DETERMINAÇÃO DE DOMÍNIOS DE ESTABILIDADE ASSINTÓTICA PARA SISTEMAS DE POTÊNCIA COM N-MÁQUINAS

João Roberto Cogo

Artigo publicado na Revista Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico - Vol. III - nº 3 - pg. 21 a 25/77

RESUMO

Analisa-se a estabilidade em Sistemas de Potência, através do segundo método de Liapunov, usando-se o processo de Newton Raphson para a determinação de domínios de Estabilidade. Propõe-se também, conjugar os métodos numéricos com domínios de estabilidade para obter-se conclusões sobre a estabilidade em Sistemas de Potência.

ABSTRACT

The Stability of a Power System is analyzed by means of Lyapunov's second method. A Newton-Raphson process is used for the determination of stability domains. It is also proposed to conjugate the numerical methods with stability domains in order to estabilish conclusions regarding stability in Power Systems.

I - INTRODUÇÃO

Pode-se estudar a estabilidade em Sistemas de Potência através de Métodos Numéricos, Plano de Fase, Áreas Iguais e via o Segundo Método de Liapunov. Enquanto o primeiro, mostra-se capaz de analisar a estabilidade para sistemas com n-máquinas podendo incluir modelos completos para as máquinas síncronas, o segundo e terceiro métodos estão restrito a três e duas máquinas respectivamente. Já o Segundo Método de Liapunov pode ser usado em Sistemas de Potência com n-máquinas, considerando o modelo clássico, para as máquinas síncronas, não sendo necessário o conhecimento explícito das soluções das equações diferenciais que regem o comportamento do Sistema de Potência durante o período transitório.

II - ESCOLHA DA FUNÇÃO DE LIAPUNOV

Uma função de Liapunov que trouxe bons resultados para o estudo de estabilidade em Sistemas de potência foi a função energia [1]. Assim, embora existam outros tipos de funções, usadas como função de Liapunov na Literatura, preferiu-se o uso da Energia do Sistemas de Potência como função de Liapunov.

Considerando-se o modelo clássico para as máquinas síncronas e desprezando-se as perdas no sistema de transmissão reduzido a barras internas de geração, as equações para o movimento dos ângulos dos rotores de n-máquinas interligadas será [2]:

$$M_i \frac{d^2\delta_i}{dt} + d_i \frac{d\delta_i}{dt} + \sum_{j=1}^{n} b_{ij}\left(\frac{d\delta_i}{dt} - \frac{d\delta_j}{dt}\right) + $$
$$+Pe_i - Pm = 0 \quad i = 1, 2, ..., n \qquad (1)$$

onde:

t - tempo;

δ_i - ângulo em graus elétricos entre o eixo do rotor da i-ésima máquina e um eixo girando a uma velocidade de referência;

M_i - constante de inércia da i-ésima máquina;

d_i - coeficiente de amortecimento da i-ésima máquina;

b_{ij} - constante de amortecimento assíncrono;

P_{mi} - coeficiente de amortecimento da i-ésima máquina;

P_{ei} - potência elétrica entregue pela i-ésima máquina, dada por:

$$P_{ei} = G_{ii} E_1^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} \left|E_i E_j\right| B_{ij} \operatorname{sen}\left(\delta_i - \delta_j\right) \qquad (2)$$

onde:

E_i - tensão na barra interna da i-ésima máquina;

G_{ii} - carga equivalente na i-ésima barra de geração;

B_{ij} - susceptância de transferência entre a barra interna da i-ésima e de j-ésima máquina;

Por conveniência escreve-se:

$$F_{ij} = \left|E_i E_j\right| B_{ij} \text{ e } P_i = Pm_i - G_{ii} E_1^2 \qquad (3)$$

Usando-se a seguinte mudança de variáveis [2]:

$$\alpha_i = \delta_i - \delta_n \quad i = 1, 2, ...(n-1) \qquad (4.a)$$

$$\omega_i = \dot{\delta}_i \quad i = 1, 2, ... n \qquad (4.b)$$

pode-se escrever a função energia potencial para o sistema (1), como:

$$E_p = \sum_{i=1}^{n-2} F_{ij}\,[-\cos(\alpha_i - \alpha_j) + \cos(\alpha_i^e - \alpha_j^e) -$$
$$-(\alpha_i - \alpha_j - \alpha_i^e + \alpha_j^e)\cdot \operatorname{sen}(\alpha_i^e - \alpha_j^e)] +$$
$$+ \sum_{i=1}^{n-2} F_{in}\left[-\cos\alpha_i + \cos\alpha_i^e + (\alpha_i - \alpha_i^e)\operatorname{sen}\alpha_i^e\right] \quad (5)$$

onde α_i^e i = 1, 2, ..., (n - 1) são as componentes do ponto de equilíbrio, sendo obtidas fazendo-se em (1) $Pm_i = Pe_i$ i = 1, 2, ..., n.

A função energia cinética é dada por:

$$E_c = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} M_i\omega_i \quad (6)$$

e a expressão da energia total será:

$$V = E_c + E_p \quad (7)$$

III - DETERMINAÇÃO DE DOMÍNIOS DE ESTABILIDADE

Considerando-se um politopo L dado por:

$$L = \begin{cases} -\pi - \alpha_i^e \le \alpha_i^e \le \quad \pi - \alpha_i^e \\ -\pi - (\alpha_i^e - \alpha_j^e) \le (\alpha_i\ \alpha_j) \le \pi - (\alpha_i^e - \alpha_j^e) \end{cases}$$
$$i \cdot j = 1, 2, \ldots, (n-1)\, i \ne j$$

e assumindo que $|\alpha_i^e| < \frac{\pi}{2}$ e $|\alpha_i^e - \alpha_j^e| < \frac{\pi}{2}$

i . j = 1, 2, ..., (n – 1) i ≠ j, a energia total pode ser usada como função de Liapunov na região definida por:

$$B = \left\{ \left|{}^{\omega}_{\alpha}\right| / \alpha^{\varepsilon} LCR^{n-1} \cdot \omega\varepsilon R^{n} \right\}$$

Como em pontos da forma $[0\ .\ \alpha]^t$, $V = E_p$ e notando-se que os pontos de equilíbrio são desta forma, ainda lembrando que E_c é uma forma quadrática segue que a região de validade de V como função de Liapuvnov pode ser obtida apenas com considerações sobre E_p. Assim a determinação de domínios de estabilidade pode ser colocada como o problema de otimização:

$$E_p^* = \min_{\alpha} \{E_p\} \quad (8)$$
$$\text{s.a. } \alpha\ \varepsilon\,\delta_L$$

ou seja encontrar o mínimo valor da E_p na fronteira do politopo L. Então o domínio de Estabilidade será o conjunto de nível.

$$K = \left\{ \left|{}^{\omega}_{\alpha}\right| / V\left(|\omega, \alpha|^t\right) \le E_p^*, \alpha\varepsilon LCR^{n-1}, \omega\varepsilon R^n \right\} \quad (9)$$

Como o polígono L é constituído de faces, W_k, resolver (8) significa também encontrar

$$\min_{k} \{ \min_{\substack{\alpha \\ \alpha\varepsilon W_k}} \{E_p\} \} \quad (9)$$

e o algoritmo para resolver (9) será [1]

PASSO 1:

Construa a lista A de vetores $S = |\rho_k, k, r|$

PASSO 2:

Ordene a lista A seguindo os valores crescentes da primeira componente. S_i^j dos vetores S^j.

PASSO 3:

Tome S_i^j, o hiperplano que contém a face W_k correspondente e encontre K_2^1, valor de E_p solução de (9) neste hiperplano. Se existe tangência vá ao PASSO 4. Se não, faça $p_k \to \infty$ e vá ao PASSO 2.

PASSO 4:

Compare k_2^1 com a primeira componente S_1^2 do vetor S^2 da Lista A. Se k_2^1 é menor PARE. Se não for, troque S_i^1 por k_2^1 e volte ao PASSO 2.

onde no algoritmo os p_k, são parcelas do tipo.

$$p_k(\alpha) = F_{ij}\left[-\cos(\alpha_1 - \alpha_j) + \cos(\alpha_i^e - \alpha_j^e)\right] -$$
$$-(\alpha_1 - \alpha_j - \alpha_i^e + \alpha_j^e)\operatorname{sen}(\alpha_1^e - \alpha_j^e)$$

e r = 1 ou r = - 1. Para r = 1 a face W_k correspondente será $\pi - \alpha_k^e$ ou $\pi - (\alpha_i^e - \alpha_j^e)$ e para r = - 1 a face W_k correspondente será $\pi - \alpha_k^e$ ou $-\pi - (\alpha_1^e - \alpha_j^e)$.

Para encontrar o ponto de tangência de E_p com o hiperplano que contém a face W_k, usou-se para resolver este problema o processo de Newton-Paphson devido ao comportamento E_p semelhante a uma quadrática no interior do polítopo L [2].

Os resultados encontrados em [2] comparados aos existentes na literatura mostram-se adequados, não fornecendo resultados super estimativos, nem resultados com incertezas, apresenta também a possibilidade de usar o resultado da primeira iteração do problema de otimização para encontrar o ponto de tangência ([2]), economizando com isto tempo de computação para a análise de estabilidade, principalmente onde os testes de estabilidade devam ser efetuados muitas vezes como é o caso de planejamento.

IV - UTILIZAÇÃO CONJUNTA DE DOMÍNIOS DE ESTABILIDADE E MÉTODOS NUMÉRICOS

4.1 - INTRODUÇÃO

A necessidade do estudo de estabilidade transitória decorre da necessidade de se operar os Sistemas de Potência, mesmo sob certas condições de defeito, como mudança de estrutura, perda de geração ou carga etc.

De um modo geral pode-se reconhecer três tipos de situações para um Sistema de Potência:

- a) Antes de um defeito;
- b) Durante o defeito;
- c) Após o defeito.

Os outros casos, com em religamento por exemplo, formam-se combinações destas situações.

Quando se deseja saber se uma condição inicial é estável ou não, se o tempo crítico de abertura de um equipamento é viável ou não no sentido da estabilidade, os métodos numéricos sem uma interação homem-computador não podem ser utilizados. Contudo, como o domínio de estabilidade dado anteriormente pode não ser suficiente para concluir a estabilidade de uma dada condição inicial, usando-se conjuntamente métodos numéricos e domínios de estabilidade pode-se melhorar os inconvenientes de ambos e até mesmo o domínio de estabilidade dado pelo ponto de equilíbrio instável, visto que os domínios de estabilidade que pode-se obter são subconjuntos do domínio de estabilidade exato.

Assim sendo propõem-se um estudo conjunto de métodos numéricos e domínios de estabilidade, visando a análise da estabilidade em Sistemas de Potência.

4.2 - ALGORITMO DO MÉTODO CONJUNTO

PASSO 1:

Determine o estado no instante que cessa o defeito, (C.I.).

PASSO 2:

Determine o ponto de operação depois do defeito.

PASSO 3:

Obtenha domínio de Estabilidade (D.E.).

PASSO 4:

Teste se (C.I.) $\in$ (D.E)
Sim - pare
Não - vá ao PASSO 5

PASSO 5:

Integre numericamente até alcançar (D.E.).
Sim - pare - Estabilidade para a C.I.
Não - Assume instabilidade

V - CONCLUSÕES

A análise da estabilidade em Sistemas de Potência com n-máquinas, pode ser feita via Métodos Numéricos ou via Segundo Método de Liapunov, tomando-se a energia total do sistema como função de Liapunov. Como é sabido os Métodos Numéricos são procedimentos que necessitam a interação homem - computador para a análise da estabilidade em Sistemas de potência. Por outro lado o Segundo Método de Liapunov conduz a procedimentos que fornecem uma resposta “sim” ou “nada se afirma” para o problema da estabilidade.

Nos casos em que se deseja testar a estabilidade para uma condição inicial, considerada como o estado do sistema no instante final de uma perturbação, foi proposto um procedimento que utiliza os métodos numéricos e o Segundo Método de Liapunov. Este procedimento consiste em utilizar-se o domínio de estabilidade para o estabelecimento de uma regra de parada para a integração numérica das equações diferenciais do sistema em defeito. Com isto elimina-se a interação homem-máquina necessária quando se usa o procedimento numérico e obtém-se um resultado menos conservativo que os resultados dados pelo domínio de estabilidade. A determinação de tempos críticos de abertura de disjuntores para eliminação de defeito é uma aplicação típica deste procedimento. Neste caso consegue-se uma eficiência elevada pois o domínio de estabilidade estabelece uma espécie de condição inicial para o problema da determinação de tempo crítico [2].

CURRICULUM VITAE

João Roberto Cogo - Engenheiro eletricista - EFEI - 1974.

M.Sc. - UFSC - 1977

Auxiliar de Ensino - EFEI - desde 1975.

BIBLIOGRAFIA

[1] Fonseca, L.G.S. - “Determinação de Domínios de Estabilidade para Uso em Planejamento e Operação de Sistemas de Potência” - Tese D.Sc., Coppe, UFRJ, Rio de janeiro, Abril 1976.
[2] Cogo, J.R. - “Determinação de Domínios de Estabilidade para Sistemas de Potência com N-Máquinas” - Tese M.Sc., UFSC, Florianópolis, S.C., Junho 1977.