

Identificação do Conjunto das Máquinas Críticas na Análise da Estabilidade Transitória de um Sistema de Energia Eléctrica Utilizando um Método Híbrido

C. M. Machado Ferreira¹, J. A. Dias Pinto¹ e F. P. Maciel Barbosa²

¹Departamento de Engenharia Electrotécnica
ISEC, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra
Rua Pedro Nunes – Quinta da Nora, 3030-199 Coimbra (Portugal)
Telef: +351 239 790 200, fax: +351 239 790 201, e-mail: cmacfer@ieee.org, j.pinto@ieee.org

²Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
FEUP, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto (Portugal)
Telef: +351 22 508 14 00, fax: +351 22 508 14 43, e-mail: fmb@fe.up.pt

Resumo. Nesta comunicação é apresentada uma metodologia para identificar o conjunto das máquinas críticas na análise da estabilidade transitória de um Sistema de Energia Eléctrica utilizando um método híbrido. Esta formulação combina as vantagens dos algoritmos baseados na integração numérica das equações que descrevem o comportamento dinâmico de um sistema, com o critério das áreas iguais. O sistema multimáquina é reduzido a um modelo equivalente, constituído por uma máquina ligada a um barramento de potência infinita, sendo o processo de integração numérica somente necessário durante um curto intervalo de tempo, o que reduz consideravelmente o tempo de computação. O pacote de programas computacionais TRANsySTEM, desenvolvido pelos autores, foi utilizado para estudar a estabilidade transitória da rede do IEEE com 17 máquinas síncronas. Os resultados obtidos foram comparados com as soluções produzidas por um programa computacional baseado num método de integração numérica, tendo-se verificado uma concordância perfeita entre os valores calculados pelas duas formulações.

Palavras-chave: Sistemas de Energia Eléctrica, Análise da Estabilidade Transitória, Métodos Híbridos, Máquinas Críticas

1. Introdução

O estudo e análise da estabilidade transitória é um dos aspectos importantes a considerar na exploração e condução de um Sistema de Energia Eléctrica, pois permite conhecer o comportamento dinâmico das máquinas síncronas, após a ocorrência de uma perturbação [1]. As oscilações que se verificam no sistema após a ocorrência de um defeito são praticamente incontroláveis durante o primeiro segundo, podendo dar-se uma perda de sincronismo se a energia cinética adquirida durante a permanência da perturbação não for absorvida pelo sistema [2].

Nesta comunicação é proposta uma metodologia para a identificação do conjunto das máquinas críticas no estudo e análise da estabilidade transitória de um SEE utilizando um método híbrido. A selecção do conjunto das máquinas críticas é uma tarefa difícil e complexa,

tendo sido adoptados diferentes critérios, que conjugados, permitem identificar de uma forma inequívoca, qual o conjunto de máquinas que conduzem o sistema à perda do sincronismo. No primeiro, as máquinas críticas são as que apresentam maior variação do valor da aceleração. O segundo baseia-se num índice que traduz a variação incremental dos ângulos rotóricos no período pós-defeito [3]. No terceiro, é utilizado o desvio angular máximo entre dois grupos de máquinas, estabelecido no momento em que o sistema foi considerado como instável. As máquinas cujos os ângulos rotóricos se encontram acima deste intervalo são consideradas como críticas [4]. Finalmente, no quarto critério, é aplicada uma técnica de selecção do conjunto das máquinas críticas semelhante à utilizada no método da Função de Energia Transitória [5]. Os conjuntos possíveis de máquinas críticas são obtidos combinando os quatro critérios, descritos anteriormente, através da utilização de regras heurísticas. O conjunto de máquinas críticas corresponde ao que primeiro satisfaz todas as condições de estabilidade impostas pelo método híbrido [6].

O pacote de programas computacionais TRANsySTEM [7], desenvolvido pelos autores, foi utilizado para estudar a estabilidade transitória da rede de teste do IEEE com 17 máquinas síncronas [8]. Os resultados obtidos foram comparados com as curvas de oscilação das máquinas síncronas, produzidas a partir dos valores calculados por um programa, que usa um método de integração numérica no domínio do tempo, tendo-se verificado uma concordância perfeita entre as duas formulações.

2. Método híbrido para o estudo e análise da estabilidade transitória

A utilização de um método híbrido para o estudo e análise da estabilidade transitória de um SEE combina as vantagens dos métodos directos com as dos algoritmos baseados na integração numérica, no domínio do tempo,

das equações que descrevem o comportamento dinâmico do sistema [6]. É utilizada a flexibilidade de modelização dos componentes da rede eléctrica permitida pelos métodos de integração numérica com a velocidade e a grande quantidade de informação produzida pelo método directo. À semelhança de outras formulações, o método híbrido desenvolvido assenta nas hipóteses [9]:

- após a ocorrência de uma perturbação num sistema, independentemente do grau de complexidade da mesma, a perda do sincronismo é produzida pela separação das máquinas síncronas em dois conjuntos – o conjunto das máquinas críticas (CMC) e o das restantes máquinas;
- o mecanismo da estabilidade transitória pode ser analisado através da redução do sistema a uma máquina equivalente.

Assim, é estabelecido um modelo equivalente do sistema multimáquina constituído por uma máquina ligada a um barramento de potência infinita, sendo a margem de estabilidade transitória determinada através da aplicação do critério das áreas iguais. A avaliação da estabilidade transitória é efectuada através de índices de detecção de instabilidade ou de estabilidade, pelo que o processo de integração numérica é efectuado durante um curto intervalo de tempo, reduzindo-se significativamente o tempo de computação.

A. Índices de estabilidade

Durante o período de defeito monitoriza-se, somente, desvio angular máximo, de forma a terminar de imediato o processo de integração numérica das equações diferenciais que descrevem o comportamento dinâmico do sistema, se uma situação extremamente instável for detectada. Caso esta situação não aconteça, no período pós-defeito, para cada passo de integração determinam-se os índices de estabilidade. Uma mudança de sinal de um dos índices (*IDI* ou *IDE*) indica qual a condição de estabilidade do sistema [10]. O outro índice ou não muda de sinal ou se tal acontecer será num momento posterior.

$$IDI = \sum_{i=1}^m f_i (\theta_i - \theta_i^{cl}) \quad (1)$$

$$IDE = \sum_{i=1}^m \omega_i (\theta_i - \theta_i^{cl}) \quad (2)$$

onde

- f_i – potência de aceleração da máquina síncrona i
- ω_i – velocidade angular da máquina síncrona i no período pós-defeito
- θ_i – ângulo rotórico da máquina síncrona i no período pós-defeito
- θ_i^{cl} – ângulo rotórico da máquina síncrona i no instante de eliminação do defeito
- m – número de geradores

O índice de detecção do tempo de observação (*IDTO*) indica o momento óptimo para a identificação

do conjunto das máquinas críticas. O processo de integração numérica terminará assim que ambas as condições se verificarem, isto é, foi detectada a condição de estabilidade do sistema e o tempo de observação.

$$IDTO = \sum_{i=1}^m f_i \omega_i \quad (3)$$

No caso de situações instáveis, o primeiro mínimo do índice, *IDCS*, indica o ponto aproximado onde ocorre o cruzamento da superfície limite de energia potencial (SLEP) [11].

$$IDCS = \sum_{i=1}^m f_i^2 \quad (4)$$

Se o tempo de eliminação do defeito for inferior ao tempo correspondente ao cruzamento da SLEP, detectar-se-á inicialmente um máximo relativo. No caso de o sistema ser instável detectar-se-á inicialmente um mínimo relativo. Para se garantir a eficiência e a fiabilidade deste processo, a coerência entre todos os índices é verificada constantemente.

B. Identificação do conjunto das máquinas críticas

Após a conclusão do processo de integração numérica no domínio do tempo, das equações que descrevem o comportamento dinâmico do sistema, procede-se à identificação do conjunto das máquinas críticas através da aplicação de quatro critérios de selecção complementares.

1) Critério das acelerações

Neste critério, as máquinas críticas são seleccionadas entre as que apresentam maior variação do valor da aceleração no período pós-defeito:

$$\Delta\gamma_i = \frac{\Delta P_{ai}}{M_i} = \frac{P_{ai}(t_{obs}) - P_{ai}(t_{cl})}{M_i} \quad (5)$$

com

- P_{ai} – potência de aceleração da máquina síncrona i
- M_i – momento de inércia da máquina síncrona i

A potência de aceleração é calculada em dois momentos distintos, o primeiro corresponde ao tempo de eliminação do defeito, t_{cl} , e o segundo ao tempo de observação, t_{obs} .

2) Índice baseado na variação incremental dos ângulos rotóricos

Recentemente, foi proposto um novo método para identificar o conjunto das máquinas críticas do sistema, com base na variação incremental dos ângulos rotóricos no período pós-defeito [12]. Para cada máquina determina-se um índice que traduz a variação do ângulo

rotórico relativamente ao valor médio do incremento de todos os ângulos:

$$IA_i = \left(\delta_i^{obs} - \delta_i^{cl} \right) - \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \left(\delta_k^{obs} - \delta_k^{cl} \right) \quad (6)$$

com

IA_i – índice relativo à variação incremental do ângulo rotórico da máquina síncrona i

δ_i^{obs} – ângulo rotórico da máquina i correspondente ao tempo de observação (t_{obs})

δ_i^{cl} – ângulo rotórico da máquina i correspondente ao tempo de eliminação do defeito (t_{cl})

Este índice pode também ser determinado relativamente ao centro de ângulo (COA) e, neste caso, será dado por [3]:

$$IA_{COAi} = \sum_{t=t_{cl}}^{t_{obs}} \left| \theta_i(t + \Delta t) + \theta_i(t) \right| \quad (7)$$

sendo $\theta_i(t)$ determinado através de:

$$\theta_i(t) = \delta_i(t) - \left(\sum_{k=1}^m M_k \right)^{-1} \sum_{k=1}^m M_k \delta_k(t) \quad (8)$$

Após o cálculo dos índices, estes são ordenados por ordem decrescente e os que se situarem acima do maior intervalo, entre dois valores consecutivos, indicam o conjunto das máquinas críticas. Esta metodologia apresenta a vantagem de poder ser utilizada tanto para situações instáveis como para situações estáveis. O momento em que se estabelece o agrupamento das máquinas é de primordial importância, se ocorrer demasiado cedo, pode não traduzir fielmente o impacto do defeito no sistema, por outro lado, se ocorrer para além de um determinado ponto poder-se-á não conseguir distinguir claramente os dois conjuntos.

3) Ordenação das máquinas críticas (CMR)

A selecção do conjunto das máquinas críticas é, preferencialmente, efectuada com base numa simulação instável do comportamento dinâmico do sistema [1], [4]. De todos os grupos possíveis de máquinas síncronas, que possam constituir o conjunto das máquinas críticas, será necessário identificar qual o mais desfavorável em termos de estabilidade transitória. Para se atingir esse objectivo, utilizam-se os seguintes procedimentos:

- no momento correspondente ao tempo de observação ordenam-se as máquinas por sequência decrescente dos seus ângulos rotóricos, isto é, por ordem decrescente do seu grau de instabilidade
- selecciona-se um conjunto de $(m-1)$ máquinas síncronas

- com base na lista de máquinas, estabelecida anteriormente, formam-se vários conjuntos, sendo o primeiro composto pela máquina mais avançada, o segundo pelas duas primeiras máquinas e assim sucessivamente até se atingirem as $(m-1)$ máquinas da classificação
- verifica-se qual o desvio angular máximo entre dois grupos de máquinas
- as máquinas cujos os ângulos rotóricos se encontram acima deste intervalo são classificadas como críticas.

4) Metodologia de selecção do conjunto das máquinas críticas aplicado no método da Função de Energia Transitória

A escolha do conjunto de máquinas críticas baseia-se em dois indicadores da severidade da perturbação, determinados no fim do período de defeito [5]. São estabelecidas duas listas onde as máquinas se encontram ordenadas segundo o seu grau de criticalidade. Na primeira lista a ordenação das máquinas síncronas é efectuada por ordem decrescente do valor da energia cinética correspondente ao momento de eliminação do defeito. O valor da energia cinética neste ponto é determinado por:

$$V_{KE}^{cl} = \frac{1}{2} M_i \left(\tilde{\omega}_i^{cl} \right)^2 \quad (9)$$

onde

$\tilde{\omega}_i^{cl}$ – velocidade angular da máquina i , em t_{cl} , relativa ao centro de ângulo (COA)

Os alternadores de uma central são agrupados e colocados na lista, na mesma posição do que apresentar maior valor de energia cinética, independentemente do lugar que as outras máquinas ocupem na lista. Para tornar o processo mais eficiente são somente incluídas na lista as máquinas cujo valor da energia cinética seja de pelo menos 50 % do valor máximo. Esta ordenação permite avaliar o impacto causado pela perturbação, em termos da energia cinética adquirida durante o período de defeito.

Uma segunda lista de máquinas é obtida através da ordenação, por ordem decrescente, da aceleração no momento de actuação das protecções:

$$\frac{f_i(\theta^{cl})}{M_i} = \frac{1}{M_i} \left(P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COA} \right) \quad (10)$$

com

$f_i(\theta^{cl})$ – potência de aceleração da máquina i , em t_{cl} , relativa ao centro de ângulo (COA)

Tal como na lista relativa à energia cinética, as máquinas pertencentes à mesma central são integradas no mesmo grupo. Somente as máquinas cuja aceleração é superior a 50 % do valor máximo são incluídas na lista.

Esta lista fornece uma medida da severidade da perturbação em termos da aceleração de cada máquina no fim do período de defeito.

A lista final com as máquinas mais severamente perturbadas é efectuada com base na informação fornecida pelas duas listas anteriores e encontra-se sintetizada na tabela I.

Tabela I – Lista final

Máquinas que aparecem em ambas as listas (da energia cinética e da aceleração)
Máquinas que aparecem na lista da energia cinética, mas não na lista da aceleração
Máquinas que aparecem na lista da aceleração, mas não na lista da energia cinética

Os conjuntos possíveis de máquinas críticas são obtidos combinando os quatro critérios, descritos anteriormente, através da utilização de regras heurísticas. O sistema multimáquina é dividido em dois subsistemas, que posteriormente são agregados num sistema equivalente, composto por uma máquina ligada a um barramento de potência infinita. Para cada conjunto, os parâmetros relativos à máquina equivalente são determinados e as condições de estabilidade avaliadas. O conjunto de máquinas críticas corresponde ao que primeiro satisfaz todas as condições de estabilidade impostas pelo método híbrido.

3. Exemplo de aplicação

Pretende-se estudar o comportamento dinâmico da rede de teste do IEEE com 17 máquinas síncronas [8], após a ocorrência de um curto-circuito tripolar franco no barramento 112. O defeito é eliminado pela abertura simultânea das protecções situadas nos extremos da linha 112–120. O tempo crítico de actuação das protecções foi determinado pelo método da bissecção [10], considerando uma tolerância $\varepsilon_t = 1$ [ms] e é igual a 203 [ms]. Foram escolhidos seis tempos de actuação das protecções, três inferiores e três superiores ao tempo crítico. O tempo total de simulação é de dois segundos.

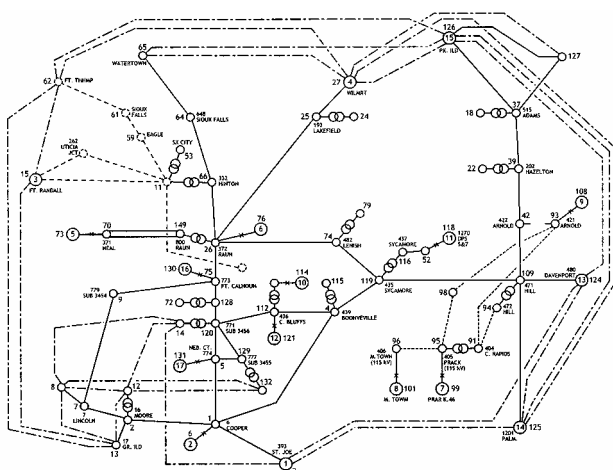


Fig. 1. Rede de teste do IEEE com 17 máquinas síncronas

4. Resultados

Na tabela II indicam-se os valores dos diversos índices de estabilidade para os vários tempos de eliminação do defeito especificados na coluna I. Nas colunas II e III são mostrados os tempos correspondentes à mudança de sinal de *IDI* e *IDE* respectivamente. Na coluna IV é apresentada a condição de estabilidade do sistema, enquanto que na coluna V é indicado o tempo de observação. Na coluna VI são mostrados os tempos correspondentes aos mínimos e aos máximos de *IDCS*. Finalmente, na coluna VII é indicado o valor do desvio angular máximo correspondente ao tempo de observação. Nas figuras 2 e 3 é mostrada a evolução temporal dos vários índices para dois tempos de eliminação do defeito.

Tabela II – Índices de estabilidade

I	II	III	IV	V	VI	VII
t_{cl} [ms]	<i>IDI</i> [ms]	<i>IDE</i> [ms]	Condição de estabilidade do sistema	<i>IDTO</i> [ms]	<i>IDCS</i> min/max [ms]	$\Delta\theta_{max}$ [grau]
100	Não	279	Estável	254	384/240	62.06
150	Não	330	Estável	316	419/262	95.05
200	Não	497	Estável	527	432/233	162.04
250	343	Não	Instável	333	343/468	183.70
300	331	Não	Instável	320	313/421	186.91
350	490	Não	Instável	512	411/485	473.62

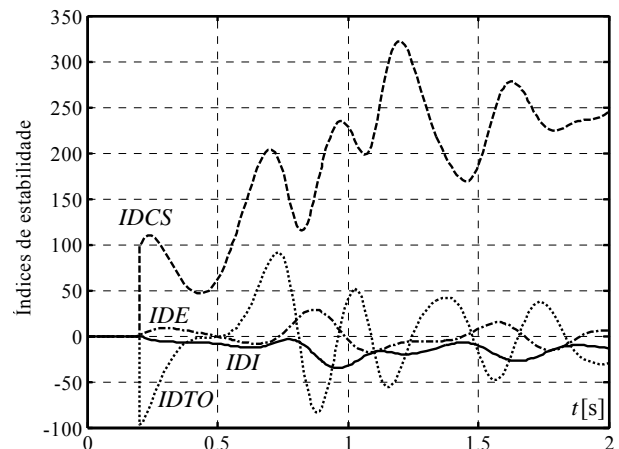


Fig. 2. Índices de estabilidade para $t_{cl} = 200$ [ms]

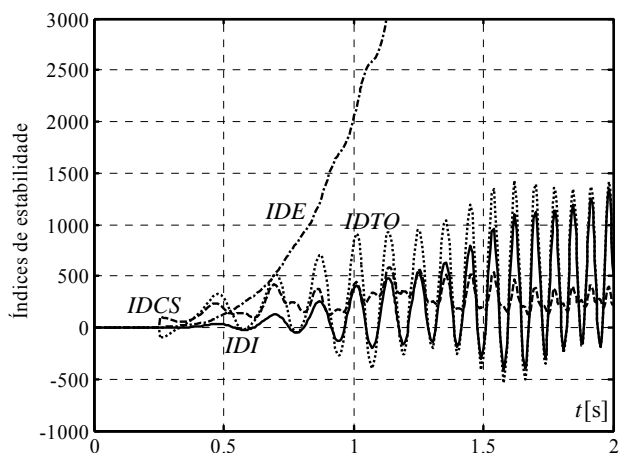


Fig. 3. Índices de estabilidade para $t_{cl} = 250$ [ms]

Tabela III.(a) – Identificação do CMC para $t_{cl} = 200$ [ms]

IA			IAcoa		
Índice	Intervalo	Máquina	Índice	Intervalo	Máquina
0.939	0.182	12	2.172	0.514	12
0.757	0.499	10	1.658	0.946	10
0.258	0.066	16	0.712	0.112	16
0.193	0.019	11	0.600	0.159	2
0.174	0.035	2	0.441	0.033	11
0.139	0.075	1	0.407	0.012	5
0.064	0.116	5	0.395	0.034	17
-0.052	0.014	3	0.362	0.087	6
-0.066	0.127	6	0.274	0.164	1
-0.193	0.016	4	0.110	0.109	3
-0.209	0.029	8	0.001	0.075	8
-0.238	0.008	15	-0.074	0.049	4
-0.246	0.080	17	-0.122	0.075	15
-0.326	0.022	7	-0.197	0.027	7
-0.348	0.071	9	-0.225	0.104	9
-0.419	0.008	13	-0.329	0.013	13
-0.427	0.000	14	-0.342	0.000	14

Tabela IV.(a) – Identificação do CMC para $t_{cl} = 250$ [ms]

IA			IAcoa		
Índice	Intervalo	Máquina	Índice	Intervalo	Máquina
4.160	1.989	12	6.458	2.622	12
2.170	2.129	10	3.836	2.969	10
0.042	0.099	16	0.868	0.154	16
-0.058	0.168	2	0.713	0.031	2
-0.225	0.016	5	0.682	0.260	17
-0.242	0.069	1	0.422	0.062	5
-0.310	0.042	11	0.360	0.193	6
-0.352	0.032	3	0.167	0.091	11
-0.384	0.027	6	0.076	0.069	1
-0.411	0.079	17	0.007	0.181	3
-0.490	0.043	4	-0.174	0.012	8
-0.534	0.064	15	-0.186	0.055	4
-0.598	0.059	8	-0.241	0.099	15
-0.657	0.005	7	-0.340	0.012	7
-0.662	0.062	9	-0.352	0.109	9
-0.723	0.003	13	-0.461	0.015	13
-0.727	0.000	14	-0.475	0.000	14

Tabela III.(b) – Identificação do CMC para $t_{cl} = 200$ [ms]

CMR			Variação da aceleração		
$\Delta\delta_{ij}$	Intervalo	Máquina	$\Delta\gamma$	Intervalo	Máquina
2.641	0.540	12	117.910	74.561	12
2.101	0.874	10	43.349	34.657	10
1.227	0.022	16	8.692	5.009	16
1.204	0.229	2	3.682	0.771	2
0.975	0.047	17	2.911	1.229	13
0.929	0.019	5	1.682	0.422	6
0.910	0.282	6	1.260	0.570	9
0.628	0.199	11	0.690	0.581	5
0.428	0.045	3	0.109	0.439	14
0.384	0.203	1	-0.330	1.060	17
0.181	0.027	9	-1.389	4.215	7
0.154	0.035	8	-5.605	1.896	15
0.119	0.036	15	-7.501	1.468	8
0.083	0.060	4	-8.969	4.447	4
0.024	0.169	7	-13.416	2.570	3
-0.146	0.042	13	-15.986	5.499	11
-0.187	0.000	14	-21.484	0.000	1

Tabela IV.(b) – Identificação do CMC para $t_{cl} = 250$ [ms]

CMR			Variação da aceleração		
$\Delta\delta_{ij}$	Intervalo	Máquina	$\Delta\gamma$	Intervalo	Máquina
6.781	2.566	12	154.039	77.715	10
4.215	2.742	10	76.324	71.138	12
1.473	0.062	16	5.186	2.086	14
1.411	0.056	2	3.100	0.011	17
1.356	0.318	17	3.089	1.641	13
1.038	0.029	5	1.448	0.234	15
1.009	0.543	6	1.214	0.262	9
0.466	0.036	11	0.952	0.852	7
0.430	0.136	3	0.101	2.324	8
0.294	0.143	1	-2.224	0.324	6
0.151	0.049	9	-2.548	1.194	4
0.103	0.022	15	-3.742	12.027	3
0.080	0.008	8	-15.769	3.729	1
0.072	0.093	4	-19.498	0.488	2
-0.021	0.160	7	-19.986	3.768	5
-0.181	0.042	13	-23.754	0.785	11
-0.223	0.000	14	-24.539	0.000	16

Tabela III.(c) – Identificação do CMC para $t_{cl} = 200$ [ms]

Energia Cinética			Aceleração		
V_{KE}^{cl}	Intervalo	Máquina	$f(\theta)/M$	Intervalo	Máquina
6.040	5.010	12	53.413	24.735	12
1.030	0.383	17	28.678	17.522	10
0.646	0.105	10	11.156	0.461	17
0.541	0.056	16	10.695	3.556	16
0.485	0.016	14	7.139	2.620	2
0.469	0.063	2	4.519	3.165	5
0.406	0.058	13	1.354	0.537	6
0.348	0.210	6	0.817	0.605	11
0.138	0.033	15	0.212	0.423	1
0.105	0.026	5	-0.211	0.995	3
0.079	0.051	1	-2.398	0.818	15
0.079	0.001	4	-1.206	1.192	4
0.027	0.007	9	-3.217	0.105	9
0.021	0.014	3	-3.321	0.271	7
0.007	0.001	11	-3.592	0.401	8
0.005	0.005	7	-3.993	0.282	13
0.000	0.000	8	-4.275	0.000	14

Tabela IV.(c) – Identificação do CMC para $t_{cl} = 250$ [ms]

Energia Cinética			Aceleração		
V_{KE}^{cl}	Intervalo	Máquina	$f(\theta)/M$	Intervalo	Máquina
9.415	8.173	12	53.205	27.127	12
1.242	0.319	17	26.078	17.425	10
0.924	0.168	10	8.654	2.563	16
0.755	0.041	16	6.090	1.284	17
0.714	0.108	14	4.806	2.737	2
0.606	0.005	13	2.069	0.639	5
0.601	0.266	2	1.430	0.908	1
0.335	0.158	6	0.521	0.953	3
0.178	0.049	15	-0.432	0.058	11
0.129	0.038	5	-0.489	1.016	4
0.091	0.024	4	-1.506	1.162	15
0.067	0.022	1	-2.668	0.720	6
0.045	0.025	9	-3.388	0.251	9
0.020	0.010	3	-3.640	0.106	7
0.009	0.002	7	-3.746	0.120	13
0.007	0.007	11	-3.866	1.380	14
0.000	0.000	8	-5.246	0.000	8

Nas tabelas III e IV são mostrados os resultados da aplicação dos diferentes critérios para identificar o conjunto das máquinas críticas, para um tempo de actuação das protecções de 200 e 250 ms respectivamente. Verifica-se que, o defeito especificado produz uma situação de estabilidade complexa, sendo o conjunto das máquinas críticas composto por dois geradores: G10 e G12. Em todos os casos foi determinada a diferença entre parâmetros consecutivos. No caso dos índices relativos à variação incremental dos ângulos rotóricos e no CMR, o valor máximo do intervalo é utilizado como ponto de separação entre os dois grupos de máquinas. Nos outros casos, são os maiores valores do intervalo que servem como discriminantes.

Após a correcta identificação do conjunto das máquinas críticas, o sistema multimáquina é dividido em dois subsistemas, que posteriormente são agregados num sistema equivalente. Nas figuras 4 e 5 encontram-se representados os resultados obtidos para o sistema reduzido, no caso de uma simulação estável, enquanto as figuras 6 e 7 correspondem a uma situação instável.

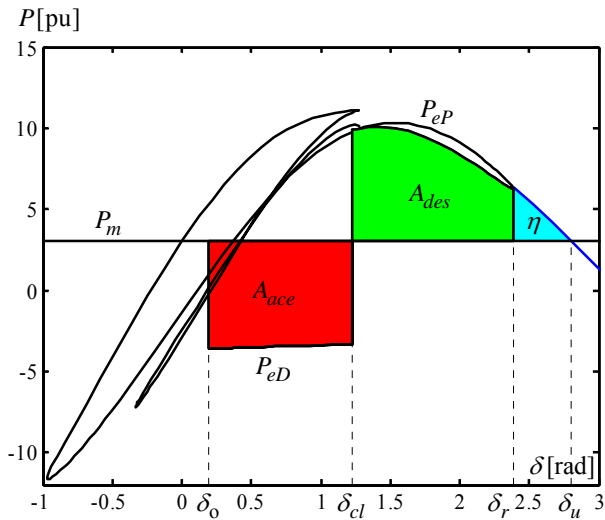


Fig. 4. Curvas das potências em função do ângulo rotórico equivalente para $t_{cl} = 200$ [ms]

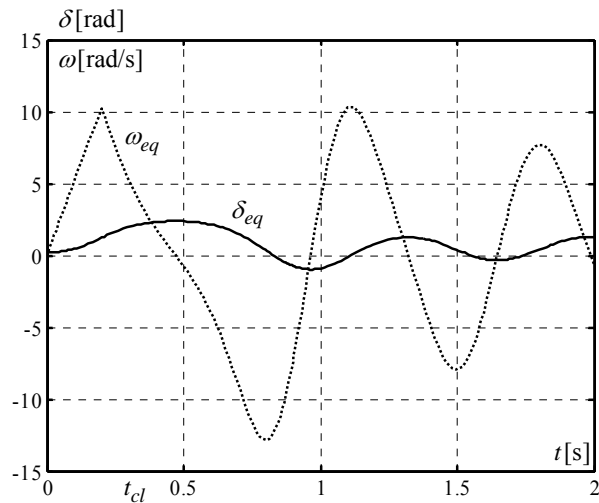


Fig. 5. Evolução temporal dos ângulo rotórico e velocidade angular equivalentes para $t_{cl} = 200$ [ms]

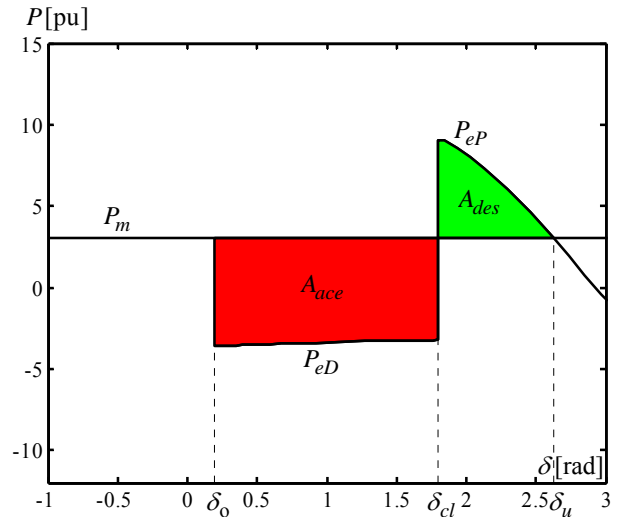


Fig. 6. Curvas das potências em função do ângulo rotórico equivalente para $t_{cl} = 250$ [ms]

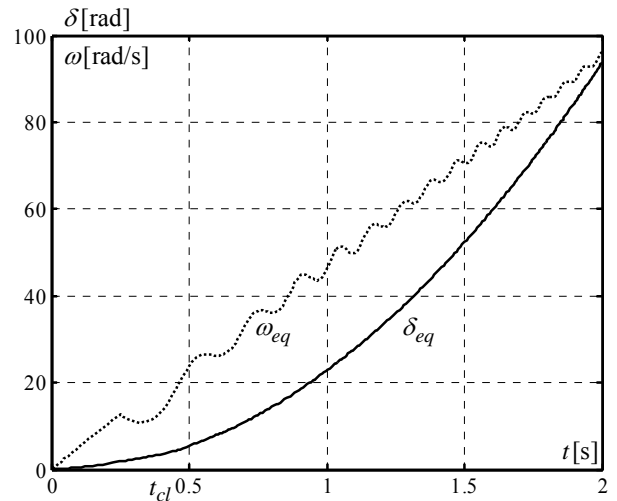


Fig. 7. Evolução temporal dos ângulo rotórico e velocidade angular equivalentes para $t_{cl} = 250$ [ms]

Na tabela V mostra-se a variação dos diferentes parâmetros do sistema equivalente com o tempo de eliminação do defeito (coluna I). Na coluna II encontra-se o ângulo rotórico correspondente ao tempo de actuação das protecções. As colunas III e IV indicam o tempo e o ângulo de retorno respectivamente. Na coluna V, mostra-se o tempo correspondente ao ângulo de equilíbrio instável, enquanto na coluna VI, se indica ângulo respectivo. A coluna VII refere-se à margem de estabilidade transitória. Na figura 8 encontra-se representado o retrato de fases.

Tabela V – Parâmetros do sistema reduzido

I	II	III	IV	V	VI	VII
t_{cl} [ms]	δ_{cl} [rad]	t_r [ms]	δ_r [rad]	t_u [ms]	δ_u [rad]	η [pu.rad]
100	0.45	262.1	0.89	–	2.85	5.199
150	0.78	315.6	1.39	–	2.84	5.053
200	1.22	481.5	2.38	–	2.80	0.650
250	1.80	–	–	322.5	2.63	-7.470
300	2.49	–	–	302.7	2.61	-14.624
350	3.31	–	–	–	–	-19.814

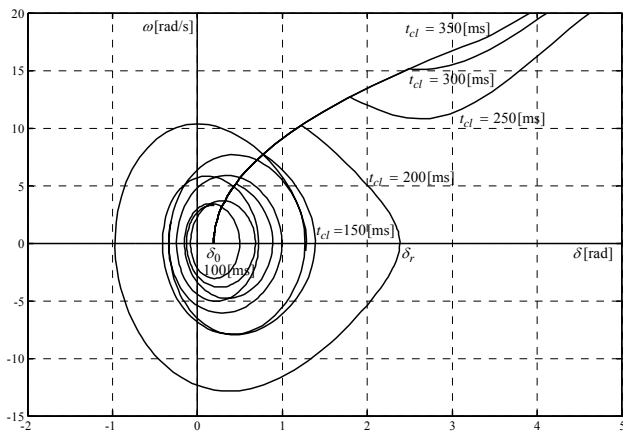


Fig. 8. Retrato de fases

Nas figuras 9 e 10 estão representadas as curvas de oscilação dos geradores, para um tempo de actuação das protecções de 200 e 250 ms respectivamente.

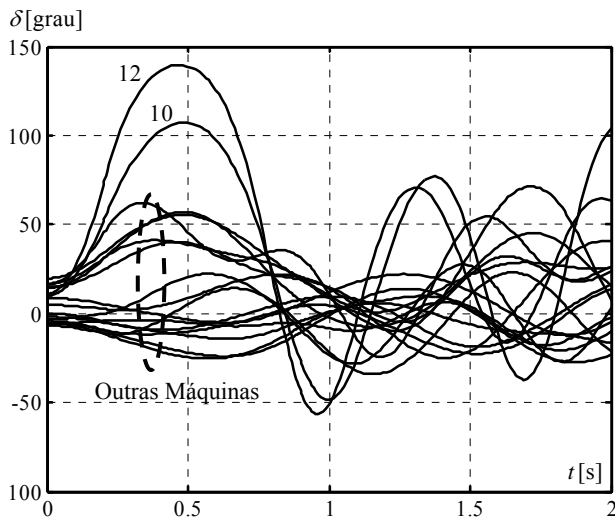


Fig. 9. Evolução temporal dos ângulos rotóricos dos alternadores para $t_{cl} = 200$ ms

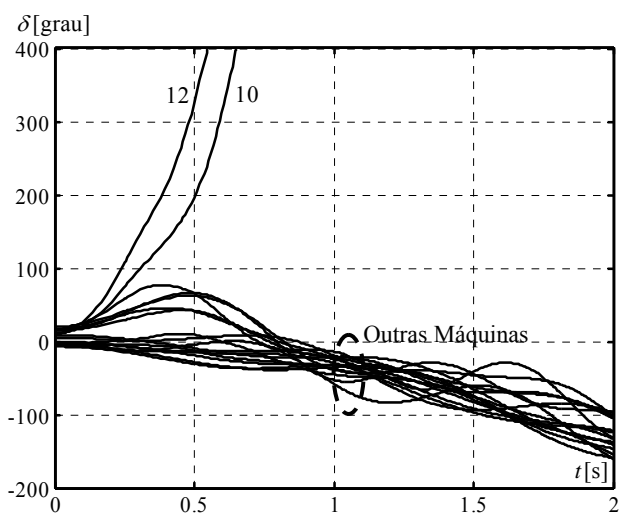


Fig. 10. Evolução temporal dos ângulos rotóricos dos alternadores para $t_{cl} = 250$ ms

Na tabela VI são mostrados os resultados obtidos para outras contingências utilizando o método híbrido desenvolvido. Na coluna I encontra-se o número da

contingência simulada, enquanto na coluna II, é indicado o barramento onde ocorreu a perturbação. A coluna III corresponde à linha que foi colocada fora de serviço para extinguir o defeito. Na coluna V, encontra-se o tempo crítico de eliminação do defeito. O tempo de actuação das protecções especificado (coluna IV) é superior ao tempo crítico, de forma a se obter situações instáveis. Assim, todos os valores da margem de estabilidade transitória são negativos (coluna VI). A coluna VII refere-se ao conjunto das máquinas críticas identificado para cada uma das perturbações.

Tabela VI – Resultados obtidos para outras contingências

I	II	III	IV	V	VI	VII
Evento No.	Barram.	Linha	t_{cl} [ms]	t_{cr} [ms]	η [pu.rad]	CMC
1	1	1-2	275	215	-6.807	2, 10, 12, 16, 17
2	1	1-3	275	216	-9.793	2, 6, 5, 10, 12, 16, 17
3	1	1-4	275	219	-6.857	2, 6, 5, 10, 12, 16, 17
4	1	1-5	275	210	-9.551	2, 17
5	5	5-120	275	224	-3.096	2, 10, 12, 16, 17
6	26	25-26	250	192	-10.638	5, 6
7	26	26-74	250	192	-15.348	5, 6
8	26	26-75	250	170	-12.431	5, 6
9	75	9-75	450	354	-7.472	2, 5, 6, 10, 12, 16, 17
10	112	4-112	300	235	-7.796	2, 5, 10, 12, 16, 17
11	120	112-120	250	226	-3.076	10, 12
12	129	120-129	375	322	-9.304	2, 10, 12, 16, 17

5. Conclusões

Nesta comunicação foi apresentada uma nova técnica para identificar o conjunto das máquinas críticas no estudo e análise da estabilidade transitória de um Sistema de Energia Eléctrica. A metodologia apresentada utiliza um método híbrido extremamente fiável e flexível, que possibilita a modelização minuciosa dos diferentes componentes da rede eléctrica, a simulação de vários cenários de contingência, bem como a identificação conveniente dos diversos modos de instabilidade. O esquema desenvolvido foi aplicado a uma rede de teste e, da análise dos resultados obtidos, podem retirar-se as seguintes conclusões:

- verificou-se uma perfeita concordância entre as soluções produzidas pelo programa de simulação no domínio do tempo e os resultados obtidos pela técnica proposta;
- o conjunto das máquinas críticas foi correctamente identificado, sem qualquer excepção, em todas as situações estudadas;
- o método híbrido é computacionalmente eficiente, pois, para cada cenário analisado, obteve-se um tempo total de simulação aceitável, compatível com as condições de funcionamento em tempo real.

Referências

- [1] M. Pavella e P. G. Murthy, *Transient Stability of Power Systems: Theory and Practice*, Wiley, England (1994).
- [2] P. M. Anderson e A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, Wiley-IEEE Press, 2nd Edition, New York (2002).
- [3] B. Lee, S. Kwon, J. Lee, *et al.*, “Fast contingency screening for online transient stability monitoring and assessment of the KEPCO system”, *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 150, No. 4, pp. 399-404, Julho de 2003.
- [4] Y. Xue, e M. Pavella, “Critical cluster identification in transient stability studies”, *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 140, No. 6, pp. 481-489, Novembro de 1993.
- [5] A. A. Fouad, V. Vittal, *Power System Transient Stability Analysis*, Prentice Hall, New Jersey (1992).
- [6] C. M. Machado Ferreira, J. A. Dias Pinto e F. P. Maciel Barbosa, “Transient stability analysis of a multimachine power system using a new hybrid formulation”, in *Proc. IASTED, MIC 2001*, pp. 102-107.
- [7] C. M. Machado Ferreira, J. A. Dias Pinto e F. P. Maciel Barbosa, “TRANSySTEM: an electric power system transient stability software package for teaching and research”, in *Proc. UPEC 2000*, CD-ROM.
- [8] V. Vittal (Chairman), “Transient stability test systems for direct stability methods”, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 7, pp. 37-43, Fevereiro de 1992.
- [9] M. Pavella, D. Ernst e D. Ruiz-Vega, *Transient Stability of Power Systems – A Unified Approach to Assessment and Control*, Kluwer, Boston (2000).
- [10] C. M. Machado Ferreira, J. A. Dias Pinto e F. P. Maciel Barbosa, “Transient stability assessment of an electric power system using the bisection algorithm combined with the dot product criteria”, in *Proc. ELECO 1999*, Bursa, Turquia, pp. 329-332.
- [11] T. Athay, V. R. Sherkat, R. Podmore, *et al.*, “Transient energy stability analysis”, in *Proc. Conference on Systems Engineering for Power: Emergency Operating State Control*, Section IV, Davos, Suíça, (1979).
- [12] B. Lee, S. Kwon, J. Lee, *et al.*, “Fast contingency screening for on-line transient stability monitoring of the KEPCO system”, in *Proc. IEEE PES Summer Meeting*, 2001, pp. 314-319.