

Aplicação de um simulador analógico-digital ao estudo de estabilidade de sistemas elétricos de potência

José Everardo Bessa Maia

Uma opção para o uso do computador analógico é apresentada: o simulador digital de sistemas contínuos CSMP. O programa é introduzido e uma aplicação é descrita.

INTRODUÇÃO

É comum aos engenheiros, tanto de análise quanto de projeto, dividirem o sistema em que trabalham, em subsistemas, com funções bem definidas. Estes subsistemas são representados por blocos e permitem que o engenheiro não só tenha uma visão ampla do comportamento do sistema como um todo, mas também da importância de cada bloco, quando funcionando em conjunto com os demais. Desta maneira, uma linguagem de blocos tornou-se de uso corrente nos textos técnicos modernos. Para estes, portanto, é cômodo que disponham de uma ferramenta de trabalho que use esta linguagem específica no estudo de tais sistemas, sendo esta compacta e conhecida por todos. O computador analógico, pela própria organização e funcionamento, traz, em si, um conjunto de tais blocos.

No estudo da dinâmica de sistemas contínuos, descritos por equações diferenciais, a programação de um problema para solução no computador analógico é geralmente mais fácil que a programação do mesmo problema para solução no computador digital. Por algumas décadas os computadores analógicos dominaram a preferência e tiveram, então, um vasto campo de aplicação.

Apesar desta facilidade de programação e flexibilidade, o computador analógico traz consigo algumas dificuldades quanto ao uso, que o tornam enfadonho e até mesmo limitado. Entre estas, podemos citar com destaque, as ne-

cessidades de escalonamento em tempo e amplitude e os problemas que isto acarreta, além da precisão dos resultados e da confiabilidade.

Por outro lado, enquanto os computadores analógicos trabalham com tensões da ordem de 100 volts, os computadores digitais registram números da ordem de 10^{38} à 10^{33} , e apresentam grande confiabilidade e precisão. Isto elimina, essencialmente, a necessidade de escalonamento.

A partir da idéia de que o diagrama de blocos de uso comum entre os cientistas e engenheiros, seria conveniente podermos trabalhar com o computador digital através de uma linguagem de blocos. A idéia foi um programa que simule o computador analógico no computador digital. Portanto, um simulador analógico digital é um programa que modela os elementos e a organização do computador analógico e, contém rotinas numéricas que são equivalentes aos elementos analógicos padrões — integrador, somador, multiplicador, inversor e gerador de funções. Além destes, possui também elementos especiais, que normalmente estão associados a estes elementos padrões — divisor, valor absoluto, limitador . . . Do mesmo modo que os elementos no computador analógico são unidos por ligações elétricas, estes programas possuem uma linguagem de interconecção para ligar as rotinas numéricas analógicas.

Costuma-se datar o ano de 1955 como o do aparecimento do primeiro programa simulador analógico digital. O desenvolvimento cada vez maior da tecnologia de fabricação

Engenheiro Eletricista
Professor em tempo parcial da
UNIFOR, Engenharia Elétrica

do computador digital, veio ampliar a velocidade, capacidade e precisão, paralelamente, e foram-se desenvolvendo os programas de simulação analógico digital. Assim, estes simuladores combinam a facilidade de programação e flexibilidade do computador analógico à precisão e confiabilidade do computador digital.

DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Utilizaremos o simulador CSMP (CONTINUOUS SYSTEM MODELING PROGRAM) para analisar um problema de estabilidade transitória (aproximadamente de 0-1 seg após a perturbação) em um sistema de potência. A situação, embora por demais simplificada, é bastante comum e satisfaz duplamente aos nossos propósitos. Primeiro porque é um problema analisado pela maioria dos livros textos usados a nível de graduação e que, portanto, tornar-se-á acessível a um grande número de estudantes, técnicos e engenheiros interessados.

Segundo porque, embora seja aplicado um grande número de hipóteses simplificadoras, ainda assim, a equação diferencial que rege o problema só possui solução analítica para casos muito particulares e, mesmo nestes, leva-nos à solução de uma integral elíptica. Com isto procura-se mostrar a importância do simulador CSMP, já que, nestes casos, recorre-se ao computador analógico eletrônico ou a algum método de programação digital. Qualquer que seja a solução adotada, a situação exige que o interessado disponha de um computador analógico, ou conheça programação digital e, ainda assim, o tempo de programação seria incomparavelmente superior.

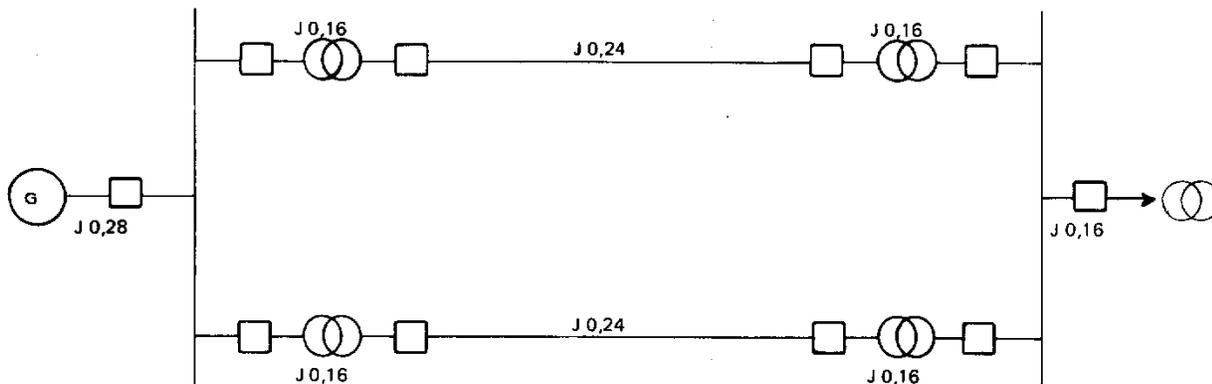


FIG. 1

Considere o sistema mostrado na figura 1.

Este diagrama unifilar mostra um gerador ligado a uma barra de onde saem duas linhas de alta tensão, em paralelo, que alimentam um grande sistema metropolitano considerado como uma barra infinita. As reatâncias das linhas e transformadores são dadas no diagrama em p.u. A reatância transitória do gerador está incluída nestes valores. Os disjuntores colocados nas extremidades das linhas destinam-se a isolar o trecho onde ocorre a falta após um tempo predeterminado. Verifica-se que a permanência ou não em sincronismo do gerador, depende do tempo de abertura destes disjuntores.

Esta situação está analisada, com detalhes, nas referências 1, 2, 3 e 4. Estudemos o comportamento do ângulo do

rotor do gerador em relação à referência que gira à velocidade síncrona, quando ocorre uma falta trifásica simétrica no ponto P, em função do tempo de abertura dos disjuntores.

A equação diferencial que rege o fenômeno, no sistema por unidade, é:

$$(1) M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_t - P_m \sin(\delta) \quad \text{sendo } M = \frac{2GH}{W} \quad (2)$$

onde:

- G — potência nominal do gerador em p.u.
- W — velocidade angular em graus elétricos/segundo.
- P_m — potência elétrica máxima que o gerador pode entregar ao sistema em regime.
- P_t — potência da turbina.
- δ — ângulo do rotor do gerador em relação à referência girando à velocidade síncrona.
- H — Constante de inércia do gerador, incluindo a turbina, em KW.S/KVA.
- M — quantidade de movimento angular, em megajoule-segundo/grau elétrico.

Para chegarmos a este modelo simplificado para o sistema anterior, pelo menos as seguintes hipóteses foram aplicadas ao comportamento do mesmo:

01. A saliência do gerador é considerada desprezível.
02. A potência da turbina permanecerá constante durante o intervalo considerado.
03. A FEM vista atrás da reatância transitória mantém o módulo constante.
04. Todas as resistências são desprezadas.

05. Os conjugados de amortecimento são desprezados.
06. A tensão na barra permanecerá constante os transitórios.
07. A frequência de rede é considerada constante.
08. A abertura dos disjuntores é simultânea.
09. Não há refechamento dos disjuntores.
10. O comportamento do gerador está além da influência dos controladores P_f e Q_v.

Consideremos que nas condições pré falta, o gerador esteja fornecendo uma potência de 1,0 p.u., que a tensão atrás da reatância transitória do gerador seja 1,25 p.u., e que a tensão na barra infinita seja 1,0 p.u. Sabe-se, ainda, que a constante de inércia do gerador, incluindo a turbina, é H = 3, OKW.S/KVA.

A partir destes dados e dos valores de impedância mostrados no diagrama, encontramos os seguintes valores para os parâmetros da equação (1):

$$M = \frac{1}{20}$$

$$P_t = 1,0 \text{ p.u.}$$

$$P_m = 1,735 \text{ p.u., antes da falta.}$$

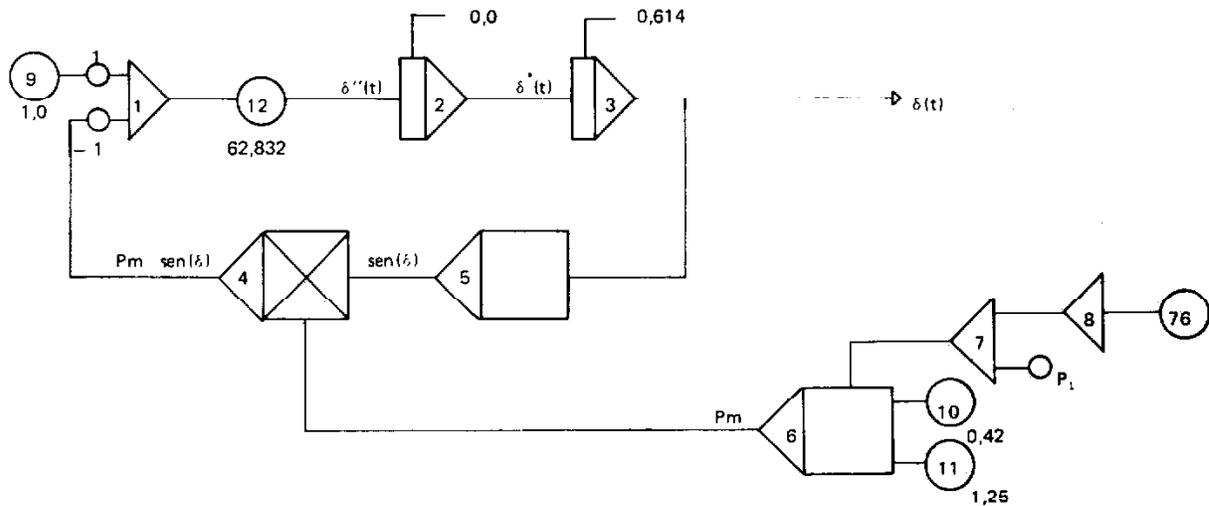
$$P_m = 0,42 \text{ p.u., durante a falta.}$$

$$P_m = 1,25 \text{ p.u., após a falta}$$

Determinamos também para o ângulo de carga inicial $\delta(0) = 0,614 \text{ rad} = 35,2^\circ$.

A equação (1) fica então:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = 20 (1,0 - P_m \text{ sen}(\delta))$$



bilidade se o ângulo δ decresce após atingir um valor máximo.

A SIMULAÇÃO

Observe-se que P_m deverá assumir dois valores diferentes durante o processo de simulação.

Deve-se lembrar que um número razoável de configurações pode ser concebido para o diagrama de simulação, levando-se em conta o funcionamento de cada bloco disponível no CSMP. Também, mais de um artifício pode ser usado para introduzir a mudança no valor de P_m , enquanto o processo de simulação está evoluindo.

Apresentamos o diagrama abaixo que utilizaremos em nosso estudo e onde procuraremos evitar o uso de blocos mais complexos que tornaria o diagrama mais compacto e poderia comprometer o entendimento da função de cada um, na evolução do processo de simulação.

Os gráficos 1, 2 e 3 mostram o comportamento do ângulo do rotor para falta isolada em 0,075; 0,105; 0,11 segundos, respectivamente. Estes valores de tempo correspondem a 4,5; 6 e 6,6 ciclos da onda de 60Hz.

A solução desta equação é chamada curva de oscilação $\delta(t)$. Em geral, considera-se que o sistema não perde a esta-

gundos, respectivamente. Estes valores de tempo correspondem a 4,5; 6 e 6,6 ciclos da onda de 60Hz.

GRÁFICO 1
GRÁF. 1: Comportamento do ângulo δ para a falta isolada em 0,075 seg.

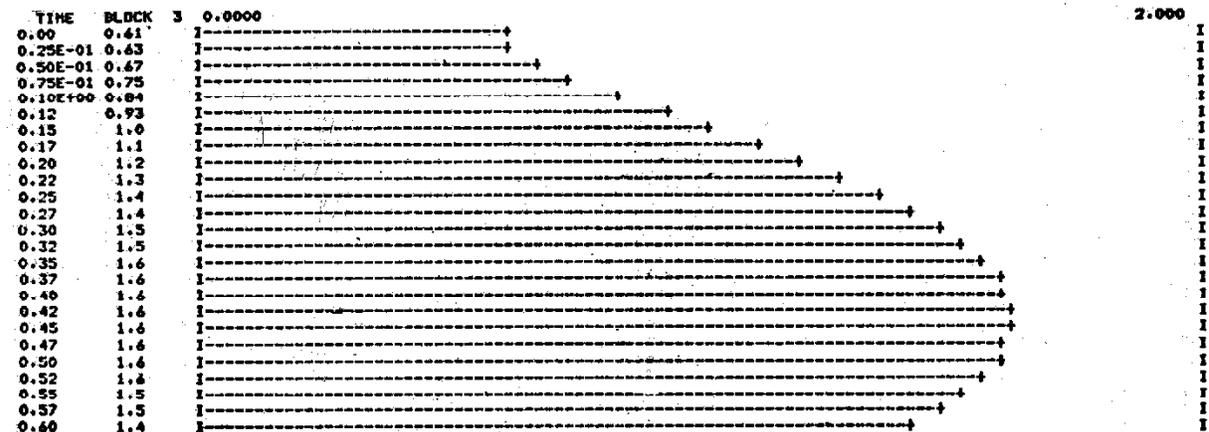


GRÁFICO 2
GRÁF. 2: Comportamento do ângulo δ
para a falta isolada em 0,105 seg.

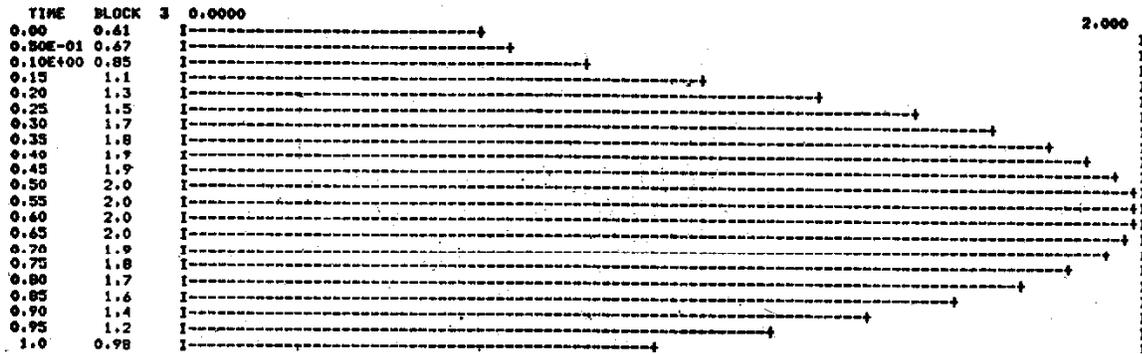
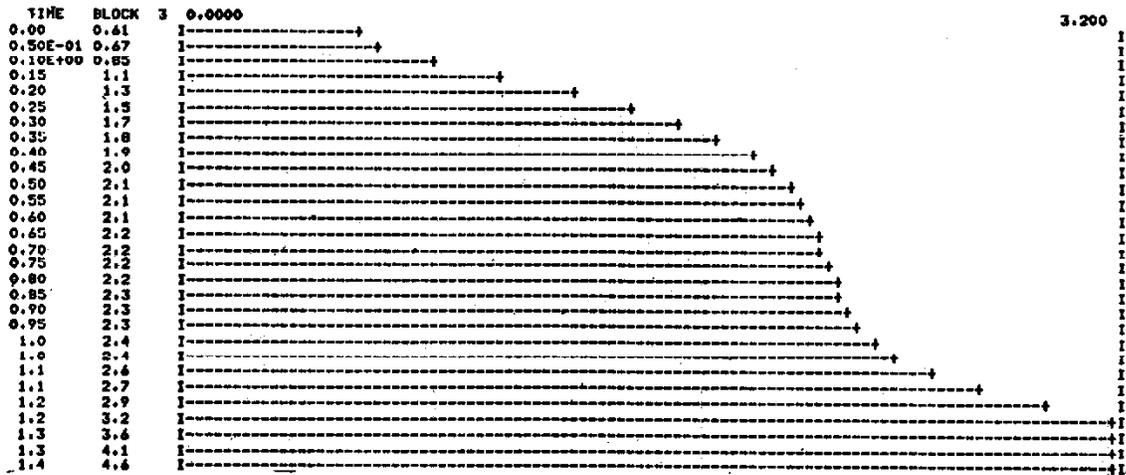


GRÁFICO 3
GRÁF. 3: Comportamento do ângulo δ
para a falta isolada em 0,11 seg.



A determinação do tempo crítico de abertura (tempo máximo além do qual o gerador perde o sincronismo), pode ser feita através destes gráficos, observando-se que o sistema é estável para 0,105 seg e não para uma abertura em 0,11 seg. Concluimos, portanto, com um erro máximo da ordem de 0,005, que o tempo crítico será de 0,11 seg. (Observe-se a mudança de escala de um gráfico para outro).

CONCLUSÕES:

Estudamos a situação simplificada de estabilidade de sistemas de potência. A idéia básica é mostrar a potencialidade dos simuladores analógico digitais no estudo do comportamento dinâmico de sistemas. Concluimos que, no estudo de sistemas modelados por equações diferenciais não lineares, esta ferramenta é de grande valia, devendo seu uso ser implementado e divulgado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- STEVENSON, W. D., *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*. Ed. McGraw-Hill do Brasil, Ltda., 1974.
- HARPER, G. E., *Análisis Moderno de Sistemas Eléctricos de potencia*. Editorial Limusa, México, 1977.
- WEEDY, B. M., *Sistemas Eléctricos de Potência*. Editora da Universidade de São Paulo. Editora Polígono, 1973.
- HARPER, G. E. *Introducción al Análisis de Los Sistemas Eléctricos de Potência*. Segunda Edición. Editorial Limusa, México, 1975.
- ELGERD, O. I., *Introdução a Teoria de Sistemas de Energia Elétrica*. Editora McGraw-Hill do Brasil, 1976.
- LINEBARGER, R. N e BRENNAN, R. D., *A Survey of Digital Simulation: Digital Analog Simulator Programs, Simulation, Dezembro 1964, pp. 22 - 36*.
- LESH, F., *Methods of Simulating a Differential Analyzer on a Digital Computer*; *Jornal da ACM* vol. 5, no. 3, 1958.
- FAHIDY, T. Z. e LUKE, L. A., *Digital Simulation of Chemical Reactor Dynamics. Instruments and Control Systems*. vol. 41, março 1968.
- 1130 Continuous System Modeling Program - *Application Description Manual-IBM*, 3a. Edição, 1969.
- Decus Program Library - *Digital Equipment Corporation, Maynard, Massachusetts, Fevereiro 1971*.