

# Estudo do efeito de impedância de curto-circuito no comportamento dinâmico de um sistema de energia eléctrica.

Carlos M. B. Machado Ferreira<sup>(\*)</sup>

José Américo Dias Pinto<sup>(\*)</sup>

Fernando P. Maciel Barbosa<sup>(\*\*)</sup>

<sup>(\*)</sup> Lab. SEE, Dep. Engenharia Electrotécnica  
Instituto Superior de Engenharia de Coimbra  
Quinta do Nora, 3030 Coimbra

<sup>(\*\*)</sup> Dep. Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Rua dos Bragas, 4099 Porto Codex

## Summary

*In this paper it is studied and analysed the influence of the fault arc in the transient stability of a multimachine electric power system. It was used the software package TRANsySTEM, developed by the authors to study the transient stability of a power network. These computer programs that use the extended equal area criteria, were applied to a power system. Different values of the short-circuit impedance were considered. Finally, the results obtained with this formulation were compared with the solutions produced by the Runge-Kutta method, showing a very close agreement.*

## Resumo

*Este artigo analisa o efeito de impedância de curto-circuito no comportamento dinâmico de um Sistema de Energia Eléctrica (SEE). Foi usado o pacote de programas computacionais TRANsySTEM, desenvolvido pelos autores para estudar a estabilidade transitória de uma rede eléctrica. O "software" desenvolvido utiliza o método das áreas iguais generalizado. Foi estudado o comportamento dinâmico de um Sistema de Energia Eléctrica, após a ocorrência de um curto-circuito tripolar com diferentes valores de impedância de arco. Os resultados obtidos foram comparados com a solução produzida pelo método de integração numérica de Runge-Kutta, tendo-se verificado uma concordância entre os valores calculados pelas duas formulações.*

## 1. Introdução

O estudo da estabilidade transitória permite simular e analisar o comportamento dinâmico do Sistema de Energia Eléctrica, quando da ocorrência de grandes perturbações, como por exemplo curto-circuitos, a súbita variação da carga ou a saída de serviço de uma linha de interligação ou de um grupo gerador de potência significativa [1, 2]. A partir dos resultados obtidos pelo estudo da estabilidade transitória é possível conhecer os tempos de actuação das protecções, que garantem que os geradores se mantenham em sincronismo após a ocorrência de qualquer uma das perturbações anteriormente referidas [3].

Neste artigo apresenta-se a influência da impedância de curto-circuito no comportamento dinâmico de uma rede eléctrica. O arco eléctrico foi modelizado como uma resistência constante [4]. Neste estudo foi usado o pacote de "software" TRANsySTEM, desenvolvido pelos autores [5]. Estes programas computacionais utilizam o método de Newton-Raphson para calcular o estado inicial do sistema (antes da ocorrência da perturbação) e o das áreas iguais generalizado para estudar a estabilidade transitória [6].

A potência mecânica, o coeficiente de inércia e a força electromotriz de cada gerador foram considerados constantes durante o período de estudo da estabilidade transitória [7]. As cargas do sistema foram modelizadas como admitâncias constantes.

Simulou-se um curto-circuito tripolar numa das linhas da rede eléctrica estudada e, para diferentes valores da impedância de arco, analisou-se o comportamento dinâmico do sistema. Os resultados obtidos foram comparados com as curvas de oscilação dos geradores, produzidos a partir dos valores calculados pelo método de integração numérica de Runge-Kutta.

## 2. Método das áreas iguais generalizado

O método das áreas iguais generalizado permite estudar o comportamento dinâmico de um Sistema de Energia Eléctrica (SEE), sem necessidade de recorrer às técnicas de integração numérica, que requerem elevados tempos de computação [7]. Desta forma, é possível efectuar estudos de estabilidade transitória em tempo real e obter informações para o controlo preventivo do sistema [6].

O comportamento dinâmico do sistema é definido pelas seguintes equações [3]:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i \quad (1)$$

$$M_i \frac{d\omega_i}{dt} = P_{mi} - P_{ei} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

onde

$$P_{ei} = E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m E_i E_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] \quad (3)$$

sendo

- $\delta_i$  - ângulo rotórico do gerador  $i$
- $\omega_i$  - velocidade angular do gerador  $i$
- $M_i$  - coeficiente de inércia do gerador  $i$
- $P_{mi}$  - potência mecânica do gerador  $i$
- $P_{ei}$  - potência eléctrica do gerador  $i$
- $E_i$  - módulo da força electromotriz do gerador  $i$
- $G_{ij}$  - condutância de transferência entre  $i$  e  $j$
- $B_{ij}$  - susceptância de transferência entre  $i$  e  $j$

Ao simular-se a ocorrência de uma perturbação, os geradores do sistema electro-produtor agregam-se em dois grupos, sendo um o das máquinas críticas (S) e o outro o das restantes máquinas (A).

Com base na formulação do centro de inércia, cada conjunto é agregado, obtendo-se para cada um uma máquina equivalente

$$\delta_s = M_s^{-1} \sum_{k \in S} M_k \delta_k \quad (4)$$

$$\delta_a = M_a^{-1} \sum_{j \in A} M_j \delta_j \quad (5)$$

sendo

- $\delta_s$  - ângulo da máquina equivalente ao conjunto S
- $\delta_a$  - ângulo da máquina equivalente ao conjunto A

As equações de oscilação correspondentes às máquinas equivalentes dos dois conjunto são dadas por

$$M_a \frac{d^2 \delta_s}{dt^2} = \sum_{k \in S} (P_{mk} - P_{ek}) \quad (6)$$

$$M_a \frac{d^2 \delta_a}{dt^2} = \sum_{j \in A} (P_{mj} - P_{ej}) \quad (7)$$

O cálculo dos coeficientes de inércia das máquinas equivalentes é obtido a partir dos coeficientes de inércia de cada um dos geradores pertencentes ao correspondente grupo, isto é,

$$M_s = \sum_{k \in S} M_k \quad (8)$$

$$M_a = \sum_{j \in A} M_j \quad (9)$$

Reduzido o sistema global a duas máquinas síncronas equivalentes, poder-se-á agora utilizar uma metodologia semelhante ao critério das áreas iguais (Fig. 1).

A equação de oscilação da máquina ligada ao barramento de potência infinita será dada pela seguinte expressão:

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - [P_c + P_{max} \sin(\delta - \nu)] \quad (10)$$

sendo

- $M$  - coeficiente de inércia
- $P_m$  - potência mecânica
- $P_c$  - componente constante da potência eléctrica
- $P_{max}$  - valor máximo da potência eléctrica
- $\nu$  - desvio angular

O coeficiente de inércia da máquina equivalente ligada a um barramento de potência infinita é obtido a partir da expressão

$$M = M_a M_s \left( \sum_{i=1}^n M_i \right)^{-1} \quad (11)$$

A potência mecânica da máquina resultante, equivalente a todas as máquinas do sistema é calculada pela equação

$$P_m = \left( \sum_{i=1}^n M_i \right)^{-1} \left( M_a \sum_{k \in S} P_{mk} - M_s \sum_{j \in A} P_{mj} \right) \quad (12)$$

Finalmente, aplicando o critério das áreas iguais à equação (10) poder-se-á calcular a margem de estabilidade transitória e o tempo crítico de actuação das protecções. Na figura 1 os intervalos de tempo correspondentes às situações de pré-defeito, durante o defeito e pós-defeito são assinaladas através dos índices "O", "D" e "P", respectivamente.

A partir desta figura poderá calcular-se o valor da margem de estabilidade transitória, tendo em conta as áreas de aceleração e de desaceleração relativas à máquina equivalente:

$$\eta = A_{des}(\delta_e) - A_{ace}(\delta_e) \quad (13)$$

sendo

- $A_{ace}$  - área de aceleração
- $A_{des}$  - área de desaceleração

O tempo crítico de actuação das protecções, relativo a uma determinada contingência, é dado pela seguinte expressão:

$$t_c = \sqrt{\frac{6 \gamma \alpha^1}{\ddot{\gamma}} \pm \sqrt{\frac{36 \gamma^2 \alpha^2}{\ddot{\gamma}^2} + \frac{24 \alpha^1}{\ddot{\gamma}} (\delta - \delta_o)}} \quad (14)$$

onde

- $\alpha$  - factor de correcção
- $\gamma$  - aceleração inicial na máquina equivalente ligada a um barramento de potência infinita
- $\ddot{\gamma}$  - segunda derivada de  $\gamma$

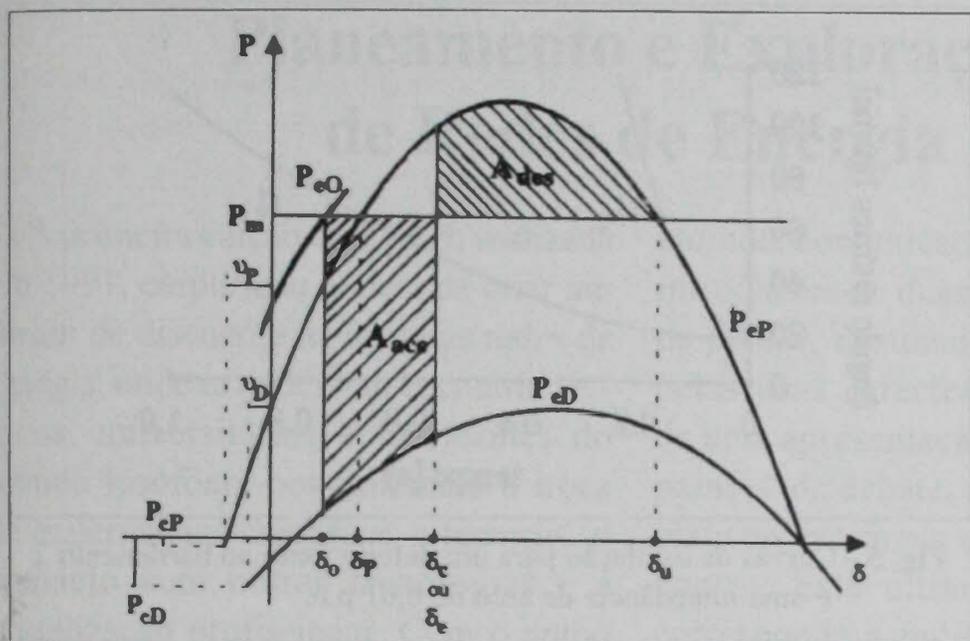


Fig. 1 - Representação gráfica do critério das áreas iguais generalizado.

Para efeitos de análise da estabilidade transitória do sistema será escolhida a solução da equação (14) que apresentar menor valor numérico [7].

### 3. Exemplo de aplicação

Foi estudado o comportamento dinâmico do Sistema de Energia Eléctrica representado na figura 2, simulando-se um curto-circuito tripolar na linha L1, com diferentes valores de impedância de arco [8]. No estudo realizado, consideraram-se duas situações de defeitos, correspondentes à ocorrência do curto-circuito nos extremos da linha L1, respectivamente junto aos barramentos 1 e 2. Os defeitos foram eliminados ao fim de 0,2 segundos após a ocorrência da perturbação, pela abertura simultânea dos disjuntores da linha L1.

Nas tabelas 1 e 2 são dadas as características eléctricas dos componentes da rede assumidos neste estudo. Os valores em "por unidade" estão referidos à base de 100 MVA.

### 4. Resultados obtidos e conclusões

Os resultados da situação pré-defeito, obtidos utilizando o método de Newton-Raphson encontram-se na tabela 3.

Posteriormente ao conhecimento do estado inicial do sistema, foi estudado o comportamento dinâmico da rede

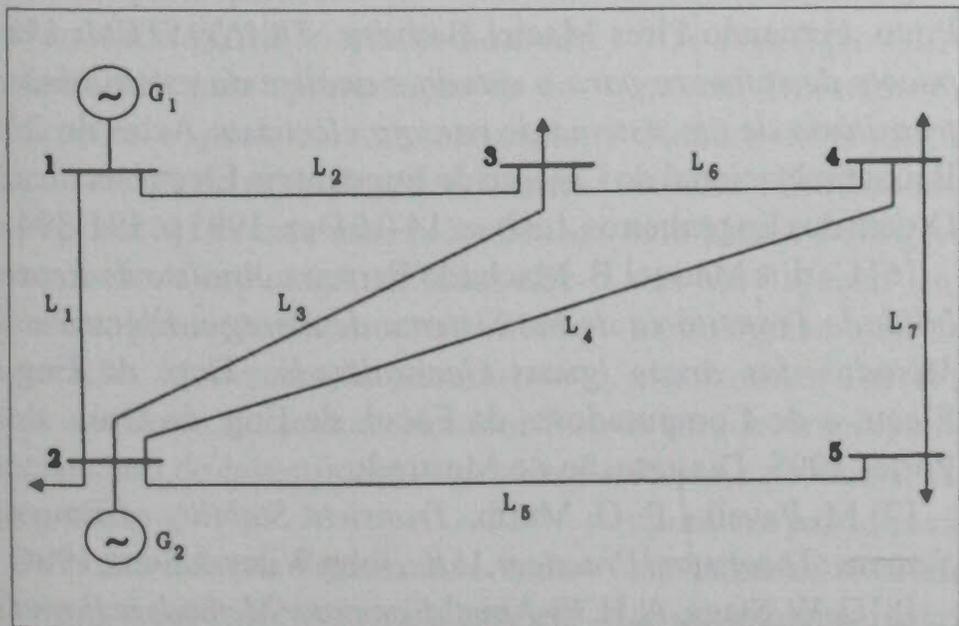


Fig. 2 - Sistema de Energia Eléctrica estudado.

considerando-se diferentes valores de impedância de arco, utilizando o método das áreas iguais generalizado. Os resultados obtidos são apresentados nas tabelas 4 e 5.

TABELA 1  
Características dos Geradores.

Barramento <i>i</i>	Reactância [p.u.]	Constante de inércia [MJ/MVA]
1	0,25	50,0
2	1,50	1,0

TABELA 2  
Características das linhas.

Linha	Barramentos		Resistência [p.u]	Reactância [p.u.]	Susceptância [p.u.]
	<i>i</i>	<i>j</i>			
L1	1	2	0,02	0,06	0,030
L2	1	3	0,08	0,24	0,025
L3	2	3	0,06	0,18	0,020
L4	2	4	0,06	0,18	0,020
L5	2	5	0,04	0,12	0,015
L6	3	4	0,01	0,03	0,010
L7	4	5	0,08	0,24	0,025

TABELA 3  
Resultados do trânsito de potência.

Barramento <i>i</i>	Tensão		Produção		Consumo	
	Módulo [p.u.]	Argumento [graus]	Potência activa [MW]	Potência reactiva [Mvar]	Potência activa [MW]	Potência reactiva [Mvar]
1	1,060	0,00	129,6	-7,5	0,0	0,0
2	1,047	-2,81	40,0	30,0	20,0	10,0
3	1,024	-4,99	0,0	0,0	45,0	15,0
4	1,024	-5,33	0,0	0,0	40,0	5,0
5	1,018	-6,15	0,0	0,0	60,00	10,0

TABELA 4  
Resultados do método das áreas iguais generalizado: o defeito ocorreu na linha L1 junto ao barramento 1.

Potência de arco [p.u.]	Máquina crítica	Ângulo crítico [graus]	Tempo crítico [s]	Margem de estabilidade	Condição de estabilidade do sistema
0,00 + j 0,00	2	63,9	0,192	-0,075	Instável
0,01 + j 0,00	2	66,2	0,194	-0,053	Instável
0,02 + j 0,00	2	70,4	0,199	-0,008	Instável
0,03 + j 0,00	2	74,0	0,203	0,029	Estável
0,04 + j 0,00	2	77,8	0,208	0,067	Estável
0,05 + j 0,00	2	81,8	0,212	0,106	Estável

TABELA 5

Resultados do método das áreas iguais generalizado: o defeito ocorreu na linha L1 junto ao barramento 2.

Impedância de arco [p.u.]	Máquina crítica	Ângulo crítico [graus]	Tempo crítico [s]	Margem de estabilidade	Condição de estabilidade do sistema
0,00 + j 0,00	2	62,1	0,188	-0,114	Instável
0,01 + j 0,00	2	65,1	0,192	-0,078	Instável
0,02 + j 0,00	2	68,2	0,196	-0,040	Instável
0,03 + j 0,00	2	71,6	0,199	-0,002	Instável
0,04 + j 0,00	2	75,1	0,204	0,037	Instável
0,05 + j 0,00	2	78,8	0,209	0,076	Estável

Para as mesmas situações de defeito e de valores de impedância de arco o sistema foi estudado utilizando o método de integração numérica de Runge-Kutta de quarta ordem [8], tendo-se verificado perfeita concordância entre os valores obtidos pelas duas formulações.

As figuras 4 a 6 mostram as curvas de oscilação dos geradores correspondentes a quatro situações típicas. As situações de contingência a que correspondem as figuras 3 a 5 conduzem à instabilidade do sistema, enquanto nas figuras 4 e 6 são mostradas situações de estabilidade.

Da análise dos resultados obtidos conclui-se que uma situação instável quando o defeito é franco poderá ser estável desde que a impedância de arco tenha um valor significativo.

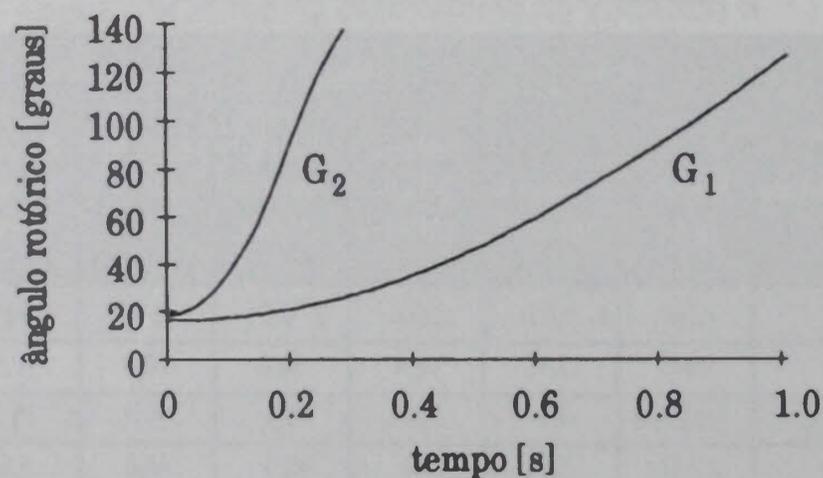


Fig. 3 - Curvas de oscilação para um defeito junto ao barramento 1 e uma impedância de arco de 0,01 p.u.

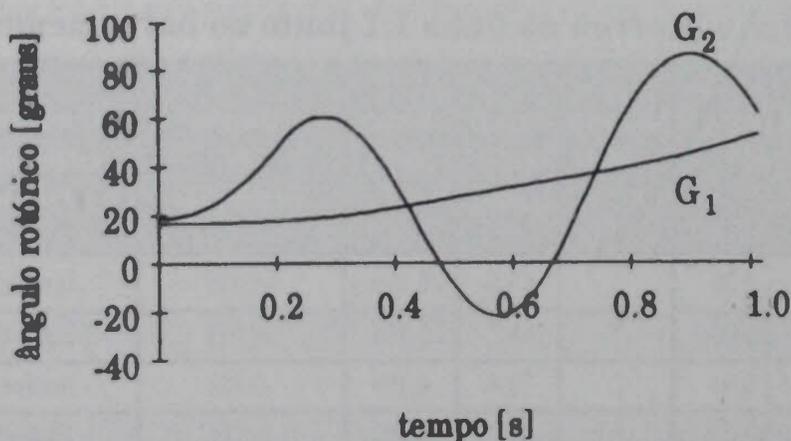


Fig. 4 - Curvas de oscilação para um defeito junto ao barramento 1 e uma impedância de arco de 0,05 p.u.

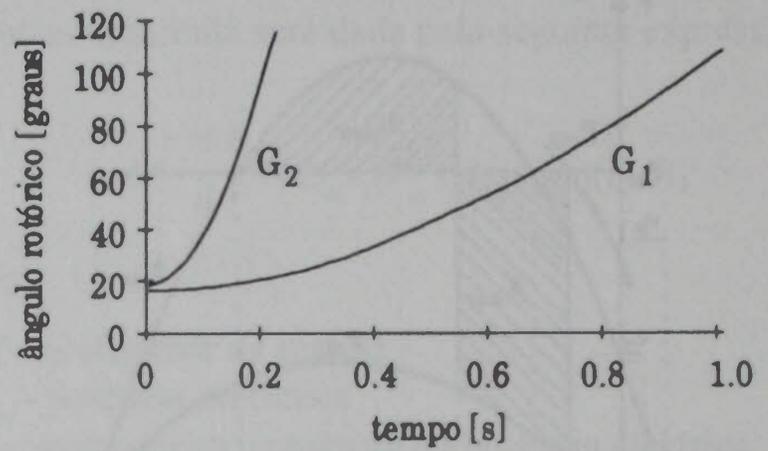


Fig. 5 - Curvas de oscilação para um defeito junto ao barramento 2 e uma impedância de arco de 0,01 p.u.

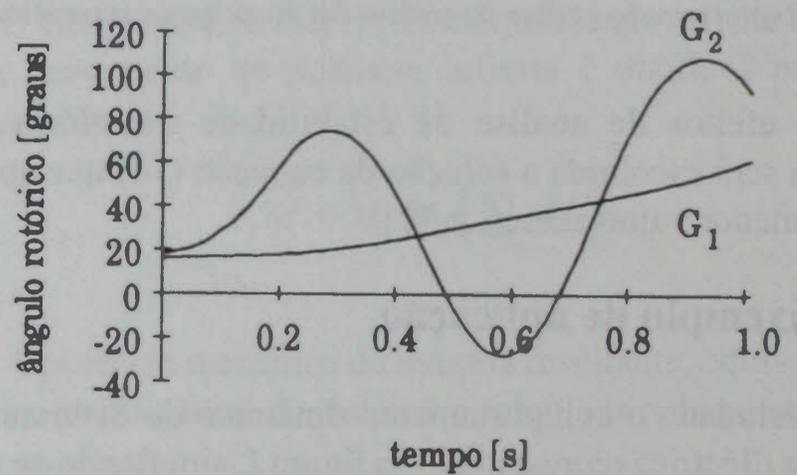


Fig. 6 - Curvas de oscilação para um defeito junto ao barramento 2 e uma impedância de arco de 0,05 p.u.

### Referências

- [1] Fernando Pires Maciel Barbosa, *Estabilidade de Sistemas Eléctricos*, Porto, Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores de Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1987.
- [2] José Américo Dias Pinto, *Estudo de estabilidade transitória em sistemas eléctricos de energia*, *Electricidade*, Vol. 29 (207) Jan. 1985, p. 34-41.
- [3] P. M. Anderson, A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, New York, Institute of Electrical and Electronics Engineers Press, 1994.
- [4] E. Kimbark, *Power System Stability Calculations*, U.S.A., John Wiley & Sons, 1947.
- [5] Carlos Manuel B. Machado Ferreira, José Américo Dias Pinto, Fernando Pires Maciel Barbosa, *TRANSySTEM: Um pacote de software para o estudo e análise da estabilidade transitória de um sistema de energia eléctrica*, Actas do 2.º Encontro Nacional do Colégio de Engenharia Electrotécnica, Ordem dos Engenheiros, Lisboa, 14-15 Dez. 1995 p. 391-394.
- [6] Carlos Manuel B. Machado Ferreira, *Análise da Estabilidade Transitória de um Sistema de Energia Eléctrica - Métodos das Áreas Iguais Generalizado*, Dep. de Eng. Electr. e de Computadores da Facul. de Eng. da Univ. do Porto, 1995, Dissertação de Mestrado.
- [7] M. Pavella, P. G. Murth, *Transient Stability of Power Systems (Theory and Practice)*, U.K., John Wiley & Sons, 1994.
- [8] G. W. Stagg, A. H. El-Abiad, *Computer Methods in Power System Analysis*, McGraw-Hill International Editions, 1968.