - (X_{di} - X'_{di})B_{ii}] \frac{1}{T'_{doi}}$$

$$\eta_{2di} = \frac{X_{qi} - X'_{qi}}{T'_{qoi}}$$

$$\eta_{2qi} = \frac{X_{di} - X'_{di}}{T'_{doi}} \quad (\text{II.62})$$

$$\gamma_i = \frac{1}{T_{wi}} (1 - T_{li} \frac{D_i}{M_i}) \quad (\text{II.63})$$

$$\eta'_{5di} = \frac{K_{Ri}}{T_{Ri}} K_{edi}; \eta'_{5qi} = \frac{K_{Ri}}{T_{Ri}} K_{eqi}; \eta'_{6i} = \frac{K_{Ri}}{T_{Ri}} K_{gi}; \eta'_{7i} = \frac{K_R}{T_R} K_{hi} \quad (\text{II.64})$$

Aborda-se, na sequência, o sistema Máquina versus Barra Infinita (MBI), que, pela sua relativa simplicidade, permite uma melhor visualização da técnica empregada. Posteriormente, a abordagem é estendida, com as devidas considerações, ao caso de sistemas multimáquinas. Poderá ser observado que, excetuadas as interrelações via rede de transmissão, o tratamento é descentralizado, máquina a máquina, guardando estreita relação com o caso MBI.

III.1 - FUNÇÃO DE LYAPUNOV: SISTEMAS DE PERSIDSKII.

O Método de Lyapunov de análise de estabilidade consiste basicamente no seguinte teste: Dado um sistema dinâmico

$$\dot{x} = f(x); f(0) = 0 \quad (\text{III.1})$$

sendo $x \in R^n; f: R^n \rightarrow R^n$, se existe uma função escalar $V(x)$ positiva definida tal que sua derivada temporal $\dot{V}(x) = \frac{dV(x)}{dt}$ ao longo das trajetórias de (III.1) seja negativa definida, então diz-se que $V(x)$ é uma Função de Lyapunov (FL) para a estabilidade de (III.1) e se assegura a estabilidade assintótica da origem; e, mutatis mutandis, com $V(x)$ negativa definida e $\dot{V}(x)$ positiva definida. Pode-se admitir $\dot{V}$ semi-definida, lançando mão do resultado de La Salle (vide PAI, 1981).

A construção de uma FL não é, em geral, uma tarefa simples, havendo diversas técnicas para sua obtenção (vide PAI, 1981). Aqui é apresentada uma técnica particular (HSU e KASZKUREWICZ, 1979) que será adiante utilizada: trata-se da busca de uma FL para sistemas ditos de Persidskii generalizados os quais têm a forma

$$\dot{x} = A\phi(x) + F(x) \quad (\text{III.2})$$

$x \in R^n; \phi: R^n \rightarrow R^n; F: R^n \rightarrow R^n; A \in R^{n \times n}$ sendo que a Função de Lyapunov proposta tem a forma

CAPÍTULO III

FUNÇÃO DE LYAPUNOV (ENERGIA) PARA O SEE
COM DISPOSITIVOS DE CONTROLE

Neste capítulo se desenvolvem Funções de Lyapunov (FL's) para alguns dos sistemas apresentados no capítulo anterior. Inicia-se com uma apresentação sumária da metodologia empregada na derivação das FL's para os sistemas da forma dita de Persidskii generalizada (HSU e KASZKUREWICZ, 1979)

Aborda-se, na seqüência, o sistema Máquina versus Barra Infinita (MBI), que, pela sua relativa simplicidade, permite uma melhor visualização da técnica empregada. Posteriormente, a abordagem é estendida, com as devidas considerações, ao caso de sistemas multimáquinas. Poderá ser observado que, excetuadas as interrelações via rede de transmissão, o tratamento é descentralizado, máquina a máquina, guardando estreita relação com o caso MBI.

III.1 - FUNÇÃO DE LYAPUNOV: SISTEMAS DE PERSIDSKII.

O Método de Lyapunov de análise de estabilidade consiste basicamente no seguinte teste: Dado um sistema dinâmico

$$\dot{x} = f(x); f(0) = 0 \quad (\text{III.1})$$

sendo $x \in R^n$; $f: R^n \rightarrow R^n$, se existe uma função escalar $V(x)$ positiva definida tal que sua derivada temporal $\dot{V}(x) = \frac{dV(x)}{dt}$ ao longo das trajetórias de (III.1) seja negativa definida, então diz-se que $V(x)$ é uma Função de Lyapunov (FL) para a estabilidade de (III.1) e se assegura a estabilidade assintótica da origem; e, mutatis mutandis, com $V(x)$ negativa definida e $\dot{V}(x)$ positiva definida. Pode-se admitir $\dot{V}$ semi-definida, lançando mão do resultado de La Salle (vide PAI, 1981).

A construção de uma FL não é, em geral, uma tarefa simples, havendo diversas técnicas para sua obtenção (vide PAI, 1981). Aqui é apresentada uma técnica particular (HSU e KASZKUREWICZ, 1979) que será adiante utilizada: trata-se da busca de uma FL para sistemas ditos de Persidskii generalizados os quais têm a forma

$$\dot{x} = A\phi(x) + F(x) \quad (\text{III.2})$$

$x \in R^n$; $\phi: R^n \rightarrow R^n$; $F: R^n \rightarrow R^n$; $A \in R^{n \times n}$ sendo que a Função de Lyapunov proposta tem a forma

$$V(x) = \sum_{i=1}^n p_i \int_0^{x_i} \phi_i(\tau) d\tau_i \quad (\text{III.3})$$

a qual é definida por uma matriz P tal como

$$P = \text{diag}[p_i]. \quad (\text{III.4})$$

Já foi mostrado (HSU e KASZKUREWICZ, 1979) que a derivada temporal de (III.3) nas trajetórias do sistema (III.2) é dada por

$$\dot{V}(x) = -\frac{1}{2} [P^{-1} \nabla V(x)]^T Q [P^{-1} \nabla V(x)] + \nabla V^T(x) [F - AP^{-1} \psi(x)] \quad (\text{III.5})$$

onde

$$Q = -[A^T P + PA] \quad (\text{III.6})$$

e

$$\psi^T = [\psi_1 \quad \psi_2 \quad \dots \quad \psi_n] \quad (\text{III.7})$$

com

$$\psi_i = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n p_i \int_0^{x_i} \frac{\partial \phi_k(\tau)}{\partial x_i} d\tau_k \quad (\text{III.8})$$

A verificação do sinal de (III.5) não é usualmente trivial. Diversas particularidades de sistemas e estruturas foram exploradas em (HSU e KASZKUREWICZ, 1979) e, no presente caso, uma merece especial atenção: se se obtiver

$$F - AP^{-1} \psi(x) = 0, \quad (\text{III.9})$$

então o sinal de $\dot{V}$ (III.5) dependerá exclusivamente da definição de sinal da matriz Q (III.6) - que deve ser positivo definido para $\dot{V} < 0$ ou positivo semi-definido para $\dot{V} \leq 0$. Neste caso, a verificação do sinal é relativamente simples, bastando aplicar a condição de Sylvester: $q_{ii} > 0, \forall i$ e $\det(Q_i) > 0, i = 2, \dots, n$ (sendo Q_i o menor de ordem i de Q) para $Q > 0$ ou $q_{ii} \geq 0, \forall i$ e $\det(Q_i) \geq 0, i = 2, \dots, n$ para $Q \geq 0$.

III.2 - FUNÇÃO DE LYAPUNOV PARA O SISTEMA MBI.

Trata-se aqui o sistema MBI com RAT e RV, mas sem o ESP, cujos efeitos poderão ser acrescentados posteriormente. Então, de (II.31):

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_m \\ \dot{y}_I \\ \dot{\omega} \\ \dot{\sigma} \\ \dot{e}_d \\ \dot{e}_q \\ \dot{\varepsilon} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_M} & -\frac{1}{T_M} & -\frac{a}{T_M} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{M} & 0 & -\frac{D}{M} & -\frac{1}{M} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\eta_{ld} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\eta_{lq} & \eta_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\eta_{sd} & -\eta_{sq} & -\eta_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_m \\ y_I \\ \omega \\ f(\sigma, e_d, e_q) \\ e_d \\ e_q \\ \varepsilon \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \eta_{2d}h(\sigma) \\ -\eta_{2q}g(\sigma) \\ \eta_6g(\sigma) - \eta_7h(\sigma) \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

O sistema pode ser visto segundo a decomposição indicada no particionamento das matrizes em (III.10):

o regulador de velocidade:

$$S_1 = \begin{Bmatrix} p_s \\ y_I \end{Bmatrix}; \quad (\text{III.11})$$

a máquina síncrona:

$$S_2 = \begin{Bmatrix} \omega \\ \sigma \\ e_d \\ e_q \end{Bmatrix}; \quad (\text{III.12})$$

e o laço de regulação de tensão:

$$S_3 = \begin{Bmatrix} e_s \\ \varepsilon \end{Bmatrix}. \quad (\text{III.13})$$

Trata-se de uma decomposição com superposição (SILJAK, 1978) sendo que a variável e_q está presente em dois subsistemas: na máquina síncrona e no laço de regulação de tensão.

Tendo em vista que a FL a ser determinada será empregada como um apontador, dando apenas uma indicação, e não como instrumento para obter uma conclusão sobre o comportamento do sistema, algumas simplificações podem ser consideradas, sem maiores riscos de comprometer o resultado final. Como em COLVARA (1988, 1992) e COLVARA e HSU (1990), observa-se que, sendo a dinâmica do RAT (ε) muito mais rápida que a do campo (e_q), aquela pode ser desconsiderada diante desta obtendo-se uma redução de ordem do sistema. Por outro lado, observando os subsistemas desacopladamente, nota-se que S_3 é estruturalmente estável, visto que tem estabilidade de sinal; assim sendo, considera-se que, se houver instabilidade no sistema, esta será devida a S_1 e S_2 , e não a S_3 . Então, a energia utilizada para a análise da estabilidade será a parcela devida a S_1 e S_2 .

Isto posto, e visando expressar o sistema em uma estrutura mais "favorável", faz-se a mudança de variáveis definida por LOURENÇO (1995) e LOURENÇO e COLVARA (1995):

$$\bar{y}_I = y_I + \ell p_m \quad (\text{II.14})$$

com

$$\ell = \frac{\alpha}{a} T_M \quad (\text{II.15})$$

resultando no sistema a seguir.

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_m \\ \dot{y}_I \\ \dot{\omega} \\ \dot{\sigma} \\ \dot{e}_d \\ \dot{e}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_M} + \frac{\alpha}{a} & -\frac{1}{T_M} & -\frac{a}{T_M} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\alpha^2 T_M}{a^2} - \frac{\alpha}{a} & -\frac{\alpha}{a} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{M} & 0 & -\frac{D}{M} & -\frac{1}{M} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\eta_{1d} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\eta_{1q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_m \\ y_I \\ \omega \\ f(\sigma, e_d, e_q) \\ e_d \\ e_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \eta_{2d} h(\sigma) \\ -\eta_{2q} g(\sigma) \end{bmatrix} \quad (\text{III.16})$$

Construção da FL

Calculando (III.8) e os produtos subsequentes, obtém-se

$$\psi = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -p_4 h(\sigma) \\ p_4 g(\sigma) \end{bmatrix}; P^{-1} \psi = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{p_4}{p_5} h(\sigma) \\ \frac{p_4}{p_6} g(\sigma) \end{bmatrix}; AP^{-1} \psi = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \eta_{1d} \frac{p_4}{p_5} h(\sigma) \\ -\eta_{1q} \frac{p_4}{p_6} g(\sigma) \end{bmatrix}$$

de onde

$$F(x) - AP^{-1} \psi = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \eta_{2d} h(\sigma) \\ -\eta_{2q} g(\sigma) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \eta_{1d} \frac{p_4}{p_5} h(\sigma) \\ -\eta_{1q} \frac{p_4}{p_6} g(\sigma) \end{bmatrix} \quad (\text{III.17})$$

Para anular a última expressão, encontrando a restrição (III.9), deve-se ter

$$\frac{p_4}{p_5} = \frac{\eta_{2d}}{\eta_{1d}} \quad (\text{III.18})$$



$$\frac{p_4}{p_6} = \frac{\eta_{2q}}{\eta_{1q}} \quad (\text{III.19})$$

o que fixa os valores relativos dos coeficientes p_4, p_5 e p_6 .

Havendo assegurado (III.9), resta verificar o sinal da matriz Q (III.6), a qual é dada por

$$Q =$$

$$\begin{bmatrix} 2\left(\frac{1}{T_M} - \frac{\alpha}{a}\right)p_1 \frac{T_M}{a} & \frac{1}{T_M}p_1 + \frac{\alpha}{a}\left(1 - \frac{\alpha}{a}T_M\right)p_2 & \frac{a}{T_M}p_1 - \frac{1}{M}p_3 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_M}p_1 + \frac{\alpha}{a}\left(1 - \frac{\alpha}{a}T_M\right)p_2 & 2\frac{\alpha}{a}p_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline \frac{a}{T_M}p_1 - \frac{1}{M}p_3 & 0 & 2\frac{D}{M}p_3 & \frac{1}{M}p_3 - p_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{M}p_3 - p_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2\eta_{1d}p_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\eta_{10}p_6 \end{bmatrix}$$

$$(\text{III.20})$$

Fazendo-se então

$$\frac{p_1}{p_3} = \frac{1}{M} \frac{T_M}{a} \quad (\text{III.21})$$

a matriz se torna bloco-diagonal como

$$Q = \begin{bmatrix} Q_{RV} & 0 \\ 0 & Q_{MS} \end{bmatrix} \quad (\text{III.22})$$

podendo o seu sinal ser verificado bloco a bloco. Empregando-se a condição de Sylvester e calculando-se o determinante do primeiro bloco - correspondente ao RV chega-se a

$$\Delta(Q_{RV}) = - \left[\frac{1}{T_M}p_1 - \frac{\alpha}{a}\left(1 - \frac{\alpha}{a}T_M\right)p_2 \right]^2 \quad (\text{III.23})$$

observando-se que o determinante se anula e, portanto, a matriz é semi-definida positiva com

$$\frac{p_1}{p_2} = T_M \frac{\alpha}{a} \left(1 - \frac{\alpha}{a}T_M\right). \quad (\text{III.24})$$

Para o segundo bloco, correspondente à Máquina Síncrona (MS), para definição de sinal, nota-se, de imediato, que, para possibilitar a (semi-) definição de sinal é necessário que

$$\frac{p_3}{p_4} = M \quad (\text{III.26})$$

e, lembrando que

$$p_i > 0, \forall i$$

estabeleceram-se todas as relações entre os coeficientes da FL que fica, então, determinada atribuindo-se valor unitário a p_4 :

$$p_1 = \frac{T_M}{a} \quad (\text{III.27})$$

$$p_2 = \frac{1}{\alpha(1 - \frac{\alpha}{a} T_M)} \quad (\text{III.28})$$

$$p_3 = M \quad (\text{III.29})$$

$$p_4 = 1 \quad (\text{III.30})$$

$$p_5 = \frac{\eta_{1d}}{\eta_{2d}} \quad (\text{III.31})$$

$$p_6 = \frac{\eta_{1q}}{\eta_{2q}} \quad (\text{III.27})$$

com o que a matriz Q é semi-definida positiva, e a Função de Lyapunov é

$$(x) = \frac{1}{2} \frac{T_M}{a} p_m^2 + \frac{1}{2} \frac{1}{\alpha(1 - \frac{\alpha}{a} T_M)} \bar{y}_1^2 + \frac{1}{2} M \omega^2 + \int_0^{\sigma} f(\tau, e_d, e_q) d\tau + \frac{1}{2} \frac{\eta_{1d}}{\eta_{2d}} e_d^2 + \frac{1}{2} \frac{\eta_{1q}}{\eta_{2q}} e_q^2 \quad (\text{III.27})$$

III.3 - FUNÇÃO DE LYAPUNOV PARA O SISTEMA MULTIMÁQUINAS.

Nesta seção desenvolve-se uma FL para o sistema de energia elétrica multimáquinas, a princípio com a ação dos Reguladores de Velocidade e dos Reguladores Automáticos de Tensão, como a seguir.

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_m \\ \dot{y}_I \\ \dot{\omega} \\ \dot{\sigma} \\ \dot{e}_d \\ \dot{e}_q \\ \dot{\varepsilon} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -T_M^{-1} & -T_M^{-1} & -T_M^{-1}A & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline M^{-1} & 0 & M^{-1}D & -M^{-1}K^T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -N_{1d} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -N_{1q} & N_3 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & -N_{5d} & -N_{5q} & -N_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_m \\ y_I \\ \omega \\ f(\sigma, e_d, e_q) \\ e_d \\ e_q \\ \varepsilon \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ N_{2d}h(\sigma) \\ -N_{2q}g(\sigma) \\ N_6g(\sigma) - N_7h(\sigma) \end{bmatrix} \quad (\text{III.28})$$

O procedimento a seguir é uma extensão do caso MBI, e as considerações lá efetuadas são válidas, uma vez que a ação dos reguladores, bem como dos estabilizadores (ainda não adicionados), é descentralizada máquina a máquina. Tal fato é evidenciado pela forma diagonal das matrizes N. Então, o sistema reduzido é dado por

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_m \\ \dot{y}_I \\ \dot{\omega} \\ \dot{\sigma} \\ \dot{e}_d \\ \dot{e}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -T_M^{-1} & -T_M^{-1} & -T_M^{-1}A & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha & 0 & 0 & 0 \\ \hline M^{-1} & 0 & M^{-1}D & -M^{-1}K^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -N_{1d} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -N_{1q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_m \\ y_I \\ \omega \\ f(\sigma, e_d, e_q) \\ e_d \\ e_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ N_{2d}h(\sigma) \\ -N_{2q}g(\sigma) \end{bmatrix} \quad (\text{III.29})$$

O estudo do caso MBI serve agora como um roteiro das etapas a seguir. Inicia-se com uma alteração da estrutura da representação do sistema através da mudança de variáveis

$$\begin{aligned} \bar{y}_I &= y_I + \Gamma p_m, \\ \Gamma &= \text{diag}[\ell_i], i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (\text{III.30})$$

e, já fazendo

$$\ell_i = \frac{T_{Mi}}{a_i} \alpha_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{III.31})$$

resulta em

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_m \\ \dot{\bar{y}}_I \\ \dot{\omega} \\ \dot{\sigma} \\ \dot{e}_d \\ \dot{e}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -T_M^{-1} & -T_M^{-1} & -T_M^{-1}A & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha & 0 & 0 & 0 \\ \hline M^{-1} & 0 & M^{-1}D & -M^{-1}K^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -N_{1d} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -N_{1q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_m \\ \bar{y}_I \\ \omega \\ f(\sigma, e_d, e_q) \\ e_d \\ e_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ N_{2d}h(\sigma) \\ -N_{2q}g(\sigma) \end{bmatrix} \quad (\text{III.32})$$

de onde

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_m \\ \dot{\bar{y}}_l \\ \dot{\omega} \\ \dot{\sigma} \\ \dot{e}_d \\ \dot{e}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -T_M^{-1} + A^{-1}\alpha & -T_M^{-1} & -T_M^{-1}A & 0 & 0 & 0 \\ A^{-1}\alpha(A^{-1}\alpha - I) & -A^{-1}\alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline M^{-1} & 0 & -M^{-1}D & -M^{-1}K^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -N_{1d} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -N_{1q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_m \\ \bar{y}_l \\ \omega \\ f(\sigma, e_d, e_q) \\ e_d \\ e_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ N_{2d}h(\sigma) \\ -N_{2q}g(\sigma) \end{bmatrix} \quad (\text{III.32})$$

A sequência de cálculos no sentido de encontrar as relações e condições expressas na seção III.1 é apresentada a seguir de forma sumária.

Procura-se uma função definida por

$$P = \begin{bmatrix} P_1 & & & & & \\ & P_2 & & & & \\ & & P_3 & & & \\ & & & P_4 & & \\ & & & & P_5 & \\ & & & & & P_6 \end{bmatrix} \quad (\text{III.33})$$

sendo

$$\begin{aligned} P_i &= \text{diag}[p_{ti}], \\ i &= 1, 2, \dots, n \text{ para } \ell \neq 4 \\ e \ i &= 1, 2, \dots, m \text{ para } \ell = 4 \end{aligned} \quad (\text{III.34})$$

e lembrando que para o sub-sistema das máquinas (interligadas pela rede) a FL já foi determinada por COLVARA (1990).

Fazendo, então

$$P_4 = U \quad (\text{III.35})$$

sendo U a matriz identidade, calcula-se:

$$\psi = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -h(\sigma, e_d, e_q) \\ g(\sigma, e_d, e_q) \end{bmatrix}; P^{-1}\psi = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -P_5^{-1}h(\sigma, e_d, e_q) \\ P_6^{-1}g(\sigma, e_d, e_q) \end{bmatrix}; AP^{-1}\psi = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ N_{1d}P_5^{-1}h(\sigma) \\ -N_{1q}P_6^{-1}g(\sigma) \end{bmatrix} \quad (\text{III.36})$$

de onde

$$F(x) - AP^{-1}\psi = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \hline 0 \\ 0 \\ N_{2d}h(\sigma) \\ -N_{2q}g(\sigma) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \hline 0 \\ 0 \\ N_{1d}P_5^{-1}h(\sigma) \\ -N_{1q}P_6^{-1}g(\sigma) \end{bmatrix} \quad (\text{III.37})$$

e, analogamente ao caso MBI, obtém-se a condição (III.9) com

$$p_{5i} = \frac{\eta_{1di}}{\eta_{2di}} \quad (\text{III.38})$$

$$p_{6i} = \frac{\eta_{1qi}}{\eta_{2qi}} \quad (\text{III.39})$$

$i=1, 2, \dots, n$

e, como o tratamento é inteiramente descentralizado, todos os demais resultados do sistema MBI são válidos máquina-a-máquina:

$$p_{1i} = \frac{T_{Mi}}{a_i} \quad (\text{III.40})$$

$$p_{2i} = \frac{1}{\alpha_i \left(1 - \frac{\alpha_i}{a_i} T_{Mi}\right)} \quad (\text{III.41})$$

$$p_{3i} = M_i \quad (\text{III.42})$$

$$p_{4i} = 1 \quad (\text{III.43})$$

$$i=1, 2, \dots, n$$

Finalmente, a Função de Lyapunov para o sistema multimáquinas é

$$V(x) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \left[\frac{T_{Mi}}{a_i} p_{mi}^2 + \frac{1}{\alpha_i \left(1 - \frac{\alpha_i}{a_i} T_{Mi}\right)} \bar{y}_{li}^2 + M_i \omega_i^2 + \frac{\eta_{1di}}{\eta_{2di}} e_{di}^2 + \frac{\eta_{1qi}}{\eta_{2qi}} e_{qi}^2 \right] + \sum_{k=1}^m \left[\int_0^{\sigma_k} f_k(\tau_k, e_d, e_q) d\tau_k \right]$$

Nota-se que, assim como em trabalhos anteriores (COLVARA, 1988, 1992; COLVARA e HSU, 1990), sem maiores dificuldades identifica-se nesta FL a forma de energia, levando às conclusões lá indicadas. Entretanto, deve-se também lembrar que o sistema não é conservativo; portanto análises baseadas em conservação de energia devem ser vistas com reservas. Assim é que, ao invés de procurar determinar Domínios de Estabilidade (DE), ou considerar de algum modo a "Superfície Limite de Energia Potencial - SLEP" ("Potential Energy Boundary Surface - PEBS"), desenvolve-se no próximo capítulo um método alternativo

em que a FL é empregada como auxiliar assumindo a função de um "apontador".

MÉTODO DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE PÓS-CONTINGÊNCIA

IV.1 - INTRODUÇÃO: RESULTADOS PRÉVIOS.

Apresenta-se neste capítulo um método automático de análise de estabilidade transitória de Sistemas de Energia Elétrica baseado na monitoração da trajetória após uma perturbação - e o desenvolvimento leva em conta faltas do tipo curto-circuito, sem impedimento à consideração de outras contingências.

Os procedimentos são uma evolução do método da Região de Sincronização Positiva (RSP), originalmente desenvolvido em COLVARA (1988), posteriormente melhorado em COLVARA e HSU (1990), COLVARA (1992) tratando o sistema com Reguladores Automáticos de Tensão (RAT's), sendo a máquina síncrona considerada com dinâmica de campo, portanto, dada por modelo de terceira ordem. Sendo o RAT de primeira ordem, o sistema apresenta-se de quarta ordem no caso de uma máquina, ou de n -ésima ordem no caso de sistemas de n máquinas. Neste caso, a RSP é definida como segue.

A RSP é uma região em torno do ponto de equilíbrio estável onde a região onde as forças (generalizadas) que atuam no sistema se caracterizam como ações restaurativas do equilíbrio. O torque líquido $f(\sigma, e)$ no eixo da máquina é dado por

$$f(\sigma, e) = BV[(E'^0 + e)\sin(\sigma + \delta^0) - E'^0 \sin \delta^0] \quad (IV.1)$$

e, para efeito de definição da RSP, consideram-se valores fixos da variável e ; para diferentes valores de e tem-se diferentes pontos de equilíbrio estável $\sigma_e(e)$. O Torque líquido $f(\sigma, e)$ é ação restaurativa para o ponto de equilíbrio $\sigma_e(e)$ na região em que

$$[\sigma - \sigma_e(e)] f(\sigma, e) > 0 \quad (\sigma \neq \sigma_e(e)) \quad (IV.2)$$

de modo que:

$$RSP = \{(\sigma, e) : \exists \sigma_e(e) \text{ e } [\sigma - \sigma_e(e)] f(\sigma, e) > 0 \text{ para } (\sigma \neq \sigma_e(e))\} \quad (IV.3)$$

A RSP está limitada por curvas definidas como Curvas de Torque Nulo (CTN's) através de $f(\sigma, e) = 0$. De (IV-1), tem-se:

$$(E'^0 + e)\sin(\sigma + \delta^0) - E'^0 \sin \delta^0 = 0 \quad (IV.4)$$



Capítulo IV

MÉTODO DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE PÓS-CONTINGÊNCIA

IV.1 - INTRODUÇÃO: RESULTADOS PRÉVIOS.

Apresenta-se neste capítulo um método automático de análise de estabilidade transitória de Sistemas de Energia Elétrica baseado na monitoração da trajetória após uma perturbação - e o desenvolvimento leva em conta faltas do tipo curto-circuito, sem impedimento à consideração de outras contingências.

Os procedimentos são uma evolução do método da Região de Sincronização Positiva (RSP), originalmente desenvolvido em COLVARA (1988), posteriormente melhorado em COLVARA e HSU (1990), COLVARA (1992) tratando o sistema com Reguladores Automáticos de Tensão (RAT's), sendo a máquina síncrona considerada com dinâmica de campo, portanto, dada por modelo de terceira ordem. Sendo o RAT de primeira ordem, o sistema apresenta-se de quarta ordem no caso de uma máquina, ou de $4n$ -ésima ordem no caso de sistemas de n máquinas. Neste caso, a RSP é definida como segue.

A RSP é uma região em torno do ponto de equilíbrio estável como a região onde as forças (generalizadas) que atuam no sistema se caracterizam como ações restaurativas do equilíbrio. O torque líquido $f(\sigma, e)$ no eixo da máquina é dado por

$$f(\sigma, e) = BV[(E'^0 + e)\sin(\sigma + \delta^0) - E'^0 \sin \delta^0] \quad (\text{IV.1})$$

e , para efeito de definição da RSP, consideram-se valores fixos da variável e : para diferentes valores de e tem-se diferentes pontos de equilíbrio estável $\sigma_e(e)$. O Torque líquido $f(\sigma, e)$ é ação restaurativa para o ponto de equilíbrio $\sigma_e(e)$ na região em que

$$[\sigma - \sigma_e(e)] f(\sigma, e) > 0 \quad (\sigma \neq \sigma_e(e)) \quad (\text{IV.2})$$

de modo que:

$$\text{RSP} = \{(\sigma, e): \exists \sigma_e(e) \text{ e } [\sigma - \sigma_e(e)] f(\sigma, e) > 0 \text{ para } (\sigma \neq \sigma_e(e))\} \quad (\text{IV-3})$$

A RSP está limitada por curvas definidas como Curvas de Torque Nulo (CTN's) através de $f(\sigma, e) = 0$. De (IV-1), tem-se:

$$(E'^0 + e)\sin(\sigma + \delta^0) - E'^0 \sin \delta^0 = 0 \quad (\text{IV-4})$$



Sendo o ponto de equilíbrio considerado na origem, as CTN's são curvas que passam uma por $(\sigma, e) = (\pi - 2\delta^0, 0)$ e outra por $(\sigma, e) = (-\pi - 2\delta^0, 0)$, como mostrado na Figura 1. Há ainda uma outra fronteira a considerar, esta associada à existência de $\sigma_e(e)$, o que exige $f(\pi/2 - \delta^0, e) > 0$, conduzindo a

$$e > E'^0 (\sin \delta^0 - 1) \quad (\text{IV-5})$$

Define-se então a linha de Mínima Tensão Interna (MTI) dada por:

$$e^* = E'^0 (\sin \delta^0 - 1) \quad (\text{IV-6})$$

como outra fronteira da RSP. As fronteiras da RSP, neste caso, são estáticas, e se apresentam no plano (σ, e) como mostrado na Figura 1.

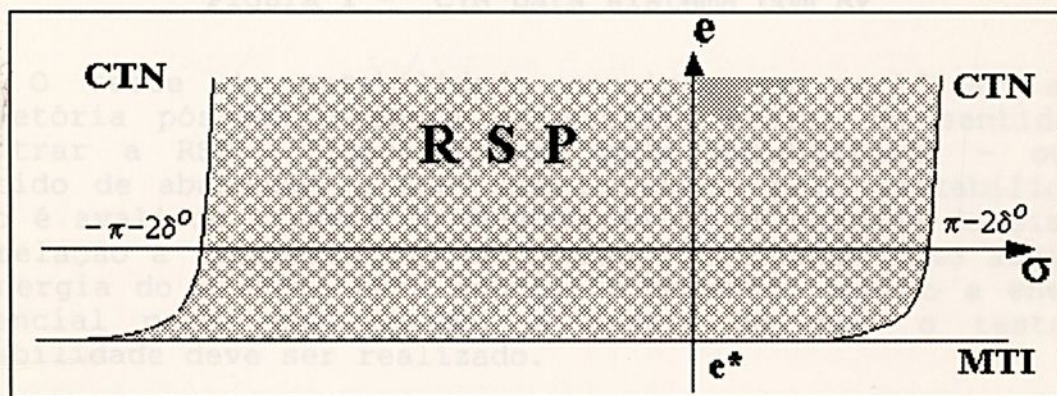


Figura 1 - RSP, CTN e MTI

Em LOURENÇO (1995) e LOURENÇO e COLVARA (1995) o método evoluiu no sentido de incluir, adicionalmente, a representação dos Reguladores de Velocidade (RV's). As fronteiras da RSP, então, embora mantendo formas similares às da Figura 1, não mais estáticas, são dotadas de dinâmica regida pela dinâmica do Regulador de Velocidade. A Figura 2 é uma ilustração do colocado, mostrando uma CTN correspondente a $p_m = 0$ - idêntica à do caso anterior - e outra para um valor genérico $p_m \neq 0$.

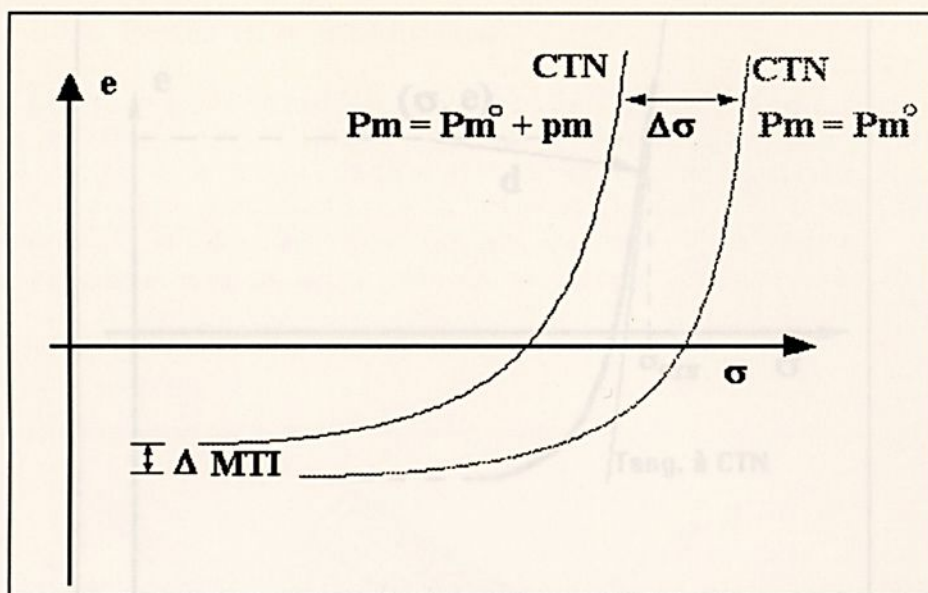


Figura 1 - CTN para sistema com RV

O teste de estabilidade consiste em verificar se a trajetória pós-contingência do sistema evolui no sentido de adentrar a RSP - concluindo-se pela estabilidade - ou no sentido de abandonar a RSP, concluindo-se pela instabilidade. Isto é avaliado através da observação da velocidade do sistema em relação à fronteira CTN da região, utilizando como auxiliar a energia do sistema para apontar o momento, quando a energia potencial passa por máximo, a partir do qual o teste de estabilidade deve ser realizado.

A Figura 3 mostra como a distância d de um ponto (de uma trajetória) à CTN é avaliada aproximando-se a CTN por uma reta tangente. As variações desta distância, já computada a influência do RV, além do RAT, é dada por

$$\dot{d}(\sigma, e, p_m) = BV \left[-\omega(E^0 + e) \sqrt{1 - \mu^2(e, p_m)} + \dot{e} \mu(e, p_m) \right] - \dot{p}_m \quad (\text{IV-7})$$

onde

$$\mu(e, p_m) \triangleq \frac{E^0 \sin \delta^0 + \frac{p_m}{BV}}{(E^0 + e)} \quad (\text{IV-8})$$

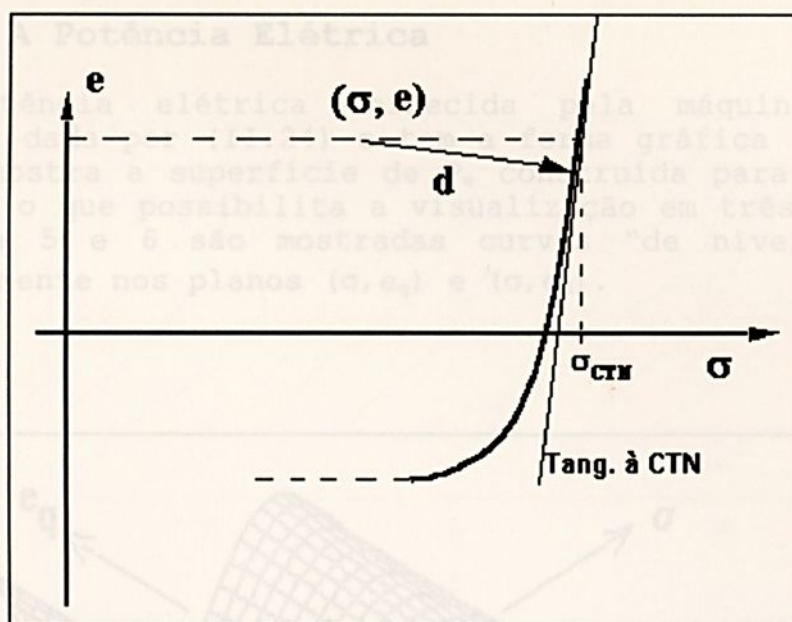


Figura 3 - Distância d de um ponto à CTN

Na descrição apresentada dos métodos já desenvolvidos para análise da estabilidade da trajetória pós-contingência foi considerada a abordagem do sistema Máquina vs. Barra Infinita (MBI) por permitir mais facilmente uma visualização dos procedimentos. Ressalta-se que os correspondentes desenvolvimentos para o caso de sistemas multimáquinas já foram realizados, sendo então tratadas as n máquinas aos pares, com cada par κ dotado da sua respectiva RSP_{κ} .

IV.2 - MÉTODO DA RSP CONSIDERANDO A MÁQUINA SÍNCRONA COM ENROLAMENTO AMORTECEDOR DE EIXO EM QUADRATURA: o caso MBI

No presente trabalho, volta-se a atenção para a representação da máquina síncrona, melhorando-a através da inclusão da consideração da dinâmica da componente da tensão interna no eixo direto, ou seja, a consideração de um enrolamento amortecedor de eixo em quadratura. Contrastando com as abordagens anteriores, como MIYAGI (1985 e 1986) KAKIMOTO OSAWA e HAYASHI (1980), HSU e COLVARA (1987), COLVARA (1988) COLVARA e HSU (1990), COLVARA (1992), LOURENÇO (1995) e LOURENÇO e COLVARA (1995) que, explicitamente ou não, admitem uma aproximação para o ângulo entre a tensão atrás de X'_d , e o eixo q , neste trabalho a única hipótese simplificadora admitida no conhecido modelo de Park para representação de fenômenos transitórios é a desconsideração da chamada saliência transitória, supondo-se $X'_q = X'_d$.

IV.2.1 - A Potência Elétrica

A potência elétrica fornecida pela máquina à barra infinita é dada por (II.24) e tem a forma gráfica a seguir. A Figura 4 mostra a superfície de P_e construída para a condição de $e_d = 0$, o que possibilita a visualização em três dimensões. Nas Figura 5 e 6 são mostradas curvas "de nível" de P_e , respectivamente nos planos (σ, e_q) e (σ, e_d) .

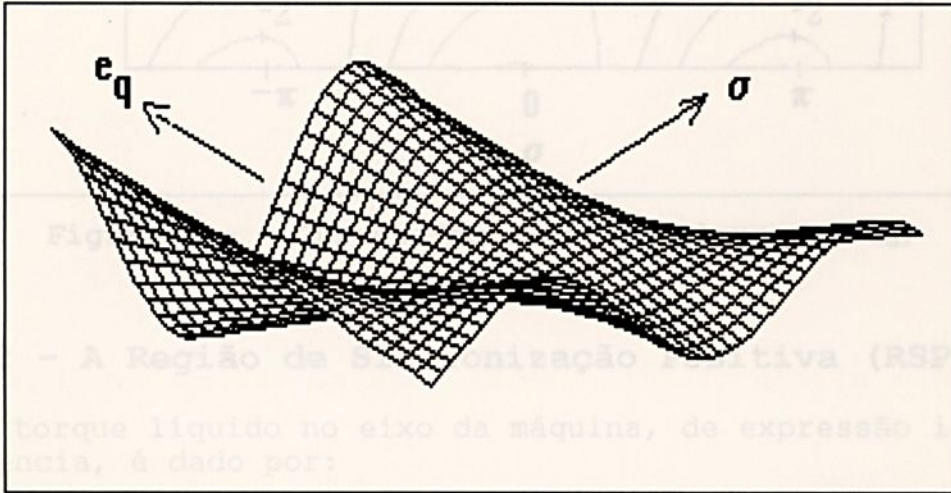


Figura 4 - Superfície Potência Elétrica: P_e versus (σ, e_q)

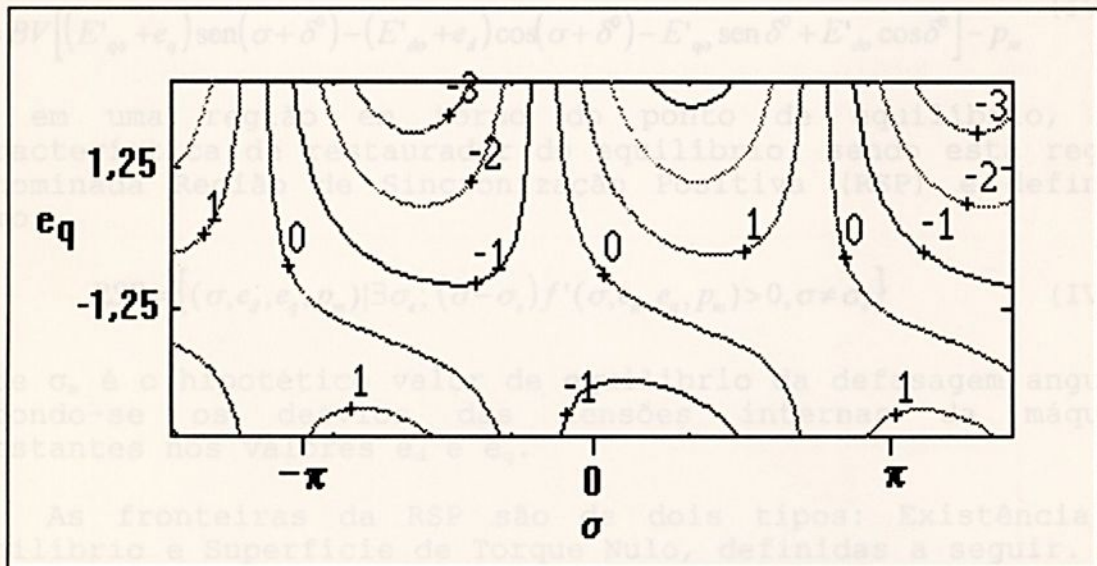


Figura 5 - Curvas "equi- P_e " no plano (σ, e_q)

Note-se que as curvas foram construídas de modo que o nível 0 corresponde a $P_e = P_M^0$ (no caso mostrado, baixo carregamento) e que as assíntotas das curvas são $\sigma = k\pi - \delta^0, \forall k$, no plano (σ, e_q) e $\sigma = k\frac{\pi}{2} - \delta^0, k \text{ ímpar}$, no plano (σ, e_d) . É importante observar que está implícita nesta consideração a

existência do ponto de equilíbrio estável com a defasagem angular δ^0 .

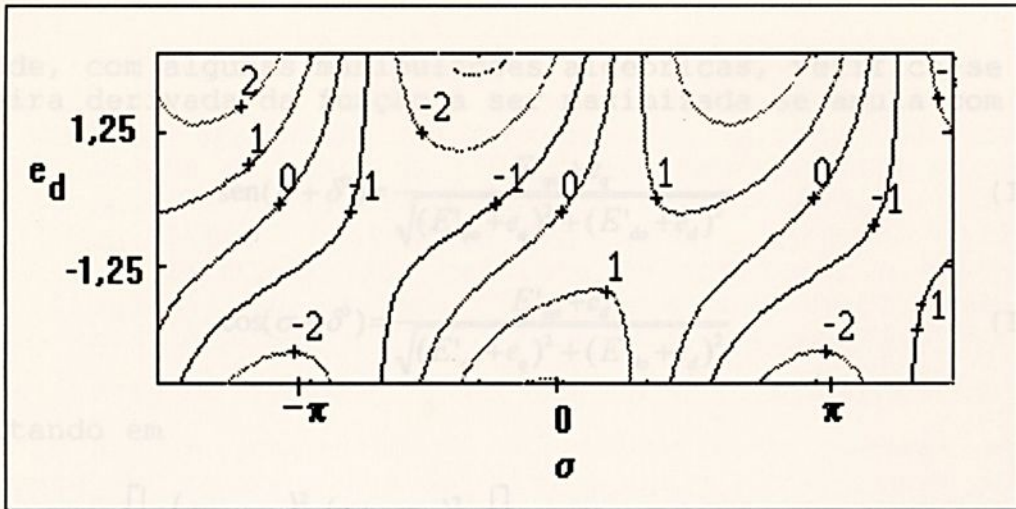


Figura 6 - - Curvas "equi-Pe" no plano (σ, e_d)

IV.2.2 - A Região de Sincronização Positiva (RSP)

O torque líquido no eixo da máquina, de expressão igual à da Potência, é dado por:

$$f'(\sigma, e_d, e_q, p_m) = f(\sigma, e_d, e_q) - p_m = BV \left[(E'_{q0} + e_q) \sin(\sigma + \delta^0) - (E'_{d0} + e_d) \cos(\sigma + \delta^0) - E'_{q0} \sin \delta^0 + E'_{d0} \cos \delta^0 \right] - p_m \quad (\text{IV-7})$$

e, em uma região em torno do ponto de equilíbrio, tem característica de restaurador do equilíbrio, sendo esta região denominada Região de Sincronização Positiva (RSP) e definida como:

$$RSP = \{(\sigma, e_d, e_q, p_m) | \exists \sigma_e; (\sigma - \sigma_e) f'(\sigma, e_d, e_q, p_m) > 0, \sigma \neq \sigma_e\} \quad (\text{IV-8})$$

onde σ_e é o hipotético valor de equilíbrio da defasagem angular supondo-se os desvios das tensões internas da máquina constantes nos valores e_d e e_q .

As fronteiras da RSP são de dois tipos: Existência de Equilíbrio e Superfície de Torque Nulo, definidas a seguir.

i) Existência de Equilíbrio: definida pela condição de existência de σ_e - de (IV-7), $f'(\sigma, e_d, e_q, p_m) = 0$ conduz à equação

$$(E'_{q0} + e_q) \sin(\sigma + \delta^0) - (E'_{d0} + e_d) \cos(\sigma + \delta^0) = E'_{q0} \sin \delta^0 - E'_{d0} \cos \delta^0 + \frac{p_m}{BV} \quad (\text{VI-9})$$

sendo σ_e uma de suas soluções em σ , para cuja existência deve se cumprir a condição:

$$\text{Max}_{\sigma} \left[\left| (E'_{qo} + e_q) \sin(\sigma + \delta^0) - (E'_{do} + e_d) \cos(\sigma + \delta^0) \right| \right] > \left| E'_{qo} \sin \delta^0 - E'_{do} \cos \delta^0 + \frac{P_m}{BV} \right| \quad (\text{IV-10})$$

de onde, com algumas manipulações algébricas, verifica-se que a primeira derivada da função a ser maximizada se anula com

$$\sin(\sigma + \delta^0) = \frac{E'_{qo} + e_q}{\sqrt{(E'_{qo} + e_q)^2 + (E'_{do} + e_d)^2}} \quad (\text{IV-11})$$

$$\cos(\sigma + \delta^0) = \frac{E'_{do} + e_d}{\sqrt{(E'_{qo} + e_q)^2 + (E'_{do} + e_d)^2}} \quad (\text{IV-12})$$

resultando em

$$\left[\left| \frac{(E'_{qo} + e_q)^2 - (E'_{do} + e_d)^2}{\sqrt{(E'_{qo} + e_q)^2 + (E'_{do} + e_d)^2}} \right| \right] > \left| E'_{qo} \sin \delta^0 - E'_{do} \cos \delta^0 + \frac{P_m}{BV} \right| \quad (\text{IV-13})$$

ii) **Superfície de Torque Nulo (STN):** esta fronteira é definida por

$$(E'_{qo} + e_q) \sin(\sigma + \delta^0) - (E'_{do} + e_d) \cos(\sigma + \delta^0) - E'_{qo} \sin \delta^0 + E'_{do} \cos \delta^0 - \frac{P_m}{BV} = 0 \quad (\text{IV-14})$$

quando a condição (IV-13) é verificada.

A Figura 7 ilustra a RSP, indicando as STN's, no plano (σ, e_q) e com $p_m = 0$. Note-se que o ramo de curva que passa pela origem também satisfaz (IV-14) e é o lugar dos σ_e .

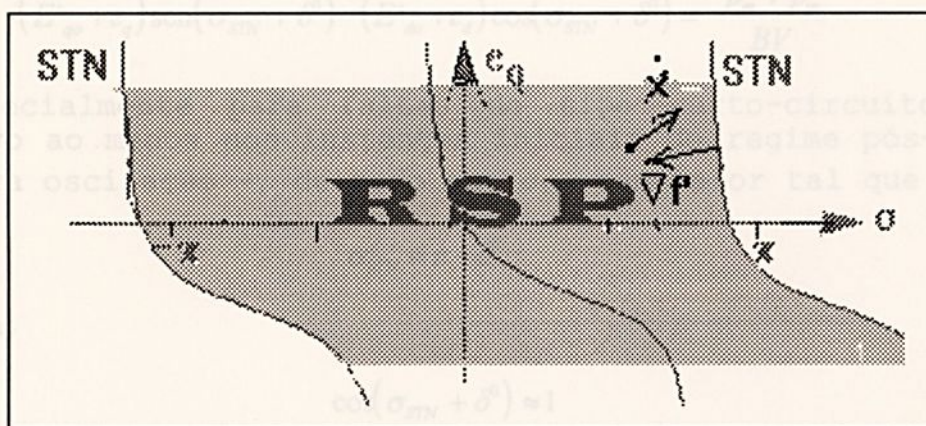


Figura 7 - RSP no plano (σ, e_q)

A forma das STN's é devida ao fato de o caso considerado ser de baixo carregamento. Em carregamentos mais elevados, e/ou, durante um transitório com elevação de potência mecânica no eixo da máquina, as STN's assumem as formas de outras curvas da Figura 5, assemelhando-se às CTN's das Figuras 1, 2 e 3.

IV.2.3 - O Teste de Estabilidade.

Considerando-se que fora da RSP não há ação que possa reconduzir o sistema ao ponto de equilíbrio estável, conclui-se que, uma vez abandonada esta região, o sistema se afastará indefinidamente do ponto de equilíbrio considerado: apresentará um comportamento instável. O teste de estabilidade, então, como em COLVARA (1988), COLVARA e HSU (1990), LOURENÇO (1995) e COLVARA E LOURENÇO (1995) consiste em monitorar a trajetória pós-contingência do sistema verificando seu comportamento em relação às fronteiras da RSP. Para isto, calcula-se, ao longo da trajetória do sistema, a variação $\dot{d}$ da distância d do ponto corrente à STN, projetando a velocidade $\dot{x}$ do sistema sobre o gradiente do torque líquido $\nabla f'(\sigma_{STN}, e_d, e_q, p_m)$ calculado sobre a STN, como ilustrado na Figura 7.

O gradiente $\nabla f'(\sigma, e_d, e_q, p_m)$ é dado por

$$\nabla f'(\sigma, e_d, e_q, p_m) = \begin{bmatrix} BV[(E'_{qo} + e_q)\cos(\sigma + \delta^0) + (E'_{do} + e_d)\sin(\sigma + \delta^0)] \\ -BV\cos(\sigma + \delta^0) \\ BV\sin(\sigma + \delta^0) \\ -1 \end{bmatrix} \quad (IV-15)$$

e é calculado no ponto determinado pela projeção do ponto considerado da trajetória sobre a STN segundo uma linha paralela ao eixo σ . Então, para o ponto (σ, e_d, e_q, p_m) da trajetória, o ponto sobre a STN é $(\sigma_{STN}, e_d, e_q, p_m)$ e σ_{STN} é obtido de (IV-9):

$$(E'_{qo} + e_q)\sin(\sigma_{STN} + \delta^0) - (E'_{do} + e_d)\cos(\sigma_{STN} + \delta^0) = \frac{p_m^0 + p_m}{BV} \quad (IV-16)$$

e, especialmente para faltas do tipo curto-circuito, e_q é positivo ao menos nos instantes iniciais do regime pós-falta - primeira oscilação -, de modo que σ_{STN} tem valor tal que

$$\sigma_{STN} \approx \pi - \delta^0 \quad (IV-17)$$

ou seja,

$$\cos(\sigma_{STN} + \delta^0) \approx 1 \quad (IV-18)$$

de onde

$$\mu = \sin(\sigma_{STN} + \delta^0) \cong \frac{\frac{p_m^0 + p_m}{BV} + (E'_{do} + e_d)}{(E'_{qo} + e_q)} \quad (IV-19)$$

e, então, considerando que o ângulo é do segundo quadrante,

$$\cos(\sigma_{STN} + \delta^0) = -\sqrt{1 - \mu^2} \quad (\text{IV-20})$$

Finalmente, reunindo os resultados, obtém-se

$$\dot{d} = BV \left\{ \omega \left[-(E'_{qo} + e_q) \sqrt{1 - \mu^2} + (E'_{do} + e_d) \mu \right] + \dot{e}_d \sqrt{1 - \mu^2} + \dot{e}_q \mu \right\} - \dot{p}_m \quad (\text{IV-21})$$

Algoritmo do teste de estabilidade

Considerando o sistema inicialmente em regime permanente estável e a ocorrência de um curto-circuito em $t=0$ e eliminado em $t=t_{ch}$, o teste de estabilidade desenvolve-se como a seguir.

1. Integrar o sistema de falta até $t=t_{ch}$.
2. Monitorar a trajetória pós-falta até encontrar um máximo de V_p . Se isto ocorrer fora da RSP, concluir pela INSTABILIDADE; caso contrário, continuar a monitoração.
3. Monitorar a trajetória pós-falta observando $\dot{d}$ até que:
 - i) $\dot{d} > 0$, concluindo pela ESTABILIDADE;
 - ii) a trajetória ultrapasse uma fronteira da RSP com $\dot{d} \leq 0$, concluindo pela INSTABILIDADE.

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i} [p_m - f_i(\sigma_i, e_d, e_q) - D_i \omega_i] - \frac{1}{M_i} \sum_{j=1}^n f_{ij}(\sigma_i, e_d, e_q) \quad (\text{IV-22})$$

e, considerando-se um par de máquinas $k=(i,j)$ desacoplado do restante do sistema, têm-se

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i} [p_m - f_i(\sigma_i, e_d, e_q) - D_i \omega_i] \quad (\text{IV-23})$$

$$\dot{\omega}_j = \frac{1}{M_j} [p_m + f_i(\sigma_i, e_d, e_q) - D_j \omega_j] \quad (\text{IV-24})$$

de onde a aceleração relativa entre as máquinas i e j do par k devida exclusivamente ao próprio par é dada por

$$\dot{\omega}_i = \dot{\omega}_i - \dot{\omega}_j = \frac{1}{M_i} p_m - \frac{1}{M_j} p_m - \left(\frac{1}{M_i} + \frac{1}{M_j} \right) f_i(\sigma_i, e_d, e_q) - \frac{D_i}{M_i} \omega_i + \frac{D_j}{M_j} \omega_j \quad (\text{IV-25})$$

Então, em (IV-25) identifica-se o torque líquido sincronizante

$$f'_i = \frac{1}{M_i M_j} [(M_i + M_j) f_i(\sigma_i, e_d, e_q) - M_i p_m + M_j p_m] \quad (\text{IV-26})$$

IV.3 - MÉTODO DA RSP CONSIDERANDO A MÁQUINA SÍNCRONA COM ENROLAMENTO AMORTECEDOR DE EIXO EM QUADRATURA:

o caso de Sistema Multimáquinas (SM).

Havendo-se estabelecido detalhadamente o método para o sistema MBI, estende-se a partir deste momento os resultados para o SM, sumariamente onde a evolução é imediata e com mais detalhe onde este não é o caso.

Seguindo os princípios colocados em trabalhos anteriores (COLVARA, 1988; COLVARA E HSU, 1990; COLVARA, 1992; LOURENÇO, 1995; LOURENÇO e COLVARA, 1995), o comportamento do sistema é analisado através da observação do desenvolvimento dos seus pares de máquinas segundo um procedimento baseado no método da RSP derivado para o sistema MBI. O número de pares a observar é reduzido, primeiro através da escolha de uma máquina como referência (a menos acelerada no instante inicial do regime de falta) reduzindo-se já para $n-1$ os pares de máquinas a considerar. Posteriormente, o número de pares a observar é ainda reduzido, pela identificação daqueles mais solicitados através da consideração das energias potenciais armazenadas durante o transitório em cada par de máquinas e no sistema global.

IV.3.1 - A RSP e suas Fronteiras.

A dinâmica mecânica de uma máquina genérica i é regida por

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i} [p_{mi} - f_k(\sigma_k, e_d, e_q) - D_i \omega_i] - \frac{1}{M_i} \sum_{l=1, l \neq k}^m f_l(\sigma_l, e_d, e_q) \quad (\text{IV-22})$$

e, considerando-se um par de máquinas $k=(i,j)$ desacoplado do restante do sistema, têm-se

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i} [p_{mi} - f_k(\sigma_k, e_d, e_q) - D_i \omega_i] \quad (\text{IV-23})$$

e

$$\dot{\omega}_j = \frac{1}{M_j} [p_{mj} + f_k(\sigma_k, e_d, e_q) - D_j \omega_j] \quad (\text{IV-24})$$

de onde a aceleração relativa entre as máquinas i e j do par k devida exclusivamente ao próprio par é dada por

$$\dot{\omega}_k = \dot{\omega}_i - \dot{\omega}_j = \frac{1}{M_i} p_{mi} - \frac{1}{M_j} p_{mj} - \left(\frac{1}{M_i} + \frac{1}{M_j} \right) f_k(\sigma_k, e_d, e_q) - \frac{D_i}{M_i} \omega_i + \frac{D_j}{M_j} \omega_j \quad (\text{IV-25})$$

Então, em (IV-25) identifica-se o torque líquido sincronizante

$$f'_k = \frac{1}{M_i M_j} [(M_i + M_j) f_k(\sigma_k, e_d, e_q) - M_j p_{mi} + M_i p_{mj}] \quad (\text{IV-26})$$

de modo que a RSP pode ser definida como

$$RSP = \{(\sigma_k, e_d, e_q, p_m) | \exists \sigma_{ke}; (\sigma_k - \sigma_{ke}) f'_k(\sigma_k, e_d, e_q, p_m) > 0, \sigma_k \neq \sigma_{ke}; k = 1, 2, \dots, m\}. \quad (IV-27)$$

Analogamente ao caso MBI, há dois tipos de fronteiras a serem consideradas:

- i. Existência de equilíbrio, e
 - ii. Superfícies de Torque Nulo (STN's)
- as quais são definidas a seguir.

De $f'_k = 0$, com f_k dado por (II-45), vem

$$\begin{aligned} B_{ij} \left[(E_{qi} E_{qj} + E_{di} E_{dj}) \operatorname{sen} \delta_{ij} + (-E_{di} E_{qj} + E_{dj} E_{qi}) \cos \delta_{ij} \right] + \\ + G_{ij} \left[(E_{qi} E_{qj} + E_{di} E_{dj}) \cos \delta_{ij} + (E_{di} E_{qj} - E_{dj} E_{qi}) \operatorname{sen} \delta_{ij} \right] \\ - P_{ek}^0 + \frac{1}{M_i + M_j} [M_i p_{mj} - M_j p_{mi}] = 0 \end{aligned} \quad (IV-28)$$

e então pode-se estabelecer as fronteiras da RSP citadas.

i. Existência de equilíbrio:

Restrição de Tensões e Potências Mecânicas (RTPM).

Como no caso MBI, o virtual equilíbrio do par k para a hipotética condição de e_d , e_q , e p_m fixos nos valores correntes só pode ocorrer, ou seja, só existe σ_{ke} , cumpridas certas condições. Visando uma simplificação através da obtenção de uma expressão analítica, fazem-se as seguintes considerações:

$$i. B_{ij} \gg G_{ij}, i$$

$$ii. |E'_{qi} E'_{qj} + E'_{di} E'_{dj}| \gg |-E'_{di} E'_{qj} + E'_{dj} E'_{qi}|;$$

de onde vem a restrição

$$B_{ij} (E'_{qi} E'_{qj} + E'_{di} E'_{dj}) > \left| P_{ek}^0 + \frac{M_j p_{mi} - M_i p_{mj}}{M_i + M_j} \right| \quad (IV-29)$$

que determina uma fronteira da RSP_k : a Restrição de Tensões e Potências Mecânicas (RTPM). Note-se que, na ausência do enrolamento amortecedor e do Regulador de Velocidade, (IV-29) reduz-se à restrição denominada Mínimas Tensões Internas em COLVARA (1988), COLVARA e HSU (1990, 1992) e COLVARA e LOURENÇO (1995).

ii. Superfícies de Torque Nulo (STN).

As STN's são dadas por (IV-28), observando que a notação foi simplificada apenas para reduzir a complexidade gráfica do

equacionamento; convém lembrar que (por exemplo) $E'_{qi} = E'^0_{qi} + e_{qi}$ e $\delta_{ij} = \sigma_k + \delta^0_{ij}$.

IV.3.2 - A evolução da trajetória em relação às fronteiras da RSP.

Calcula-se, como no caso MBI, a velocidade de aproximação da trajetória a uma certa STN_k como segue.

$$\dot{d}_k = \begin{bmatrix} \dot{\sigma}_k & \dot{e}_{di} & \dot{e}_{dj} & \dot{e}_{qi} & \dot{e}_{qj} & \dot{p}_{mi} & \dot{p}_{mj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial f'}{\partial \sigma_k} \\ \frac{\partial f'}{\partial e_{di}} \\ \frac{\partial f'}{\partial e_{dj}} \\ \frac{\partial f'}{\partial e_{qi}} \\ \frac{\partial f'}{\partial e_{qj}} \\ \frac{\partial f'}{\partial p_{mi}} \\ \frac{\partial f'}{\partial p_{mj}} \end{bmatrix} \quad (IV-30)$$

sendo o gradiente calculado sobre a STN_k no ponto σ_{STNk} obtido pela projeção do ponto corrente paralelamente ao eixo σ_k , como desenvolvido adiante. As componentes do gradiente são:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f'}{\partial \sigma_k} = & B_{ij} \left[(E'_{di} E'_{dj} + E'_{qi} E'_{qj}) \cos(\sigma_k + \delta^0_{ij}) - (-E'_{di} E'_{qj} + E'_{dj} E'_{qi}) \sin(\sigma_k + \delta^0_{ij}) \right] + \\ & + G_{ij} \left[-(E'_{di} E'_{dj} + E'_{qi} E'_{qj}) \sin(\sigma_k + \delta^0_{ij}) - (-E'_{di} E'_{qj} + E'_{dj} E'_{qi}) \cos(\sigma_k + \delta^0_{ij}) \right] \end{aligned} \quad (IV-31)$$

$$\frac{\partial f'}{\partial e_{di}} = B_{ij} [E'_{dj} \sin(\sigma_k + \delta^0_{ij}) - E'_{qj} \cos(\sigma_k + \delta^0_{ij})] + G_{ij} [E'_{dj} \cos(\sigma_k + \delta^0_{ij}) + E'_{qj} \sin(\sigma_k + \delta^0_{ij})] \quad (IV-32)$$

$$\frac{\partial f'}{\partial e_{dj}} = B_{ij} [E'_{di} \sin(\sigma_k + \delta^0_{ij}) + E'_{qi} \cos(\sigma_k + \delta^0_{ij})] + G_{ij} [E'_{di} \cos(\sigma_k + \delta^0_{ij}) - E'_{qi} \sin(\sigma_k + \delta^0_{ij})] \quad (IV-33)$$

$$\frac{\partial f'}{\partial e_{qi}} = B_{ij} [E'_{qj} \sin(\sigma_k + \delta^0_{ij}) + E'_{dj} \cos(\sigma_k + \delta^0_{ij})] + G_{ij} [E'_{qj} \cos(\sigma_k + \delta^0_{ij}) - E'_{dj} \sin(\sigma_k + \delta^0_{ij})] \quad (IV-34)$$

$$\frac{\mathcal{J}'}{\mathcal{E}_{qj}} = B_{ij} [E'_{qi} \sin(\sigma_k + \delta_{ij}^0) - E'_{di} \cos(\sigma_k + \delta_{ij}^0)] + G_{ij} [E'_{qi} \cos(\sigma_k + \delta_{ij}^0) + E'_{di} \sin(\sigma_k + \delta_{ij}^0)] \quad (IV-35)$$

$$\frac{\mathcal{J}'}{\mathcal{P}_{mi}} = -\frac{M_j}{M_i + M_j} \quad (IV-36)$$

$$\frac{\mathcal{J}'}{\mathcal{P}_{mj}} = \frac{M_i}{M_i + M_j} \quad (IV-37)$$

O valor de σ_{STNk} é obtido de (IV-28), considerando-se, como no caso MBI, que, principalmente no caso de curto circuito e na primeira oscilação, a STN é aproximada com e_q positivo, portanto em região em que

$$\sigma_k + \delta_{ij}^0 \approx \pi \quad (IV-38)$$

sendo razoável admitir

$$\cos(\sigma_k + \delta_{ij}^0) \approx 1 \quad (IV-39)$$

de onde

$$\mu_k^{\Delta} = \sin(\sigma_k + \delta_{ij}^0) \cong \frac{P_{ek}^0 + \frac{1}{M_i + M_j} (M_j p_{mi} - M_i p_{mj}) + G_{ij} (E'_{di} E'_{dj} + E'_{qi} E'_{qj}) + B_{ij} (-E'_{di} E'_{qj} + E'_{dj} E'_{qi})}{B_{ij} (E'_{di} E'_{dj} + E'_{qi} E'_{qj}) - G_{ij} (-E'_{di} E'_{qj} + E'_{dj} E'_{qi})} \quad (IV-40)$$

e

$$\cos(\sigma_k + \delta_{ij}^0) = -\sqrt{1 - \mu_k^2} \quad (IV-41)$$

Reunindo os resultados, têm-se

$$\begin{aligned} \dot{E}_{qk} = & \omega_k \left\{ B_{ij} \left[-(E'_{di} E'_{dj} + E'_{qi} E'_{qj}) \sqrt{1 - \mu_k^2} - (-E'_{di} E'_{qj} + E'_{dj} E'_{qi}) \mu_k \right] + G_{ij} \left[-(E'_{di} E'_{dj} + E'_{qi} E'_{qj}) \mu_k + (-E'_{di} E'_{qj} + E'_{dj} E'_{qi}) \sqrt{1 - \mu_k^2} \right] \right\} + \\ & + \dot{e}_d \left[B_{ij} (E'_{dj} \mu_k + E'_{qi} \sqrt{1 - \mu_k^2}) + G_{ij} (-E'_{dj} \sqrt{1 - \mu_k^2} + E'_{qi} \mu_k) \right] + \\ & + \dot{e}_q \left[B_{ij} (E'_{di} \mu_k - E'_{qi} \sqrt{1 - \mu_k^2}) + G_{ij} (-E'_{di} \sqrt{1 - \mu_k^2} - E'_{qi} \mu_k) \right] + \\ & + \dot{e}_{qj} \left[B_{ij} (E'_{qj} \mu_k - E'_{dj} \sqrt{1 - \mu_k^2}) + G_{ij} (-E'_{qj} \sqrt{1 - \mu_k^2} - E'_{dj} \mu_k) \right] + \\ & + \dot{e}_{qj} \left[B_{ij} (E'_{qj} \mu_k + E'_{di} \sqrt{1 - \mu_k^2}) + G_{ij} (-E'_{qj} \sqrt{1 - \mu_k^2} + E'_{di} \mu_k) \right] - \\ & - \frac{M_j}{M_i + M_j} \dot{p}_{mi} + \\ & + \frac{M_i}{M_i + M_j} \dot{p}_{mj} \end{aligned} \quad (IV-42)$$

IV.3.3 - Identificação dos pares críticos.

Tendo em vista que há, em um sistema de n máquinas, $m = \frac{n(n-1)}{2}$ pares de máquinas, a monitoração da trajetória do sistema em relação a todas as STN's empregando (IV-42) requer

um montante considerável de esforço computacional. Faz-se então desejável a redução deste esforço e, em primeira instância, reduz-se o número de pares a observar para $n-1$ adotando uma das máquinas como referência, e tomando os pares em que esta participa, retendo-se assim para análise justamente o número mínimo necessário de pares a observar: um conjunto linearmente independente. A máquina escolhida é a que apresenta a menor aceleração no instante da aplicação da falta.

Além disto, uma redução adicional pode ser obtida através da observação de que os pares mais críticos são aqueles cujas dinâmicas determinam, ou, pelo menos, influenciam mais expressivamente o comportamento transitório do sistema global. Neste sentido, e sendo estes os pares mais solicitados no regime transitório, assume-se que o desenvolvimento da energia potencial armazenada no regime transitório é também expressivamente influenciada pelas energias destes pares. Escolhe-se, então, para o monitoramento da trajetória, os pares cujas energias potenciais V_{pk} estejam mais próximas de máximo no instante em que a energia potencial total do sistema V_p passa por máximo. Para esta avaliação, calcula-se

$$\zeta_k = \frac{|\dot{V}_{pk}|}{V_{pk}^2} \quad (\text{IV-43})$$

sendo

$$\begin{aligned} \dot{V}_{pk} &= \nabla^T V_{pk} \dot{x}_k = \\ &= (\omega_i - \omega_j) f(\sigma_k, e_d, e_q) + \left(p_{3di} e_{di} - \frac{1}{p_{3di}} h_i \right) \dot{e}_{di} + \left(p_{3dj} e_{dj} - \frac{1}{p_{3di}} h_j \right) \dot{e}_{dj} + \\ &+ \left(p_{3qi} e_{qi} + \frac{1}{p_{3qi}} g_i \right) \dot{e}_{qi} + \left(p_{3qj} e_{qj} + \frac{1}{p_{3qi}} g_j \right) \dot{e}_{qj} + p_{5RVi} \dot{p}_{mi} + p_{5RVj} \dot{p}_{mj} + \\ &+ p_{6RVi} \dot{y}_{li} + p_{6RVj} \dot{y}_{lj} \end{aligned} \quad (\text{IV-44})$$

IV.3.4 - Estabilidade na fronteira da RSP: aceleração relativa.

Observa-se que, em certas circunstâncias, ao contrário do sistema MBI, a trajetória pode retornar à RSP após "sair". Isto é natural, visto que a definição da RSP não levou em conta as interações de cada par de máquinas com o restante do sistema, e estas interações podem determinar comportamento estável do sistema mesmo após a trajetória deixar momentaneamente a RSP. Para evitar esta possibilidade de erro, considera-se a aceleração relativa do par de máquinas, agora calculada com todas as interações existentes no sistema

$$a_t = \frac{\sigma_t}{|\sigma_t|} \left(\dot{\omega}_r - \dot{\omega}_s \right) \quad (\text{IV-45})$$



e calculada quando a trajetória do sistema ultrapassa uma das fronteiras da RSP, como apresentado no algoritmo a seguir.

IV.3.5 - O algoritmo para o teste de estabilidade.

Reunindo as idéias que foram colocadas, o algoritmo de teste de estabilidade é formulado a seguir, considerando:

- a) a falta se instala no instante $t = 0$;
- b) a eliminação da falta (final do regime de falta - início do regime pós-falta) ocorre em $t = t_{ch}$;
- c) o regime pós-falta inicia com V_p crescente;
- d) V_p passa por um máximo em $t = t_M (> t_{ch})$.

O algoritmo

Passo 0. Em $t = 0^+$, identificar a máquina de menor aceleração, seja a n -ésima, como referência. Os pares a observar serão: $(1,n)$, $(2,n)$, ..., $(n-1,n)$.

Passo 1. Monitorar a trajetória do sistema até $t = t_M$. Neste instante, avaliar os ζ_k dos pares sob observação. Apontar aqueles de $|\zeta_k| < \zeta_{K_{máx}}$ (vide "Observação"), formando o conjunto dos pares mais críticos:

$$L = \{ \ell = (r,s) : |\zeta_\ell| < \zeta_{\ell_{máx}} \} \quad (IV-45)$$

Passo 2. Continuar a monitoração da trajetória observando os pares de L , com as considerações a seguir:

- a) alguma das RTPM's ou STN_ℓ é ultrapassada com:
 - a.1) $a_\ell > 0$, concluindo-se pela **INSTABILIDADE**;
 - a.2) $a_\ell \leq 0$, nada se concluindo. Inclui-se este(s) par(es) no conjunto L_e dos pares ℓ externos à RSP. Continua-se a monitoração.
- b) Todos os d_ℓ passam por um mínimo. Se, quando isto ocorre, o ponto atual da trajetória está localizado no:
 - b.1) interior da RSP: conclui-se pela **ESTABILIDADE**;



b.2) exterior da RSP, nada se concluindo.
 Prossegue-se a monitoração até que:

1º) a trajetória reingresse na RSP, recaindo em (b.1); ou,

2º) para algum par de L_e , $a_{Le} > 0$, concluindo-se pela **INSTABILIDADE**.

Observação: O número de pares mais críticos apontados no passo 1 depende da escolha do valor de $\zeta_{\max}$ como

$$\zeta_{\max} = \alpha \zeta_{\min}$$

sendo $\alpha > 1$ (ex.: $\alpha = 10$) e $\zeta_{\min}$ o mínimo entre os valores de ζ_k calculados.

IV.3.6 - Conclusão.

Neste capítulo foram apresentados os desenvolvimentos que conduziram aos testes de estabilidade transitória, nas versões dedicadas ao sistema MBI e SM.

O próximo capítulo apresenta exemplos de aplicações, mostrando a validade e a eficácia do método desenvolvido.

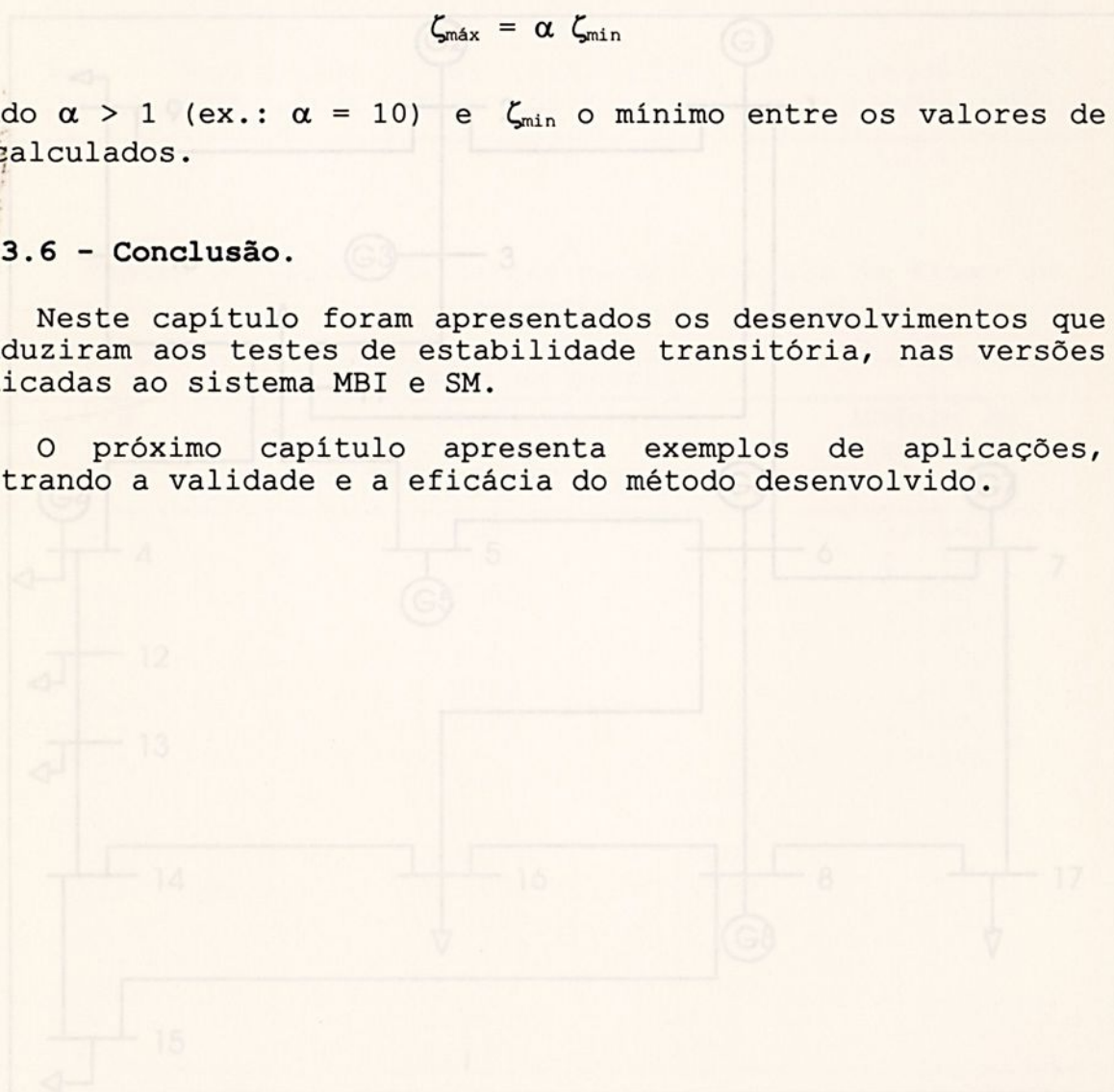


Figura 1 - Diagrama unifilar do sistema.

Capítulo V

EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Com o objetivo de ilustrar e validar a teoria desenvolvida nos capítulos anteriores, apresentam-se a seguir algumas aplicações do método proposto. Como sistema exemplo, utiliza-se um sistema de 8 máquinas, descrito a seguir através de seu diagrama unifilar e dados numéricos mostrados em tabelas.

Sistema de 08 máquinas, 17 barras e 23 linhas

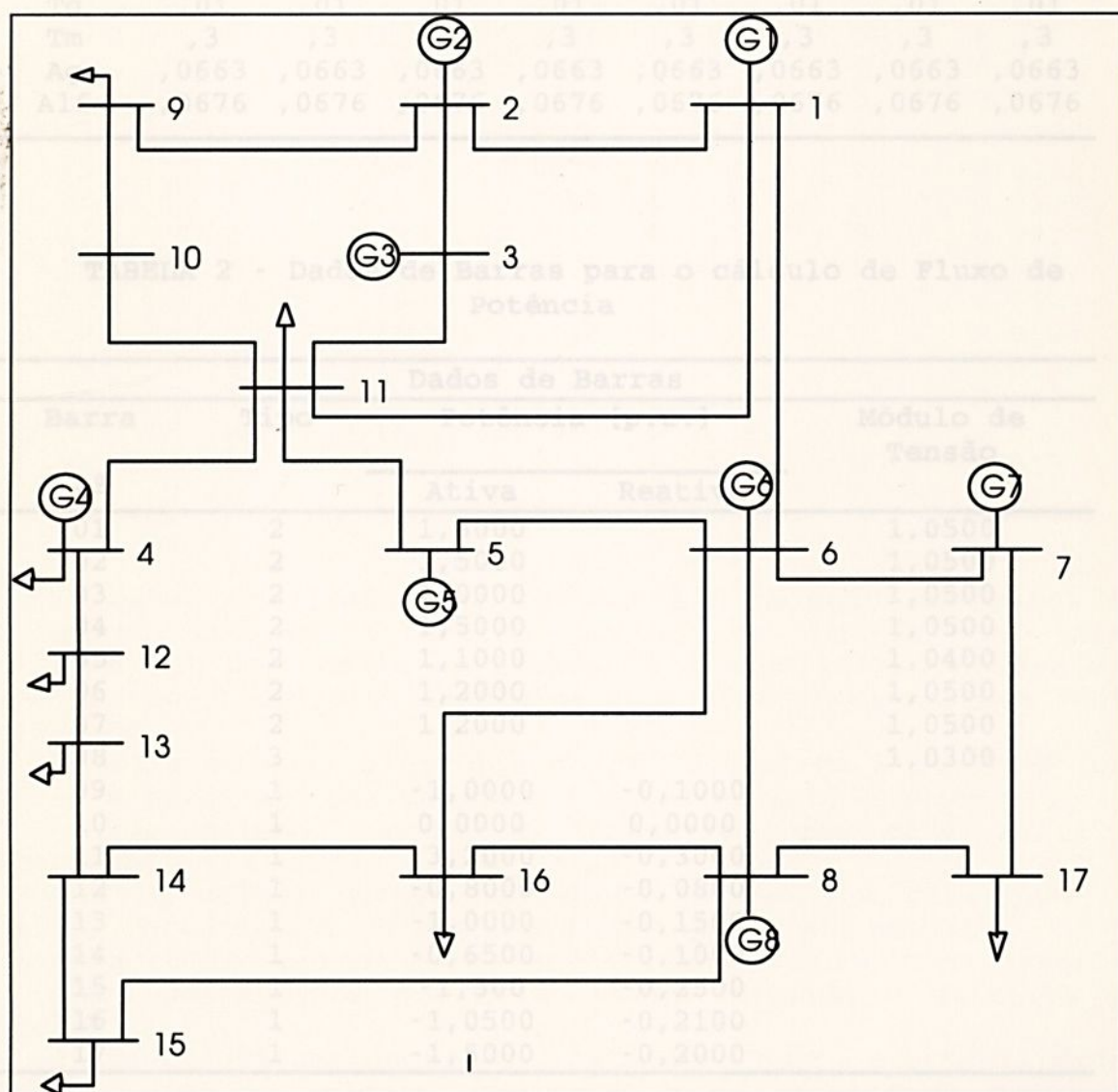


Figura 1 - Diagrama unifilar do sistema.

TABELA 1 - Dados de Máquinas

Dados de Máquinas								
Máq.	1	2	3	4	5	6	7	8
x_d	,4000	,4200	,5800	,4600	,5000	,6000	,7200	,6500
[p.u.]								
x'_d	,1000	,1200	,1600	,1500	,1500	,2000	,1800	,2200
[p.u.]								
M [s ²]	,0159	,0186	,0212	,0170	,0265	,0239	,0159	,0318
D [s]	,0060	,0070	,0080	,0060	,0090	,0080	,0070	,0150
T'_{d0} [s]	6,00	5,60	6,40	6,60	6,00	6,50	6,00	5,50
T'_{q0} [s]	0,5	0,46	0,53	0,5	0,45	0,5	0,5	0,45
K_R	20,00	20,00	24,00	22,00	20,00	23,00	22,00	22,00
T_R [s]	,08	,10	,08	,080	,10	,08	,08	,10
T_g	,01	,01	,01	,01	,01	,01	,01	,01
T_m	,3	,3	,3	,3	,3	,3	,3	,3
A_g	,0663	,0663	,0663	,0663	,0663	,0663	,0663	,0663
Alf	,0676	,0676	,0676	,0676	,0676	,0676	,0676	,0676

TABELA 2 - Dados de Barras para o cálculo de Fluxo de Potência

Dados de Barras				
Barra	Tipo	Potência [p.u.]		Módulo de Tensão
n ^o		Ativa	Reativa	
01	2	1,8000		1,0500
02	2	1,5000		1,0500
03	2	1,0000		1,0500
04	2	1,5000		1,0500
05	2	1,1000		1,0400
06	2	1,2000		1,0500
07	2	1,2000		1,0500
08	3			1,0300
09	1	-1,0000	-0,1000	
10	1	0,0000	0,0000	
11	1	-3,2000	-0,3000	
12	1	-0,8000	-0,0800	
13	1	-1,0000	-0,1500	
14	1	-0,6500	-0,1000	
15	1	-1,500	-0,2500	
16	1	-1,0500	-0,2100	
17	1	-1,5000	-0,2000	

TABELA 3 Dados de Linhas de Transmissão.

Dados de Linhas de Transmissão						
Linha n ^o	Barra		Zsérie		Yshunt	
	Inicial	Termina	Resist.	Reat.	Condut.	Suscept
		1				.
01	2	9	0,0180	0,1443	0	0,012
02	1	2	0,0220	0,1623	0	0,012
03	9	10	0,0100	0,0529	0	0,005
04	2	3	0,0148	0,0802	0	0,032
05	10	11	0,0260	0,1770	0	0,010
06	3	11	0,0120	0,0903	0	0,014
07	1	11	0,0118	0,0535	0	0,034
08	1	6	0,0185	0,1465	0	0,010
09	4	11	0,0152	0,1153	0	0,012
10	4	12	0,0347	0,2824	0	0,002
11	12	13	0,0111	0,0848	0	0,030
12	13	14	0,0068	0,0848	0	0,030
13	14	15	0,0076	0,0784	0	0,035
14	5	11	0,0094	0,0784	0	0,035
15	5	6	0,0118	0,1270	0	0,001
16	6	7	0,0075	0,0541	0	0,040
17	14	16	0,0138	0,1101	0	0,010
18	8	16	0,0116	0,1024	0	0,010
19	8	17	0,0017	0,1559	0	0,010
20	7	17	0,0174	0,1443	0	0,010
21	6	16	0,0166	0,1038	0	0,010
22	6	8	0,0150	0,1348	0	0,010
23	8	15	0,0110	0,1038	0	0,010

Os testes realizados compreendem a simulação de faltas do tipo curto-circuito trifásico sólido em barras da rede, eliminadas por desconexão de linhas de transmissão. A Tabela 4 mostra os resultados organizados de modo a proporcionar uma fácil compreensão:

- a) na primeira coluna, o asterisco (*) identifica a barra em que ocorre a falta e o par mostrado identifica a LT chaveada; .
- b) a segunda coluna contém os tempos em que cada falta é eliminada;
- c) a terceira coluna contém os tempos em que, em cada caso, a Energia Potencial V_p do sistema global passa por máximo;
- d) a quarta coluna apresenta os pares identificados como críticos em ordem decrescente de "criticidade" segundo o critério do método;
- e) na quinta coluna apresenta-se a conclusão sobre a estabilidade/instabilidade de primeira oscilação e o instante de tempo em que esta ocorre;
- f) na sexta coluna figura(m) a(s) máquina(s) que perde(m) o sincronismo no caso de conclusão pela instabilidade; e,

g) na sétima coluna, o tipo de fronteira violada no caso de instabilidade.

Tabela 4 - Resultados de simulações.

Barra Falta (*) e LT chaveada	Tempo de chav ^{nto} t_{ch} (s)	Tempo máx. V_p t_M (s)	Pares Críticos	Conclusão:		Máquina(s) que perde(m) sincroni smo	Fron- teira vio- lada
				Estável/ Instável	Tem po		
2* - 9	0,24	0,25	2-3	EST.	0,34	-	-
2* - 9	0,25	0,26	2-3	INST	0,30	2	STN
2 - 9*	0,80	0,81	2-6; 5-6	EST	0,94	-	- (2)
5* - 6	0,38	0,85	5-8	EST	0,85	-	-
5* - 6	0,39	0,64	5-8	INST	0,87	5	RTPM
5 - 6*	0,44	0,95	6-8;5- 8;1-8;7- 8;	EST	0,97	-	-
5 - 6*	0,45	0,77	6-8;7- 8;1-8;5-8	INST	0,83	6	STN
3* - 11	0,35	0,36	3-8;5- 8;2-8;4- 8;1-8	EST	0,58	-	RTPM (1)
3* - 11	0,36	0,37	3-8;5- 8;4-8;2- 8;1-8	INST	0,42	3	RTPM
3 - 11*	0,80	0,81	5-8;4- 8;3-8;1- 8;2-8;6- 8;7-8	EST	0,81	-	- (2)
6* - 16	0,44	0,65	6-3;7- 3;8-3;1- 3;5-3;4- 3;2-3	EST	0,81	-	-
6* - 16	0,45	0,67	8-3;7- 3;1-3;6- 3;5-3;4- 3;2-3	INST	0,67	6	STN

Observações:

- Os tempos de chaveamento apresentados são, em geral, os limites entre a estabilidade e a instabilidade (com uma margem de 0,01 seg.), visando mostrar o desempenho do método justamente nas situações de fronteira.
- O caso de violação de fronteira da RSP assinalado com (1) foi um caso em que a trajetória momentaneamente abandonou a RSP e posteriormente reentrou a região com conclusão de estabilidade.

Capítulo VI

c) Os casos assinalados com (2) são situações em que, mesmo aumentando-se indefinidamente o tempo de chaveamento, o sistema não perde o sincronismo.

Note-se que, em todos os casos, as simulações e a posterior análise das curvas conduziram a resultados idênticos, ou seja, o teste de estabilidade proposto em todos os casos analisados conduziu a resultados corretos.

A escolha dos pares críticos foi efetuada com $\alpha = 12$ em

$$\zeta_{\max} = \alpha \zeta_{\min}$$

no passo 1 do algoritmo. Têm-se observado nos casos analisados que α pode ter valor substancialmente inferior (p. ex., $\alpha = 5$), resultando em uma redução significativa do número de pares críticos (quando mais de um), sem prejuízo do resultado final.

As complexidades introduzidas no modelo implicaram na redefinição das fronteiras da RSP e, incluindo, além das chamadas Superfícies de Torque Nulo agora modificadas, a definição das denominadas Restrições de Tensões e Potências Mecânicas.

Apesar de ser consideravelmente complexo e envolvente, o método é bastante expedito e eficaz, conforme se observa da qualidade dos resultados obtidos.

Quanto à consideração de outros dispositivos de controle, deve-se observar que, embora não tenha sido considerado explicitamente, não há qualquer impedimento nem dificuldade maior à consideração do Estabilizador de Sistema de Potência (ESP), visto que este dispositivo não afeta as fronteiras da RSP nem a energia potencial do sistema.

A metodologia desenvolvida se presta à análise do comportamento do sistema em um desenvolvimento após uma falta. Por outro lado, é interessante, por exemplo, determinar-se o tempo crítico de eliminação de faltas e o método automático de determinação de tempos críticos desenvolvido em COLVARA (1992) é plenamente aplicável. Partindo-se de uma estimativa inicial obtida como o instante em que o valor da energia transitória do sistema é igual ao máximo valor da energia potencial ao longo da trajetória da falta mantida, refina-se iterativamente o resultado até a convergência dentro de uma certa tolerância pré-estabelecida, utilizando-se o método da RSP. Os resultados são precisos para o modelo considerado, de modo que, no atual estágio dos estudos já se pode tê-los como conclusivos quando se considera efeitos "até transitórios".

A continuidade dos estudos deve evoluir em duas linhas imediatas que são a análise de transientes multioscilações e a inclusão de efeitos subtransitórios nas máquinas síncronas.

Capítulo VI

CONCLUSÃO

O propósito deste trabalho foi constituir-se em mais um passo em busca de se considerar modelos realistas em análise de estabilidade transitória por método automático, visando viabilizar a análise de contingências de modo confiável em procedimentos automatizados. Nesta abordagem procurou-se melhorar o modelo de máquina síncrona considerado, incorporando-se à metodologia da RSP a influência de um enrolamento amortecedor de eixo em quadratura. Com isto, leva-se em conta dinâmica da tensão interna na direção do eixo direto, em adição aos efeitos já considerados do decaimento de fluxo, reguladores de tensão e velocidade. Eliminam-se, também, aproximações que têm sido comumente utilizadas, tais como a tensão E' atrás de X'_d tomada como E'_q (ou proporcional) e o ângulo entre E' e E'_q constante.

As complexidades introduzidas no modelo implicaram em redefinição das fronteiras da RSP e, incluindo, além das chamadas Superfícies de Torque Nulo agora modificadas, a definição das denominadas Restrições de Tensões e Potências Mecânicas.

Apesar de ser consideravelmente complexo e envolvente; o método é bastante expedito e eficaz, conforme se observa da qualidade dos resultados obtidos.

Quanto à consideração de outros dispositivos de controle, deve-se observar que, embora não tenha sido considerado explicitamente, não há qualquer impedimento nem dificuldade maior à consideração do Estabilizador de Sistema de Potência (ESP), visto que este dispositivo não afeta as fronteiras da RSP nem a energia potencial do sistema.

A metodologia desenvolvida se presta a análise do comportamento do sistema em um desenvolvimento após uma falta. Por outro lado, é interessante, por exemplo, determinar-se o tempo crítico de eliminação de faltas e o método automático de determinação de tempos críticos desenvolvido em COLVARA (1992) é plenamente aplicável. Partindo-se de uma estimativa inicial obtida como o instante em que o valor da energia transitória do sistema é igual ao máximo valor da energia potencial ao longo da trajetória de falta mantida, refina-se iterativamente o resultado até a convergência dentro de uma certa tolerância pré-estabelecida, utilizando-se o método da RSP. Os resultados são precisos para o modelo considerado, de modo que, no atual estágio dos estudos já se pode tê-los como conclusivos quando se considera efeitos "até transitórios".

A continuidade dos estudos deve evoluir em duas linhas imediatas que são a análise de transitório multioscilações e a inclusão de efeitos subtransitórios nas máquinas síncronas.

Para a análise de transitório multioscilações, propõe-se a utilização de informações obtidas da energia do sistema ao longo da trajetória enquanto se procede aos testes da RSP: se o valor da energia total do sistema, monotonamente decrescente no período pós-falta, cair abaixo do valor correspondente ao valor da energia potencial do ponto de equilíbrio instável de menor energia potencial sem que a trajetória abandone a RSP, conclui-se que a trajetória é estável.

Por outro lado, a consideração de efeitos subtransitórios demanda ainda algum estudo, mas, a princípio, não se vislumbram impedimentos.

- MIYAGI, H. Transient stability of the power system with the effect of the automatic voltage regulator. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol AC-29 n° 12, p. 1120 - 1122, 1985.
- MIYAGI, H.; BERGEN, A. R. Stability studies of multimachine power systems with the effects of automatic voltage regulators. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol AC-31, n° 3, p. 210 - 215, 1986.
- HSU, L.; COLVARA, L. D. The inclusion of automatic voltage regulators in power system transient stability analysis using Lyapunov functions. World Congress of Automatic Control - IFAC, 10, Munich (WG), 1987.
- COLVARA, L. D.; Análise de estabilidade transitória de sistemas de potência com reguladores automáticos de tensão. Rio de Janeiro, 1988. 134p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- COLVARA, L. D.; HSU, L. (1988). Análise de Estabilidade Transitória de Sistemas de Potência com Reguladores Automáticos de Tensão por Método Direto - Parte I: Máquina vs. Barra Infinita. In: Congresso Brasileiro de Automática, 6º, Belo Horizonte (MG), Anais, p. 83 - 88.
- COLVARA, L. D.; HSU, L. (1988). Análise de Estabilidade Transitória de Sistemas de Potência com Reguladores Automáticos de Tensão por Método Direto - Parte II: Sistemas Multimáquinas. In: Congresso Brasileiro de Automática, 6º, Belo Horizonte (MG), Anais, p. 89 - 94.
- COLVARA, L. D. & HSU, L. - "Análise de Estabilidade Transitória de Sistemas de Potência com Reguladores Automáticos de Tensão Usando Funções de Lyapunov". CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 8º, Belém, 1990. Anais, Belém, EBA, 1990. p. 826-831; e In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE AUTOMÁTICA, 4º, Cidade do México, 1990. p. 541-546.
- RAZKUREWICZ, E.; HSU, L. Stability of nonlinear systems: a structural approach. Automatica, Vol. 15, p. 609 - 614, 1979.
- SILJAK, D. Large Scale Dynamic Systems. North-Holland, New York, 1978.
- COLVARA, L. D. Análise de estabilidade transitória de sistemas de potência por método direto incluindo os efeitos dos enrolamentos de campo e amortecedor de eixo Q. Congresso Brasileiro de Automática, 8, Belém (PA), Anais Vol. 2, p. 820 - 825, 1990.

REFERÊNCIAS

- PAI, M.A. - Power system stability: analysis by the direct method of lyapunov. Amsterdam: North-Holland Systems and Control, 1981. 251 p.
- RIBBENS-PAVELLA, M.; EVANS, F. J. Direct methods for styding dynamics of large-scale electric power systems - a Survey. **Automática**, Vol. 21, nº 1, 1985.
- KAKIMOTO, N.; OSAWA, Y.; HAYASHI, M. Transient stability anlysis of multimachine power systems with field flux decay via Lyapunov's direct method. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS 99, p 1819 - 1827, 1980.
- MIYAGI, H. Transient stability of the power system with the effect of the automatic voltage regulator. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol AC-29 nº 12, p. 1120 - 1122, 1985.
- MIYAGI, H.; BERGEN, A. R. Stability studies of multimachine poweer systems with the effects of automatic voltage regulators. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol AC-31, nº 3, p 210 - 215, 1986.
- HSU, L.; COLVARA, L. D. The inclusion of automatic voltage regulators in power system transient stability analysis using Lyapunov functions. World Congress of Automatic Control - IFAC, 10, Munich (WG), 1987.
- COLVARA, L.D.; Análise de estabilidade transitória de sistemas de potência com reguladores automáticos de tensão. Rio de Janeiro, 1988. 134p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)- Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- COLVARA, L.D.; HSU, L. (1988). Análise de Estabilidade Transitória de Sistemas de Potência com Reguladores Automáticos de Tensão por Método Direto - Parte I: Máquina vs. Barra Infinita. In: : Congresso Brasileiro de Automática, 6º, Belo Horizaonte (MG), Anais, p 83 - 88
- COLVARA, L.D.; HSU, L. (1988). Análise de Estabilidade Transitória de Sistemas de Potência com Reguladores Automáticos de Tensão por Método Direto - Parte II: Sistemas Multímáquinas. In: : Congresso Brasileiro de Automática 6º, Belo Horizaonte (MG), Anais, p 89 - 94.
- COLVARA, L.D & HSU, L. - "Análise de Estabilidade Transitória de Sistemas de Potência com Reguladores Automáticos de Tensão Usando Funções de Lyapunov". CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 8-, Belém, 1990. Anais. Belém, SBA, 1990. p. 826-831; e In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE AUTOMÁTICA, 4º-, Cidade do México, 1990. p. 541-546.
- KASZKUREWICZ, E.; HSU, L.; Stability of nonlinear systems: a structural approach. Automatica, Vol. 15, p.609 - 614, 1979.
- SILJAK, D. Large Scale Dynamic Systems. North-Holand, New York, 1978
- COLVARA, L. D. Análise de estabilidade transitória de sistemas de potência por método direto incluindo os efeitos dos enrolamentos de campo e amortecedor de eixo Q. Congresso Brasileiro de Automática, 8, Belém (PA), Anais Vol. 2, p. 820 - 825, 1990.



KIMBARK, E. W. Power system stability: synchronous machines. Dover Publications, Inc, New York, 1968. 322 p.

COLVARA, L. D. Determinação direta de tempos críticos de eliminação de defeitos em sistemas de potência com reguladores automáticos de tensão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 1992, Vitória. Anais... Vitória, 1992, p. 280-285.

HSU, L.; KASZKUREWICZ, E. Structural approach applied to power systems analysis. IFAC/IFORS'85, Beijing, China.

ARRILAGA, J; ARNOLD, C.P. Computer analysis of power system. University of Canterbury



