تقييم الاستقرارية العابرة لمنظومة القدرة بطريقة مجال الأستقرارية العابرة [+]

ASSESSMENT OF POWER SYSTEM TRANSIENT STABILTY BY TSM METHOD

مجلي نعمة حواس الخزرجي [*]

المستخلص:

البحث يعرض تطبيق لتحديد مجال الأستقرارية العابرة للمكائن حرجة الاضطراب. تم تخمين مجال الاستقرارية العابرة اعتماداً على معيار تساوي المساحات الموسعة في اختيار الماكنة الحرجة وتبسيط المنظومة المتعددة المكائن الى ماكنة مكافئة واحدة موصله الى عمومي لانهائي لتقيم الاستقرارية العابرة للمكائن المضطربة في منظومة القدرة بشكل سريع وبدون، تشغيل برنامج انسيابية الحمل.

تم تطبيق طريقة تخمين مجال الاستقرارية العابرة على منظومة اختبارية وتم مقارنة النتائج المستحصله بطريقة تخمين مجال الاستقرارية العابرة مع نتائج الطريقة التقليدية ، وتبين ان طريقة تخمين مجال الاستقرارية العابرة دقيقة وتوفر معلومات سريعة حول مجال الاستقرارية العابرة لمنظومة القدرة.

Abstract:

The paper present the determination of the transient stability margin (TSM) of critically disturbed machines, for a given contingency, for real-time applications.
(TSM) was predicted based on Extended Equal-Area criterion (EEAC) in the selection of critical machine and simplified the multi machine system to determine (TSM) for disturbed machine quickly without running a load flow program.
The method has been tested on a standard test system and the obtained result are compared with the benchmark results. The simulation result show that the method can provide reliable precise, and quick information about the transient stability margin of a power system.

قائمة الرموز:	
E_i : الفولتية الداخلية للماكنة رقم i .	$\tilde{\delta}$: زاوية الدوار في المستوى المرجعي المعتمد على المركز الزاوي.
E_j : الفولتية الداخلية للماكنة رقم j .	T_s : زمن الحل، ثانية.
H : ثابت عزم القصور الذاتي ، ميكاواط .	V_t : جهد العمومي اللانهائي، وحدة نسبية.
J : عزم القصور الذاتي، كيلوغرام.متر٢.	ω : إنحراف السرعة الزاوية، نصف قطرية/ثانية.
M : العزم الزاوي، جول.ثانية/زاوية نصف قطرية.	ω_i : السرعة الزاويه اللحظية، نصف قطرية / ثانية.
P_a : قدرة التعجيل ، وحدة نسبية.	ω_s : السرعة التزامنية، نصف قطرية / ثانيه.
P_e : القدرة الكهربائية الخارجة، وحدة نسبية.	

[+] تاريخ استلام البحث ٢٠٠٨/٧/٢١ ،تاريخ قبول النشر ٢٠١١/٥/٤ .

[*] أستاذ مساعد / كلية التقنيات الكهربائية والالكترونية

P_m : القدرة الميكانيكية الداخله، وحدة نسبية.	ω_c : السرعة الزاوية لحظة إزالة الخطأ، نصف قطرية / ثانية.
T_c : زمن ازالة الخطأ،ثانية.	X : مفاعلة خط النقل، وحدة نسبيه.
δ_o : زاوية الدوار الابتدائية ، نصف قطرية.	$X\bar{d}$: المفاعلة العابرة، وحدة نسبيه.
δ_i : زاوية الدوار للماكنة رقمi في المنظومة متعددة المكائن، نصف قطرية.	**قائمة المختصرات :-**
δ_i^u : زاوية الدوار العظمى، نصف قطرية.	TSM : مجال الاستقرارية العابرة.
G_{ii} : المواصلة الذاتية عند النقطة الداخلية للماكنة رقم i.	EEAC : طريقة تساوي المساحات الموسعة.
B_{ij} : مواصلة الانتقال بين الماكنتين i و j.	A_{acc} : مساحة التعجيل.
δ_{ij} : زاوية الدوار بين الماكنتين i و j، نصف قطرية.	A_{dec} : مساحة التباطؤ.
P_e^{df} : القدرة الكهربائية الخارجة أثناء الخطأ ، وحدة نسبية.	CCT: زمن الإزالة الحرج، ثانية.
P_e^{pf} : القدرة الكهربائية الخارجة بعد أزالة الخطأ، وحدة نسبية.	COA : المستوى المرجعي المعتمد على مركز الزاوية.
	KE: الطاقة الحركية، جول . نصف قطرية / ثانية.
	S.B.S : طريقة الخطوة – خطوة أو الطريقة التقليدية.

المقدمة:

أن الأستقراريه العابرة لمنظومه تجهيز القدره الكهربائيه مرتبطه بتحديد اكبر زمن يسمح به لأي أضطراب مفاجئ (sudden disturbance) من دون أن تفقد المنظومه استقراريتها وهذا الزمن يدعى زمن ازالة العطل الحرج (Critical Fault Cleaning Time). [٢،١]

ولمعرفة CCT زمن إزالة العطل الحرج للمنظومة نستخدم الطرائق غير المباشرة او الطرائق المباشرة حيث تمتاز الطرائق المباشرة الى عدم الحاجة الى اكمال الحل كما هو الحال في الطرائق غير المباشرة مما يقلل الوقت اللازم للحكم على استقرارية المنظومة [٤،٣]

ومن الطرائق المباشرة قاعدة المساحات المتساوية (Equal Area Criterion) والتي تعتمد على توازن الطاقة في المولد لتحديد استقرارية المنظومة ومن محددات هذه الطريقة انها تستخدم لتحليل استقرارية منظومات القدرة أحادية الماكنة ولا يمكن استخدامها لمنظومات القدرة متعددة المكائن وتوسيعها لمنظومات متعددة المكائن يتم من خلال قاعدة مجال الاستقرارية العابرة Transient Stabiltiy Margin (TSM) وهي طريقة مباشرة دقيقة وسريعة لتحديد ال TSM للمكائن حرجة الأضطراب عند زمن ازالة معين [٦،٥]

معادلة التارجح Swing Equation:

تعتمد دينامكية دوار المولد والتي بدورها تحكم استقرارية المنظومة والعلاقة كما ياتي [٧،٢،١]:

$$M_i \frac{d^2\delta_i}{dt^2} = P_{mi} - P_{ei} \quad ...(i = 1,2,...,n) \qquad ...(1)$$

والقدرة الكهربائية الخارجة من اي من المولدات يمكن ان تعطى بالعلاقة الأتية :

$$P_{ei} = |E_i|^2 G_{ii} + \sum_{\substack{i=1 \\ j\neq 1}}^{n} E_i E_j B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \dots (\mathrm{i} = 1,2,\dots,\mathrm{n}) \qquad \dots(2)$$

من خلال برنامج (MATLAB) نكرر تكامل المعادلات التفاضلية المشار اليها في المعادلة (١) لكل ماكنة في المنظومة خلال وجود العطل وبعد ازالته وتعاد هذه العملية لكل زمن عطل (fault clearing time) ثم ينظر الى تصرف المكائن المتعددة من خلال منحنى زاوية الدوار – الزمن فأن أحدى المكائن او اكثر من ماكنة تأرجحت حول زاوية الدوار الأبتدائيه δ_o فأن هذا التارجح يضمحل بوجود عامل التخميد أما في حالة تزايد زاوية الدوار لماكنة أو اكثر من ماكنة فأن هذه الماكنة أو هذه المجموعة من المكائن في حالة إضطراب يؤدي إلى فقدان التزامن أو فقدان الأستقرارية.[١،٢،٣،٤]

قاعدة تحديد مجال الاستقرارية العابرة Transient Stability Margin (TSM) [٧،٨،٩]:

وهي توسيع لقاعدة المساحات المتساوية على منظومات متعددة المكائن لتحديد نطاق أو مجال الأستقرارية العابره (TSM) للمكائن حرجة الاستقرارية عند زمن ازالة معين.

معادلة التأرجح للماكنة i في منظومة عدد مكائنها n في المستوى المرجعي المعتمد على المركز الزاوي Center Of Angle كما يأتي :

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i \qquad \dots(3)$$

$$\omega_i = (P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COA}) \Big/ M_i \qquad \dots(4)$$

Where

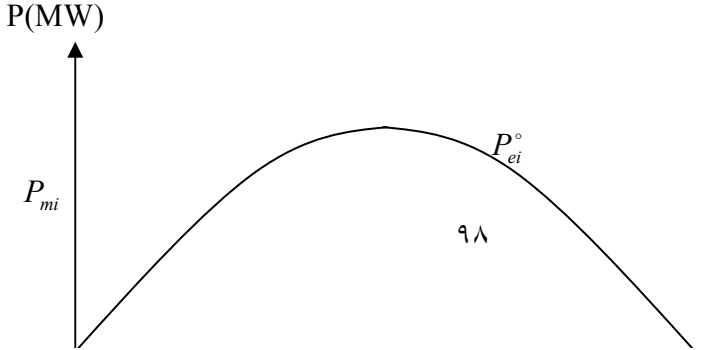
$$M_T = \sum_{i=1}^{n} M_i$$

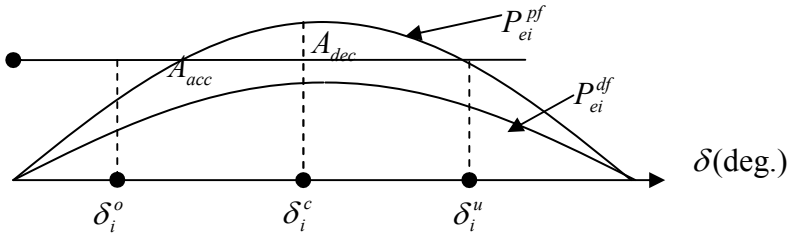
$$P_{COA} = \sum_{i=1}^{n} P_{mi} - \sum P_{ei}$$

نفترض حصول اضطراب في منظومة القدرة الكهربائية ، الماكنة رقم i هي ماكنة الاستقرار الحرج (Marginally stability critical machine) اي بمعنى انها تتأرجح حول الزاوية الابتدائية δ_i° الى نقطة عدم الاستقرار $\overset{u}{\delta}_i$ ، شكل (١)أي ان :

$$\omega_{i(to)} = \omega_{i(t_u)} = 0 \qquad \dots(5)$$

$$M_i \int_{to}^{tu} \omega dt = \int_{to}^{\mathrm{tu}} (P_{mi} - P_{ei} \frac{M_i}{M_t} P_{COA}) dt = 0 \qquad \dots(6)$$





شكل (١) قاعدة المساحات المتساوية

وبضرب طرفي المعادلة (6) بـ ω_i حصل على

$$M_i \int_{\omega_i(to)}^{\omega_i(tu)} \omega_i \, \mathrm{d}\omega = \int_{\delta_i(to)}^{\delta_i(tc)} (P_{mi} - P_{ei}^{df}) d\delta_i + \int_{\delta_i(to)}^{\delta_i(tc)} (P_{mi} - P_{ei}^{pf}) d\delta_i = 0 \qquad ....(7)$$

$$\int_{\delta_i(tc)}^{\delta_i(tu)} (P_{mi} - P_{ei}^{df}) d\delta_i = - \int_{\delta_i(tc)}^{\delta_i(tu)} (P_{mi} - P_{ei}^{pf}) d\delta_i \qquad ....(8)$$

حيث ان

$$P_{ei}^{df} = P_{ei}^{df} + \frac{M_i}{M_T} P_{COA}$$

$$P_{ei}^{pf} = P_{ei}^{df} + \frac{M_i}{M_T} P_{COA}$$

$$Aacc = Adec \qquad ....(9)$$

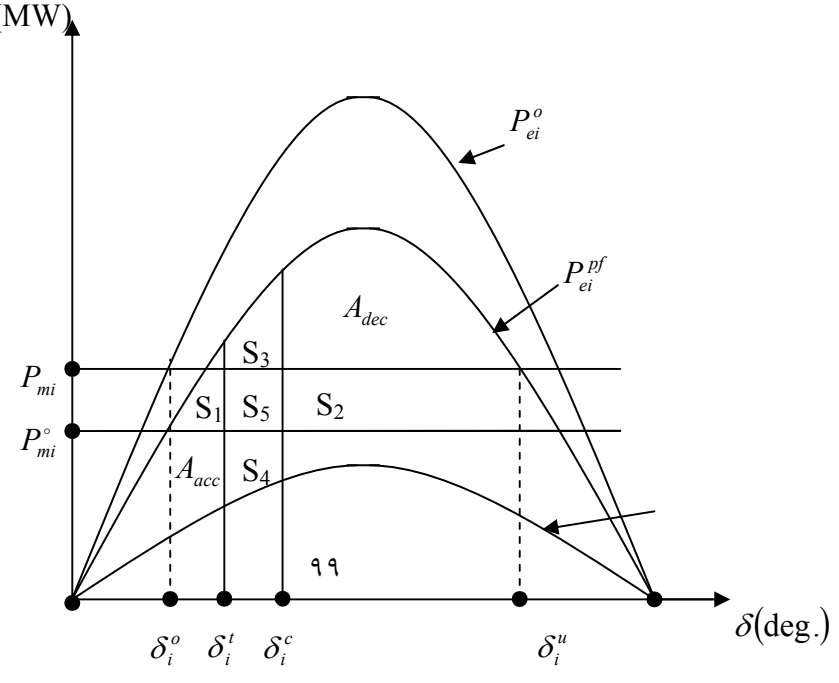
نلاحظ من الشكل (2) ما ياتي:

$$\Delta Aacc = (P_{mi} - P_{mi}^{\circ})(\delta_i^t - \delta_i^0) - (P_{mi}^0 - P_{ei}^{df})(\delta_i^c - \delta_i^t)$$

$$\Delta Aacc = S_1 - S_4$$

$$\Delta Adec = (P_{ei}^{pf} - P_{mi}^o)(\delta_i^c - \delta_i^t) - (P_{mi} - P_{ei}^o)(\delta_i^u - \delta_i^c)$$

$$\Delta Adec = S_3 - S_2$$



P_{ei}^{df}

افرض $\Delta Aacc = \Delta Adec$

أذن $S_1 - S_4 = S_3 - S_2$

أو $S_1 + S_2 + S_5 = S_3 + S_4 + S_5$

حيث أن

$$(P_{mi} - P_{mi}^{\circ})(\delta_i^u - \delta_i^o) = (P_{ei(\delta_c)}^{pf} - P_{ei(\delta_c)}^{df})(\delta_i^c - \delta_i^t) \quad ...(10)$$

لحساب (δ_i^t) افرض أن الدوار يتأرجح إلى الزاوية (δ_i^{tl}) غير مرئية في الشكل (٢) عند زمن إزالة حرج يساوي t و ΔP_{mi} يساوي صفراً تحت هذه الظروف نقراً بسهولة قيمة الزاوية (δ_i^t) من التشغيل الابتدائي لبرنامج الأستقرارية العابرة ولكن كم تكون قيمة (δ_i^t) في حالة $\Delta P_{mi} \neq 0$ عندئذ تصبح

$$(\delta_i^t) = (\delta_i^{tl}) + \Delta\delta_i \quad ...(11)$$

$$\Delta\delta_i = \frac{1}{2}\frac{\Delta P_{mi}}{M_i}t^2 \quad ...(12)$$

المخطط الانسيابي:

يبين المخطط الانسيابي ان الاستقرارية العابرة لمنظومات القدرة متعددة المكائن يمكن تخمينها من خلال موازنة التغير في التوليد والحمل لبيانات الاستقرارية دون الحاجة الى إعادة تشغيل برنامج انسيابية الحمل. ومن خلال تخمين مجال الاستقرارية العابرة للماكنة الحرجة رقم i وعند زمن ازالة مقداره (t) نحدد مجال الاستقرارية كما يأتي:

١. لزمن ازالة معطى نطبق قاعدة المساحات المتساوية (E.A.C) للمنظومة متعددة المكائن ونخمن اعظم قدرة خارجة للماكنة الحرجة اي بمعنى (القدرة الخارجة التي تجعل المنظومة مستقرة المدى، لأحداث طارئة وزمن ازالة معينين).

٢. نتاكد فيما اذا كانت اعظم قدرة مخمنة في الخطوة الاولى صحيحة ام لا، هذه الخطوة تتطلب تنفيذ محاكاة زمن الحل كاملاً.

٣. نعمل تصحيح لنتائج الماكنة الحرجة كما معطى بالخطوة الاولى طبقاً لنتائج الخطوة الثانية.

٤. نحسب نسبة الخطأ من العلاقة الاتية:-

$$\text{نسبة الخطأ} = \frac{\text{زمن الازالة الحرج المتوقع } CCT_e - \text{زمن الازالة الحرج الاصلي } *CCT}{\text{زمن الإزالة الحرج الأصلي } *CCT}$$

وكما تبين النتائج في الجدولين (١) و (٢).

النتائج :

أظهرت نتائج تخمين مجال الاستقرارية العابرة ومن خلال العلاقة :

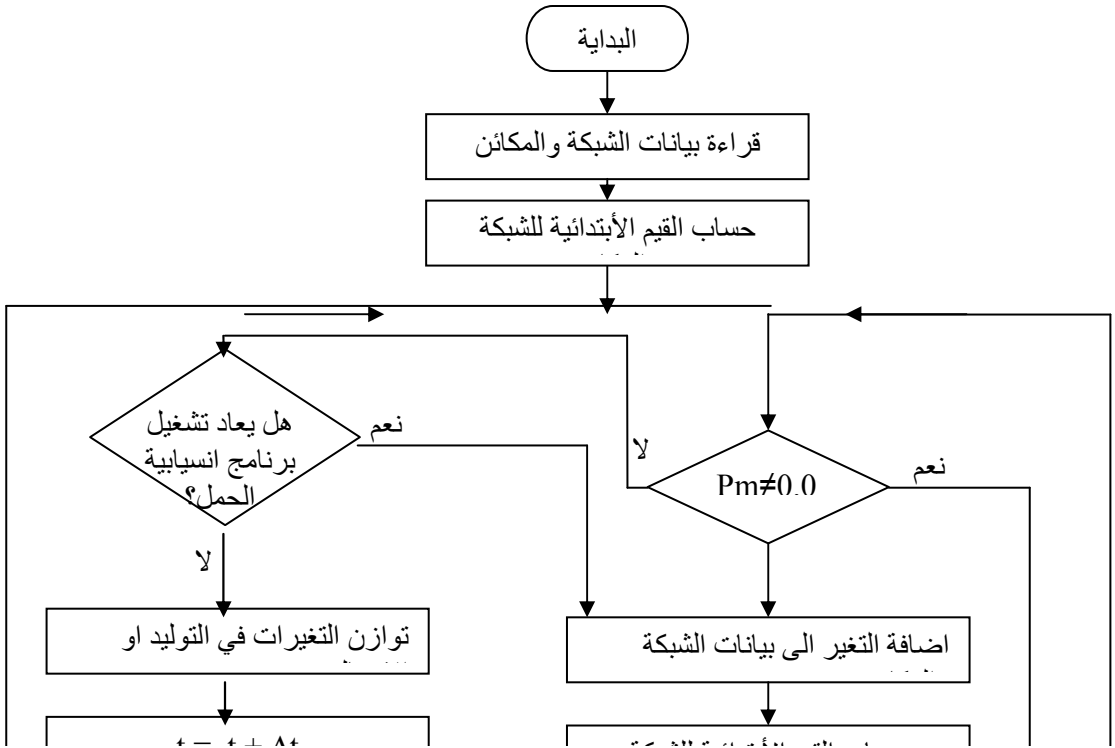
$$\Delta P_{mi} = \frac{(P^{pf}_{ei(t_{c+})} - P^{df}_{ei(t_{c-})})(\delta^c_i - \delta^{tl}_i)}{\delta^u_i - \delta^o_i + ((P^{pf}_{ei(t_{c+})} - P^{df}_{ei(t_{c-})})/(2M_i))t^2}$$

ان القدرة العابرة لمنظومات القدرة متعددة المكائن يمكن تخمينها من خلال موازنة التغير في التوليد والحمل لبيانات تحليل الاستقرارية دون الحاجة الى اعادة تشغيل برنامج انسيابية الحمل. ومن خلال تخمين مجال الاستقرارية العابرة للماكنة الحرجة رقم i و عند زمن إزالة مقداره (t) نحدد مجال الاستقرارية، والجدول (١) يبين النتائج الاولية حسب حالات المنظومة الاختبارية (s1) ، الخطأ يحسب من العلاقة ،

النسبة المئوية للخطأ = $\frac{\text{زمن الإزالة الحرج الأصلي *CCT} - \text{زمن الإزالة الحرج CCT}}{\text{زمن الإزالة الحرج الأصلي *CCT}}$

والجدول (٢) يبين نتائج التخمينات لاستقرارية المنظومة الاختبارية (S1). الخطأ يحسب من العلاقة ،

النسبة المئوية للخطأ = $\frac{\text{زمن الإزالة الحرج المتوقع } CCT_e - \text{زمن الإزالة الحرج الاصلي *CCT}}{\text{زمن الإزالة الحرج الأصلي *CCT}}$



جدول (١) النتائج حسب حالات المنظومة الأختبارية (S1)

الحالة للمنظومة	ظروف انسيابية الحمل (ميكاواط)	زمن الازالة الحرج الاصلي *CCT(ثانية)	زمن الازالة الحرج CCT ثانية	نسبة الخطأ% $\frac{CCT^* - CCT}{CCT^*}$
الاصلية	الابتدائية	–	٠,٤٤	–
١	التغير في قدرة المولدة رقم١ $11 = (\Delta P_{g1})$	٠,٣٦	٠,٣٦	٠,٠
٢	التغير في قدرة المولدة رقم١ $11 = (\Delta P_{g1})$ التغير في الحمل رقم ٦ $0.8 = \Delta P_{L6}$	٠,٣٨	٠,٣٨	٠,٠

الجدول (٢) نتائج التخمينات لإستقرارية المنظومة الاختبارية (S1).

زمن الازالة الحرج المتوقع CCTe (ثانية)	التخمين الاول لمجال الاستقرارية				التصحيح الأول لتخمين مجال الأستقرارية			
	نطاق الاستقرارية العابرة (TSM) ميكا واط	زمن الازالة الحرج CCT (ثانية)	زمن الازالة الحرج الاصلي CCT* (ثانية)	نسبة الخطأ % $\frac{CCT^* - CCTe}{CCT^*}$	نطاق الاستقرارية العابرة (TSM) ميكا واط	زمن الازالة الحرج CCT (ثانية)	زمن الازالة الحرج الاصلي CCT* (ثانية)	نسبة الخطأ $\frac{CCT^* - CCTe}{CCT^*}$ %
٠,٢١	-٥٤	٠,٢٣	٠,٢٣	-٠,٩	-٤٨	٠,٢١	٠,٢١	٠,٠
٠,٣١	-٣٩	٠,٣٤	٠,٣٤	-٠,٩	-٣٢	٠,٣٠	٠,٣٩	-٠,٢٦
٠,٥١	٨	٠,٤٩	٠,٤٩	٠,٣٩	٧	٠,٥٨	٠,٥١	٠,٠

الاستنتاجات :

من خلال تحليل الاستقرارية العابرة بطريقة الخطوة – خطوة (S.B.S) غير المباشرة وطريقة تخمين مجال الاستقرارية العابرة (TSM) (طريقة تساوي المساحات لمكائن متعددة) المعتمدة على معيار تساوي المساحات الموسعة، وتبين أن طريقة تخمين مجال الاستقرارية العابرة (TSM) المباشرة ، ذات كفاءة فيما يتعلق بتحديد زمن الازاله الحرج CCT والزمن المستغرق للحل وسعة الحجز المطلوب للخزن على الحاسوب ، اضافة الى سهولتها وبساطتها في التطبيق ونلخص مميزات طريقة ال (TSM) المباشرة بالنقاط الاتية :

١. يمكن تمثيل الماكنة او الشبكة باي نموذج رياضي وبأي تفصيل مطلوب.
٢. تاخذ بنظر الاعتبار التغير الحاصل بالقدرة الميكانيكية $\Delta P_m \neq 0$ بينما يعتبر $\Delta P_m = 0$ في طرق التحليل المباشرةالاخرى.
٣. تقليل الزمن الحسابي مقارنة بالطرقة التقليدية للأسباب الاتية :

أ- لاتحتاج الى اعادة تشغيل برنامج انسيابية الحمل عند تغير القدرة الميكانيكية الداخلة او تغير الحمل .

ب- إختيار الماكنة حرجة الاضطراب وتبسيط المنظومة المتعددة المكائن الى ماكنة مكافئة موصلة الى عمومي لانهائي.

٤. بينت النتائج لنسبة الخطأ في الجدولين (1)،(2) ان نسبة الخطأ، تقترب من الصفر خاصة عند التصحيح الاول لتخمين مجال الاستقرارية العابرة. مما يوفر وثوقيه بنتائج الطريقة في تحليل الاستقرارية العابرة وتطبيقها في مجال حماية منظومات القدرة.

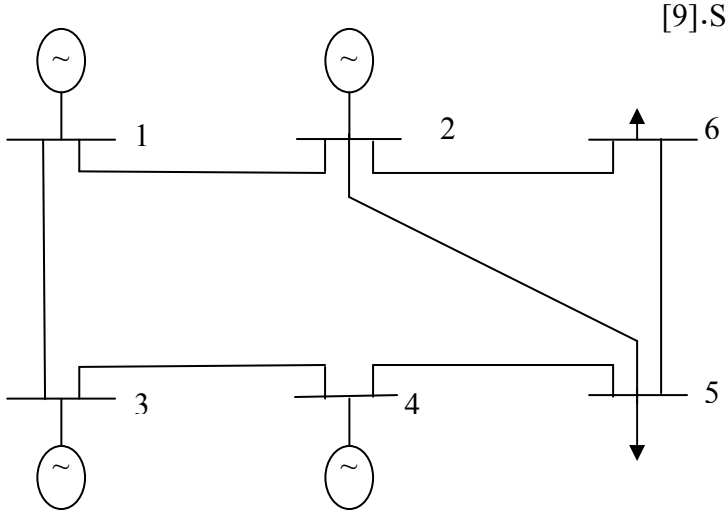
المصادر:

1- Kothari. D.P, Nagrath. I.J," *Modern Power System analysis*",3rd edition, Tata Mc Graw Hill Pub.Comp.,Newdelhi,2004.

2- P.M. Anderson and A.A. Fouad , "*Power System Control and Stability* ",IEEE press, New York 1994.
3- Vijay Vittal, "Transien and Control of Iraq Scale Power Systems", *Power System Engineering Reseaarch Center,*428 phillips Hall, Comell University, Sept. 2003.
4- Kunder .P, "*Power system stability control*" , Mc Graw-Hill,New York, 1994.
5- Dong .Y, H.R. pota, "Transient Stability Margin prediction using equal-area criterion",*IEE Proceedings* – c,vol. 140 No.2, March 1993.
6- Y.Xue, M. Ribbens – Pavella,"Extended Equal-Area Criterion: An Analytical Ultra –Fast Method for Transient Stability Assessment and preventive Control of power system",*Electric power & Energy system*, Vol. 11, No.2 Apr. 1989, PP. 131-149
7- Y. Xue , P. Rousseaux, Z. Gao, L. Wehenkel M. pavella, R. Belhomm E. Euxibie, B Heilbronn, " Dynamic Extended Equal Area Criterion", part 1. Basic formula Aihens *Power Tech*,sep 1993.
8- Y. Xue, M. Ribbens – pavella , "Extended Equal area criterion revisited" An Analytical ultra – fast method for transient stability preventive control of power system, electric *power & energy system* Vol.7 No 3 , August 1992. PP1012-1017.
9- M. N. AL-KAZREJI, "*Instructional Program Design For Transient Stability Assessment Of Multi-machine Power System Using Direct Method"* AThesis submitted to the University of Technology for the degree of doctor of philosophy, Baghdad, Iraq,1996.

ملحق (١)

بيانات المنظومة الاختبارية S1.[9]



المنظومة الاختبارية S1 منظومة قدرة كهربائية ، اربع مكائن .

جدول (١) ثوابت المكائن التزامنيه.

رقم المولد	رقم العمومي الموصل اليه المولد	القدرة المقننه للمولد (كيلو فولت أمبير)	الثابت H ميكا واط. ثانية/ ميكا فولت أمبير	المفاعلة العابرة (X_d) وحدة نسبية
١	1	100	100	0.004
٢	2	15	1.5	1.0
٣	3	30	2	0.4
٤	4	40	3	0.5

جدول (٢) بيانات الظروف الابتدائية للمكائن التزامنيه قبل العطل.

رقم المولد	رقم عمومي المولد	الفولتيه الداخلية (وحدة نسبية)	زاوية الدوار(نصف قطرية)	القدرة الميكانيكية (وحدة نسبية)
١	١	١,٠٠٠	٠,٠٠١٧	٠,٣٣٢
٢	٢	١,٠٠٢	٠,٠٩٢٥	٠,١٠٠
٣	٣	١,٠٨٤	٠,١٩٧٢	٠,٢٠٠
٤	٤	١,٠٢٥	٠,٠٩٧٧	٠,٣٠٠

جدول (٣) ثوابت خطوط النقل.

الخط		الممانعة (وحدة نسبية)	
الأرسال	الأستقبال	مقاومة	مفاعلة
١	٢	٠,٠٥	٠,٢٠
٢	٤	٠,١	٠,٥
٢	٥	٠,٢	٠,٥
٣	٥	٠,١	٠,٣
٤	٣	٠,٢	٠,٨

٥	٦	٠,٢	٠,٤
٦	١	٠,٢	٠,١٥

جدول (٤) بيانات الظروف الابتدائية وتوزيع الحمل والتوليد للمنظومة قبل العطل .

رقم العمومي	الجهد (وحدة نسبية)	الزاوية درجة	قدرة المولد الفعالة (P_G) ميكا واط	قدرة المولد غير الفعالة (Q_G)ميكا فولت أمبير متفاعل	قدرة الحمل الفعالة (P_L) ميكا واط	قدرة الحمل غير الفعالة (Q_L) ميكافولت أمبير متفاعل
١	١,٠	٠,٠	٣٣,٢	٩,١	٠,٠	٠,٠
٢	١,٠٠٢	٠,١٢	١٠	٥	٢,٠	١٠
٣	١,٠٨٤	٤,٦٢	٣٠	٢٠	٠,٠	٠,٠
٤	١,٠٢٥	١,٤١	٢٠	١٠	٠,٠	٠,٠
٥	٠,٩٥٦	-٢,٨	٠,٠	٠,٠	٤٠	١٥
٦	٠,٩٥٣	-٢,٣	٠,٠	٠,٠	٣٠	١٠

المعالم لخطوط النقل ومفاعلات المولدات اعطيت للأساس ١٠٠ ميكا فولت أمبير، تردد المنظومة ٦٠ ذبذبة / ثانية.