برنامج STABILITY 3 بلغة Delphi لتحليل الاستقرار العابر لنظام قدرة كهربائية باستخدام طريقة تابع الطاقة العابرة

الدكتور علي حمزة المهندس محمد عمار ساعاتي
قسم هندسة الطاقة الكهربائية
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
جامعة دمشق

الملخص

تؤلف دراسة الاستقرار العابر إحدى أهم عمليات التخطيط التشغيلي لنظام القدرة الكهربائية. و ينصب الاهتمام في مجال دراسة الاستقرار العابر على حساب زمن الفصل الحرج t_{cc} لعطل يصيب الشبكة في موقع ما منها. ونظرا لأن الطرق التخطيطية قد أبدت عجزها عن حساب هذا المحدد الهام، كان لابد من استخدام طرق تحليلية حاسوبية تعتمد الحل العددي لمعادلات التأرجح التفاضلية العائدة لمولدات النظام. وعلى الرغم من أن هذه الطرق التحليلية التقليدية قد أعطت نتائج مقبولة، إلا أنه يعتريها بعض السلبيات مثل الجهد الحسابي الكبير اللازم واستخدام طريقة التجربة والخطأ للحصول على t_{cc}.

هذا البحث يقدم طريقة تحليلية غير تقليدية هي طريقة تابع الطاقة العابرة، ويبرهن قدرة هذه الطريقة على تحليل الاستقرار العابر بأقل جهد حسابي لا يتطلب حل معادلات التأرجح التفاضلية إلاّ مرحلة واحدة هي مرحلة في أثناء العطل.

يتضمن البحث عرض النموذج الرياضي وبناء خوارزمية عامة وتصميم وتنفيذ برنامج حاسوب STABILITY3 بلغة Delphi ، والتثبت من صحته بواسطة تطبيقه على شبكات اختبارية، و استخدام البرنامج المنجز لدراسة الاستقرار لجزء من الشبكة السورية.

وحسب علمنا فإن هذه الورقة العلمية هي أول نص باللغة العربية في موضوع البحث، كما أن البرنامج المنجز هو برنامج رائد في القطر.

1- مقدمة Introduction

تؤلف دراسة الاستقرار العابر لنظم القدرة الكهربائية إحدى أهم عمليات تخطيطها التشغيلي. و ينصب الاهتمام في تحليل الاستقرار العابر على حساب زمن الفصل الحرج t_{cc} لعطل ما يصيب الشبكة في موقع منها. وتعتمد الطريقة التقليدية لتحليل الاستقرار العابر لنظام قدرة كهربائية على الحل العددي لمعادلات التأرجح التفاضلية لأجل حالات النظام الثلاث: قبل العطل، في أثناء العطل، بعد العطل. وقد قمنا في بحث سابق /1/ بتصميم وتنفيذ برنامج STABILITY1 لدراسة الاستقرار العابر لنظام قدرة كهربائية بسيط بهدف اختبار مدى ملاءمة ثلاث من طرق التحليل العددي الشهيرة لحل معادلات التأرجح. كما أنجزنا في بحث آخر /2/ بناء خوارزمية عامة وتصميم وتنفيذ برنامج حاسوبي STABILITY2

لدراسة الاستقرار العابر لنظام قدرة متعدد الآلات بالاعتماد على طريقة Runge-Kutta في حل المعادلات التفاضلية للحالات الثلاث.

أعطت الطرق التقليدية المستخدمة نتائجَ مقبولة لزمن الفصل الحرج للقواطع الآلية بالإضافة إلى جواب "نعم" أو "لا" لاستقرار النظام. ولهذه الطرق ميزات أهمها أنها تسمح باعتماد نماذج رياضية لمركبات النظام بالدرجة المرغوب بها من حيث الدقة والتعقيد. إلا أن ثمة مساوئَ لهذه الطرق مثل الجهد الحسابي الكبير اللازم والذي يزداد مع حجم النظام وتعقده والتفصيلات المطلوبة للنمذجة، بالإضافة إلى سلبية أخرى وهي أن هذه الطرق لا تسمح بتكوين تصور فيزيائي واضح للأداء الكيفي لجملة المعادلات التفاضلية، أو بالأحرى لاستجابة النظام لتغيرات ممكنة في محددات النظام (تحليل حساسية النظام).

هذا الوضع دفع إلى دراسة إمكانية استخدام طرق بديلة غير تقليدية مباشرة. ومن هذه الطرق غير التقليدية طريقة تابع الطاقة العابرة Transient Energy Function TEF لتحليل الاستقرار العابر لنظم القدرة الكهربائية. إحدى إيجابيات هذه الطريقة الهامة هي عدم الحاجة لحل معادلات تفاضلية إلا من أجل مرحلة في أثناء العطل فقط، ويتم تجنب التكامل المتكرر لمعادلات التأرجح لمرحلة بعد العطل بهدف حساب t_{cc} والذي يأخذ حصة الأسد في زمن الحساب الإجمالي في النمذجة الرقمية الصرفة. وهكذا يمكن توقع توفير زمن حساب كبير.

وتجدر الإشارة إلى أن هذا البحث هو أول نص باللغة العربية يتناول هذا الموضوع الهام، ومن ثَمَّ يُعد البرنامج الحاسوبي المنجز أول برنامج في القطر .

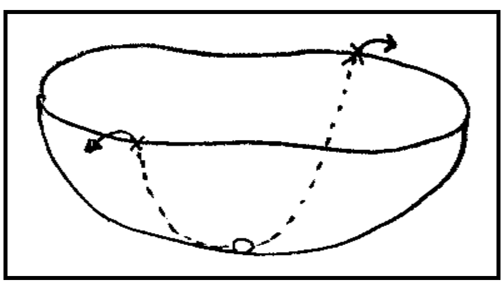
2 - وصف طريقة تابع الطاقة العابرة TEF

Description of Transient Energy Function approach

تؤلف هذه الطريقة حالة خاصة من طريقة ليابونوف Lyapunov العامة إذ يؤلف تابع الطاقة أحد توابع ليابونوف الممكنة /3/.

2-1- تطبيق على الكرة المتدحرجة Rolling ball analogy /3/:

يمكن توضيح طريقة الطاقة العابرة باستخدام نظام مؤلف من كرة تتدحرج على السطح الداخلي لتجويف Bowl ما كما هو مبين في الشكل 1. تمثل المساحة داخل التجويف نطاق الاستقرار Region of stability، وتمثل المساحة خارج التجويف نطاق اللااستقرار Region of instability . نفرض أن حافة التجويف غير منتظمة الشكل؛ بحيث تقع المواضع المختلفة على الحافة على ارتفاعات مختلفة.



الشكل 1 : كرة متدحرجة عل السطح الداخلي لتجويف

بداية تستقر الكرة في قاع التجويف مستقرة في موقع ندعوه نقطة التوازن المستقر (ن ت م) Stable Equilibrium Point (SEP). عندما تُحقن الكرة بطاقة حركية ما Kinetic energy، تتحرك من مكانها على السطح الداخلي وفق مسار يحدده اتجاه الحركة الابتدائية. وستتوقف الكرة في نقطة ما معتمدة على كمية الطاقة الحركية الابتدائية المحقونة. إذا حولت الكرة كل الطاقة الحركية إلى طاقة كامنة قبل وصولها لحافة التجويف، فستعود الكرة ثانية إلى ن ت م. أما إذا كانت الطاقة الحركية المحقونة في الكرة كبيرة لدرجة تكفي لتجاوز الحافة، تدخل الكرة نطاق اللااستقرار وسوف لا تعود إطلاقاً إلى ن ت م .

إن السطح الداخلي للتجويف يمثل سطح الطاقة الكامنة Potential energy surface، وتمثل حافة التجويف سقف الطاقة الكامنة Potential Energy Boundery Surface (PEBS).

تلزم كميتان لتحديد إمكانية دخول الكرة نطاق اللااستقرار:

أ- الطاقة الحركية الابتدائية المحقونة.

ب- ارتفاع الحافة عند نقطة العبور، حيث يعتمد موقع نقطة العبور على اتجاه الحركة الابتدائية.

2- 2- تطبيق على نظام قدرة كهربائية – نظرة عامة:

إن تطبيق طريقة تابع الطاقة العابرة على تحليل استقرار نظام القدرة يشابه من حيث المفهوم تطبيقها على الكرة المتدحرجة في تجويف.

بداية يعمل نظام القدرة عند نقطة توازن مستقرة. عندما يحدث عطل، يختل التوازن وتتسارع المنوبات. في أثناء فترة العطل يكتسب نظام القدرة طاقة حركية تتحول تدريجياً إلى طاقة كامنة ويبتعد النظام عن ن ت م . بعد تحرير العطل يستمر تحول الطاقة الحركية إلى طاقة كامنة على نحو مشابه لتدحرج الكرة صاعدةً على سطح الطاقة الكامنة للتجويف. ولتجنب عدم الاستقرار، يتعين على النظام امتصاص الطاقة الحركية في الفترة الزمنية التي تقوم فيها القوى المؤثرة في المنوبات بدفع النظام إلى وضعيات توازن جديدة. إنَّ تحقيق هذا الشرط يعتمد على قدرة نظام القدرة بعد العطل على امتصاص الطاقة. لأجل نظام قدرة "بعد العطل" معين، هناك كمية حرجة أو أعظمية من الطاقة العابرة يستطيع النظام امتصاصها و ندعوها الطاقة الحرجة Critical Energy.

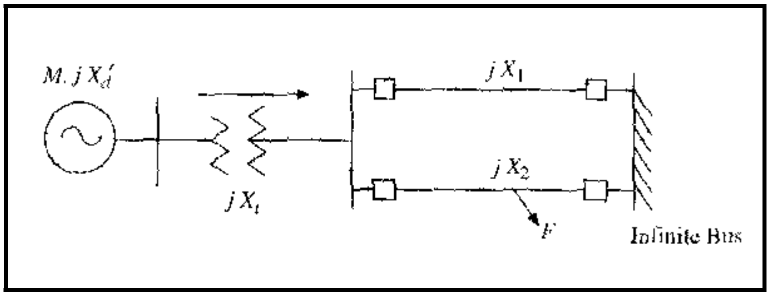
تأسيساً على ذلك، يتطلب تقويم وتقدير الاستقرار العابر:

أ- توابع تصف على نحو كافٍ الطاقة العابرة المسؤولة عن فصل واحدة أو أكثر من المنوبات عن بقية النظام.

ب- تقدير قيمة الطاقة الحرجة .

3 النموذج الرياضي Mathematical model:

لأجل نظام قدرة ذي باسين (الشكل 2) مؤلف من خطين على التفرع يربطان منوبة عبر محول إلى باس لا نهائي، يحصل عطل متوازن في منتصف أحد الخطين في اللحظة $t = o$ ، ويحرر العطل في اللحظة $t = t_c$.



الشكل 2 : شبكة مولد – باس لانهائي

نقطة التشغيل الابتدائية تكون عند $\delta = \delta_o$.

سنقوم في هذه الفقرة بحساب تابع الطاقة العابرة لنظام القدرة بعد تحرير العطل، ثم سنجري مقارنة بين طريقة المساحات المتساوية وطريقة تابع الطاقة /4/.

1-3 حساب تابع الطاقة لنظام قدرة ذي باسين: /4/

يبين الشكل 3 منحنيات الاستطاعة – زاوية للنظام ومنحني الطاقة الكامنة (منحنيات توضيحية فقط) للشبكة المبينة في الشكل 2 .

معادلة التأرجح للنظام بعد العطل Post fault system هي:

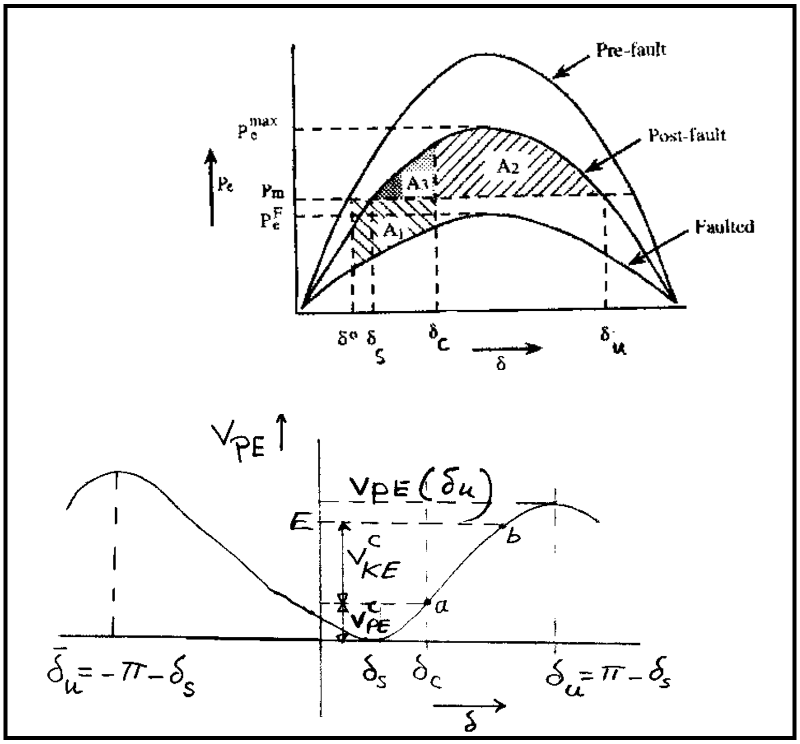
$$M\frac{d^2\delta}{dt^2}=P_m - P_e^{max}\sin\delta \qquad (1)$$

حيث:

$M =$ ثابت العطالة بالوحدة $= \dfrac{H}{\pi f}$

السرعة النسبية للدوار $= \omega = \dfrac{d\delta}{dt}$

$\delta =$ زاوية دوار المنوبة نسبة إلى الباس اللانهائي.



الشكل 3: منحني استطاعة-زاوية و منحني الطاقة الكامنة للشبكة المبينة في الشكل 1

الطرف الأيمن من المعادلة السابقة (1) يمكن اعتباره مشتقاً جزئياً للطاقة الكامنة $\left(-\frac{\partial V_{PE}}{\partial \delta}\right)$ ومنه:

$$V_{PE}(\delta) = -P_m\delta - P_e^{max}\cos\delta \qquad (2)$$

نضرب طرفي المعادلة (1) بـ $\frac{d\delta}{dt}$ وباعتبار المعادلة (2) نجد:

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{M}{2}\left(\frac{d\delta}{dt}\right)^2 + V_{PE}(\delta)\right] = 0$$

أي:

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{1}{2}M\omega^2 + V_{PE}(\delta)\right] = 0$$

أو اختصاراً:

$$\frac{d}{dt}\left[V(\delta,\omega)\right] = 0 \qquad (3)$$

وعليه فتابع الطاقة لنظام القدرة بعد تحرير العطل هو:

$$V(\delta,\omega) = \frac{1}{2}M\omega^2 + V_{PE}(\delta) \qquad (4)$$

يتضح من المعادلة (3) أن الكمية $V(\delta,\omega)$ هي كمية ثابتة.

تعطى نقطة التوازن بحل المعادلة:

$$0 = P_m - P_e^{max}\sin\delta$$

لنحصل على:

$$\delta_S = \sin^{-1}\left(\frac{P_m}{P_e^{max}}\right)$$

هذه النقطة هي نقطة توازن مستقر وهي محاطة بنقطتي توازن غير مستقر هما:

$$\delta_u = \pi - \delta_s \text{ و } \bar{\delta}_u = -\pi - \delta_s$$

إذا أجرينا تغييراً في الإحداثيات بحيث:

$V_{PE} = 0$ لأجل $\delta = \delta_s$، و استخدمنا المعادلة 2 لأجل $\delta = \delta_s$ ثم طرحناها من 2 نجد:

$$V_{PE}(\delta,\delta_s) = -P_m(\delta-\delta_s) - P_e^{max}(\cos\delta - \cos\delta_s) \qquad (5)$$

وعليه يصبح تابع الطاقة:

$$\begin{aligned} V(\delta,\omega) &= \frac{1}{2}M\omega^2 - P_m(\delta-\delta_s) - P_e^{max}(\cos\delta-\cos\delta_s) \\ &= V_{KE} + V_{PE}(\delta,\delta_s) \end{aligned} \qquad (6)$$

حيث:

الطاقة الحركية العابرة $= V_{KE} = \frac{1}{2}M\omega^2$

الطاقة الكامنة $= V_{PE}(\delta,\delta_s)$

إن تابع الطاقة $V(\delta,\omega)$ يساوي الثابت E حيث E هو مجموع الطاقتين الحركية والكامنة، ويستمر تابع الطاقة ثابتاً حتى لحظة تحرير العطل t_c، باعتبار أن النظام محافظ Conservative.

إنّ $V(\delta,\omega)$ لأجل $t = t_c$ محسوبة من معادلة النظام في أثناء العطل في اللحظة $t = t_c$ (أي نهاية فترة العطل) تمثل في الواقع الطاقة الإجمالية E الموجودة في نظام القدرة في اللحظة $t = t_c$. نقول: إن النظام مستقر إذا استطاع أن يمتص هذه الطاقة بعد تحرير العطل. الطاقة الحركية موجبة دوماً، وهي الفرق بين E و $V_{PE}(\delta,\delta_s)$ كما هو مبين في الشكل 3 .

لأجل $\delta = \delta_s$ (نقطة التوازن المستقر بعد العطل)، يكون كل من V_{KE} و V_{PE} مساوياً للصفر، وذلك لأن $\omega = 0$ و $\delta = \delta_s$ حيث ω هي انحراف السرعة عن السرعة التزامنية.

نفرض أنه في نهاية فترة العطل $t = t_c$ يكون $\delta = \delta_c$ و $\omega = \omega_c$ فنجد:

$$\begin{aligned} V(\delta_c,\omega_c) &= \frac{1}{2}M\omega_c^2 - P_m(\delta_c-\delta_s) - P_e^{max}(\omega\delta_c - \omega\delta_s) \\ &= V_{KE}^c + V_{PE}^c = E \end{aligned} \qquad (7)$$

الطاقة الكامنة المعدومة عند $\delta = \delta_s$ تصل إلى قمتين عند نقطتي التوازن غير المستقر $\delta = \delta_u$ و $\delta = \overline{\delta}_u$. ونميز هنا حالتين:

- لأجل $E < V_{PE}(\delta_u)$ يتسارع النظام حالما يتم تحرير العطل من النقطة a (أي من $\delta = \delta_c$) حتى النقطة b (حيث $V_{PE} = E$)، وبعدها يبدأ بالتباطؤ. (النظام مستقر).
- لأجل $E > V_{PE}(\delta_u)$ يتسارع النظام إلى ما بعد δ_u مما يشير إلى عدم استقرار النظام.

تحسب $V_{PE}(\delta_u)$ من المعادلة (5):

$$V_{PE}(\delta_u) = -P_m(\pi - 2\delta_s) + 2P_e^{max}\cos\delta_s$$

وتجدر الإشارة إلى أن النظام يكون غير مستقر أيضاً عندما تتناقص δ بسبب التباطؤ لأجل $t > 0$ في الوقت الذي يكون فيه $E > V(\bar{\delta}_u)$.

وكنتيجة نقول: إذا تأرجح دوار المنوبة ضمن المجال δ_u إلى $\bar{\delta}_u$ فالنظام يحافظ على استقراره. وإذا امتد التأرجح إلى خارج هذا المجال، يصبح النظام غير مستقر. لذا تشكل النقطتان δ_u و $\bar{\delta}_u$ حداً (boundary) أو سقفاً لمسارات زاوية الدوار المستقرة. هذا الحد نسميه سقف الطاقة الكامنة وتمثل النقطتان على منحني الطاقة الكامنة قمماً نسبية Relative peaks .

يصوغ بعض الباحثين معيار الاستقرار العابر السابق ذكره بشكل آخر:

إذا اعتبرنا الطاقة الكامنة V_{PE} صفراً عند δ_c، فإن V_{KE}^{c} تمثل الطاقة الحركية الزائدة المحقونة في النظام. ويتعلق استقرار النظام بمقدرة النظام بعد العطل على امتصاص الطاقة الحركية الزائدة، أي يكون النظام مستقراً إذا تحقق الشرط:

$$V_{PE}(\delta_u) - V_{PE}(\delta_c) > V_{KE}^{c}$$

يمكن استخدام مفهوم تابع الطاقة لفحص استقرار نقاط التوازن $(\bar{\delta}_u, \delta_u, \delta_s)$ لأجل اضطرابات صغيرة. من المعادلات (2) و (1) نجد:

$$M\frac{d^2\delta}{dt^2} = -\frac{\partial V_{PE}(\delta)}{\partial\delta} \qquad (8)$$

ننشر الطرف الأيمن للمعادلة (8) وفق سلسلة تايلور حول نقطة توازن ما δ^*، أي لأجل $\delta = \delta^* + \Delta\delta$، ونبقي فقط على الحد الخطي:

$$M\frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} = -\frac{\partial V_{PE}(\delta)}{\partial\delta}\Big|_{\delta^*}\Delta\delta \qquad (9)$$

أو:

$$M\frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} + \frac{\partial^2 V_{PE}(\delta)}{\partial\delta}\Big|_{\delta^*}\Delta\delta = 0 \qquad (10)$$

ونميز حالتين:

- لأجل $\frac{\partial^2 V_{PE}(\delta)}{\partial\delta^2}\Big|_{\delta^*} <= 0$ يكون التوازن غير مستقر.
- لأجل $\frac{\partial^2 V_{PE}(\delta)}{\partial\delta^2}\Big|_{\delta^*} >= 0$ تحصل اهتزازات حول δ^* وتكون هذه الاهتزازات متخامدة بسبب التخامد في النظام، ومن ثمَّ فالتوازن مستقر.

وباستخدام هذا المعيار يمكن التحقق من أن δ_s هي نقطة توازن مستقر، و δ_u و $\bar{\delta}_u$ نقطتا توازن غير مستقر.

2-3 المقارنة بين طريقة المساحات المتساوية وطريقة تابع الطاقة:

إشارة إلى الشكل (3) سنبرهن أن المساحة A_1 تمثل الطاقة الحركية المحقونة في النظام في أثناء العطل والمشار إليها بالرمز $V_{KE}(\delta_c)$. أما A_2 فتمثل مقدرة النظام بعد العطل على امتصاص هذه الطاقة، أي أن A_2 تمثل:

$$V_{PE}(\delta_u)-V_{PE}(\delta_c)$$

معيار الاستقرار في طريقة المساحات المتساوية هو:

النظام مستقر لأجل $A_1 < A_2$.

معادلات التأرجح للنظام هي:

- في أثناء العطل:

$$M\frac{d^2\delta}{dt^2}=P_m-P_e{}^F\sin\delta \qquad (11)$$

- بعد العطل:

$$M\frac{d^2\delta}{dt^2}=P_m-P_e{}^{max}\sin\delta \qquad (12)$$

وعليه:

$$A_1=\int_{\delta_o}^{\delta_c}\left(P_m-P_e{}^F\sin\delta\right)\,d\delta$$

$$=\int_{\delta_o}^{\delta_c}M\frac{d\omega}{dt}d\delta=\int_{\delta_o}^{\delta_c}M\frac{d\omega}{dt}\omega\,dt$$

$$=\int_o^{\omega_c}M\omega\,d\omega=\frac{1}{2}M(\omega_c)^2 \qquad (13)$$

إذاً A_1 هي الطاقة الحركية المحقونة في النظام من جراء العطل.

$$A_2=\int_{\delta_c}^{\delta_u}\left(P_e{}^{max}\sin\delta-P_m\right)d\delta$$

$$=-P_e{}^{max}\left(\cos\delta_u-\cos\delta_c\right)-P_m\left(\delta_u-\delta_c\right)$$

$$=V_{PE}(\delta_u)-V_{PE}(\delta_c)$$

نضيف A_3 إلى طرفي المعيار $A_1 < A_2$:

$$A_1+A_3 < A_2 + A_3 \qquad (14)$$

$$A_3 = \int_{\delta_s}^{\delta_c} \left(P_e^{max} \sin\delta - P_m\right) d\delta$$

$$= -P_m\left(\delta_c - \delta_s\right) - P_e^{max}\left(\cos\delta_c - \cos\delta_s\right) P_m \qquad (15)$$

بتغيير δ_c ، ω_c إلى δ ، ω لا على التعيين، وبإضافة A_1 إلى A_3 نجد:

$$A_1 + A_3 = \frac{1}{2} M\omega^2 - P_m\left(\delta - \delta_s\right) - P_e^{max}\left(\cos\delta - \cos\delta_s\right) \qquad (16)$$

وهذه المعادلة تماثل المعادلة (6) تماماً.

$$A_2 + A_3 = \int_{\delta_s}^{\pi-\delta_s} \left(P_e^{max} \sin\delta - P_m\right) d\delta$$

$$= 2\,P_e^{max}\cos\delta_s - P_m\left(\pi - 2\,\delta_s\right) \qquad (17)$$

من المعادلة (6) نجد:

$$V(\delta = \delta_u, \omega = 0) = -P_m(\pi - 2\delta_s) + 2P_e^{max}\cos\delta_s$$

$$= A_2 + A_3$$

$$= V_{PE}\left(\delta_u\right)$$

$$= V_{cr} = \text{الطاقة الحرجة} \qquad (18)$$

وعليه فالمعيار $A_1 < A_2$ المكافئ للمعيار (14)، هو مكافئ للمعيار حسب طريقة توابع الطاقة:

$$V\left(\delta, \omega\right) < V_{cr} \qquad (19)$$

حيث الطاقة الحرجة V_{cr} تساوي الطاقة الكامنة عند $\delta = \delta_u$.

وتجدر الملاحظة أن δ و ω تحسبان من معادلة التأرجح في أثناء العطل.

4- الخوارزمية The algorithm

انطلاقاً من النموذج الرياضي لتحليل الاستقرار العابر لنظام قدرة كهربائية باستخدام طريقة تابع الطاقة العابرة، تم بناء خوارزمية مناسبة لتنفيذها على الحاسوب. ويبين الشكل 4 هذه الخوارزمية كمخطط انسيابي.

إن الهدف النهائي لتحليل الاستقرار العابر هو حساب اللحظة الزمنية t_{cc} الحرجة لتحرير العطل (زمن

الفصل الحرج). وللوصول لهذا الهدف نتبع الخطوات الأساسية الآتية:

أ- حساب تابع الطاقة العابرة $V(\delta, \omega)$ من المعادلة (6).

ب- حساب الطاقة الحرجة V_{cr} لأجل $\delta = \delta_u$ و $\omega = 0$. وهذه الطاقة تعتمد على العطل المفترض.

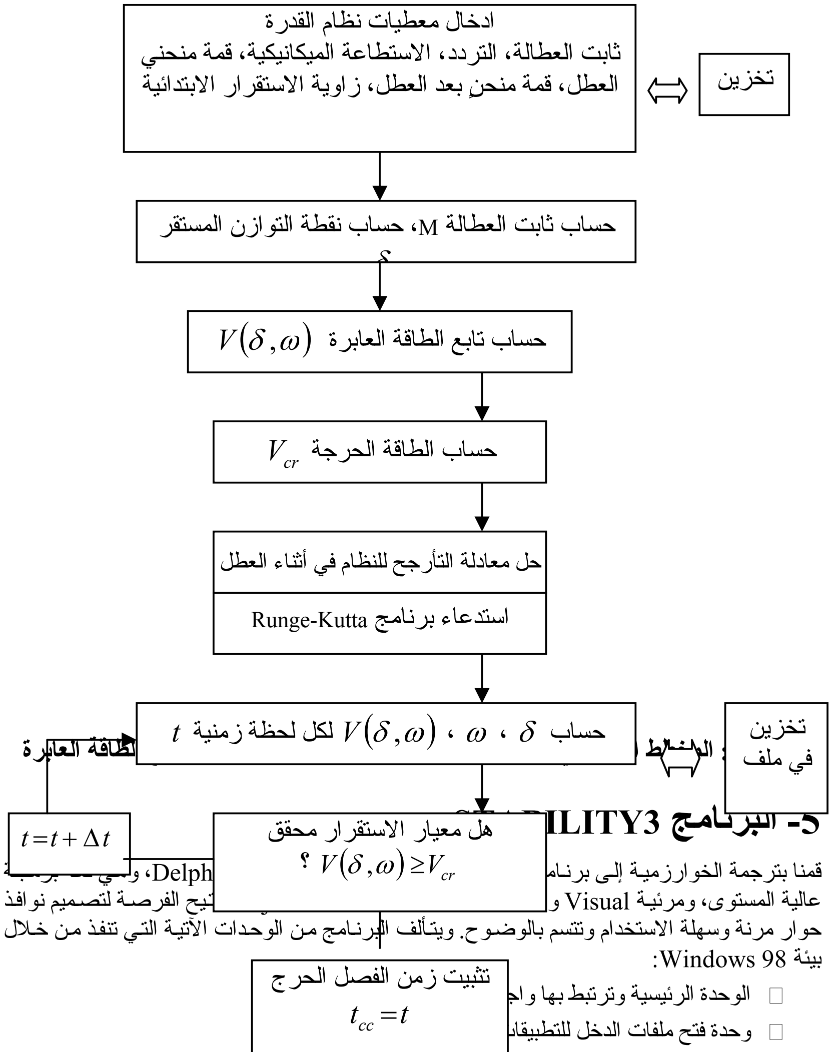
ج- حل معادلة التأرجح في أثناء العطل، وهي:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e^F \sin\delta$$

ونستخدام لحل هذه المعادلة التفاضلية طريقة Runge-Kutta التي أثبتنا جدواها خلال بحثنا السابق /1/.
يستمر تنفيذ الحل العددي للمعادلة التفاضلية حتى يتحقق شرط الاستقرار العابر الذي توصلنا إليه سابقاً:

$$V(\delta, \omega) < V_{cr}$$

وتكون اللحظة التي يتحقق عندها هذا الشرط هي لحظة الفصل الحرج t_{cc}.



[illegible] الطاقة العابرة

5- البرنامج STABILITY3

قمنا بترجمة الخوارزمية إلى برنامج [illegible] Delphi، والتي [illegible] برمجة عالية المستوى، ومرئية Visual و[illegible] تتيح الفرصة لتصميم نوافذ حوار مرنة وسهلة الاستخدام وتتسم بالوضوح. ويتألف البرنامج من الوحدات الآتية التي تنفذ من خلال بيئة Windows 98:

- الوحدة الرئيسية وترتبط بها وا[illegible]
- وحدة فتح ملفات الدخل للتطبيقا[illegible]
- وحدة تخزين ملفات الدخل (Save).
- وحدة حساب تابع الطاقة والطاقة الحرجة.
- وحدة خوارزمية Runge-Kutta لحل معادلة التأرجح في أثناء العطل.

- وحدة طباعة النتائج.

6- تطبيقات عملية:

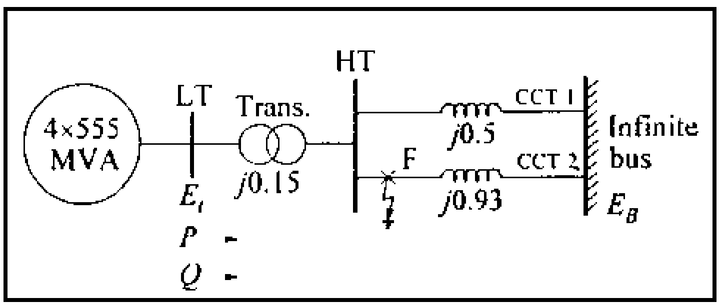
1-6 التثبت من صحة البرنامج بتطبيقه على شبكة كهربائية اختبارية /3/:

محطة توليد حرارية مؤلفة من أربع وحدات (لكل وحدة 555MVA, 24KV,60HZ) تغذي الطاقة إلى باس لا نهائي عبر خطي نقل على التفرع كما هو مبين في الشكل 5 .

- كميات الأساس: 2220MVA ، 24KV.
- المولد المكافئ للمحطة: استطاعة 2220MVA، $X'_d = 0.3$ ، $H = 3.5\sec$.
- ظروف التشغيل الابتدائية:

$$P = 0.9 : Q = 0.436 : E = 1\angle 28.34° \ : \ V = 0.90081\angle 0°$$

يحصل عطل متوازن مباشر في النقطة F (باس الإرسال)، ويتم تحرير العطل بعزل الخط المعطل كلياً. ادرس الاستقرار العابر للنظام بطريقة تابع الطاقة العابرة ثم بالطريقة التقليدية وقارن نتائج الطريقتين.



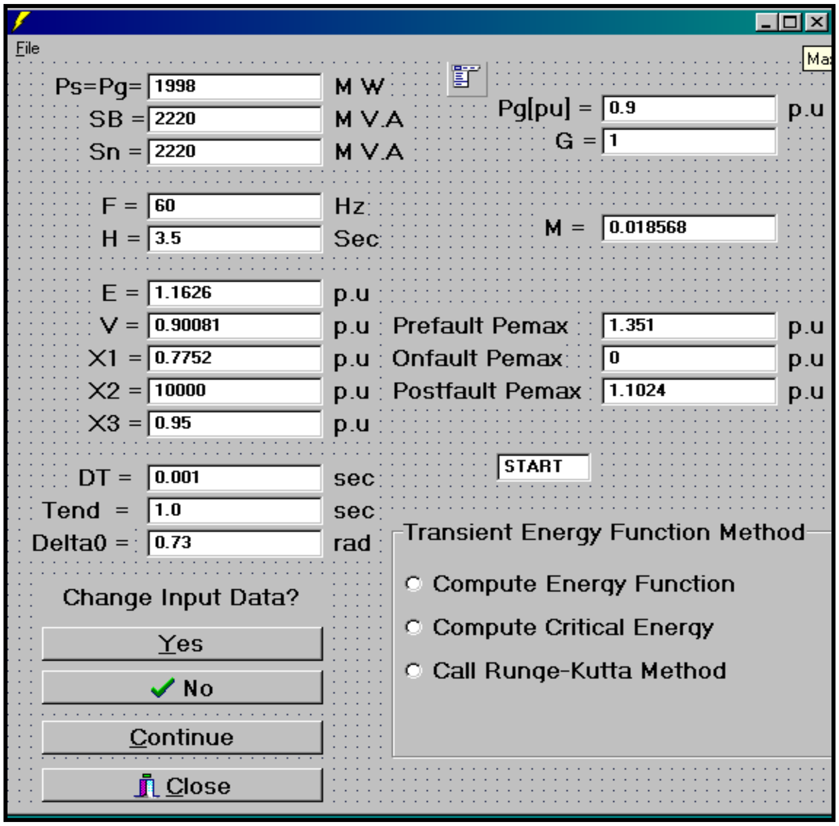
الشكل 5 : الشبكة الاختبارية

الحل باستخدام البرنامج المنجز STABILITY3 (الطريقة الجديدة):

ندخل معطيات النظام وفق نافذة الحوار المبينة بالشكل 6 . X_1 و X_2 و X_3 هي مفاعلات النقل قبل العطل وفي أثنائه وبعده. ويتيح البرنامج إمكانيتين : إدخال قيم المفاعلات (عندها تحسب قمم منحني الاستطاعة- زاوية للحالات الثلاث) أو إدخال قيم القمم (عندها تحسب المفاعلات). يتم الحساب آلياً وفق المعادلة المعروفة $E.V/X = P^{max} =$ القمة.

نتائج الحساب مبينة في الشكل 7، ومنه نرى أن لحظة الفصل الحرج للعطل يجب أن لا تتعدى 86.8ms، وهي اللحظة التي يكون فيها تابع الطاقة أصغرَ قليلاً من الطاقة الحرجة (0.1651). ونلاحظ أن هامش

الاستقرار - و هو الفرق بين الطاقة الحرجة و تابع الطاقة للحظة الزمنية المعتبرة – صغير ويساوي: 0.1651 – 0.1649 = 0.0002



الشكل 6: نافذة الحوار الرئيسية للتطبيق 5 -1

Program STABILITY3

Transient Stability Analysis by Transient Energy Function (TEF) Method

Designed by Prof. Dr.-Ing. Ali Hamzeh, Dipl.Eng. Ammar SaatiH.

أ. د. علي حمزة م. محمد عمار ساعاتي

Damascus University, Department of Electrical Engineering

Example 1 **Date:01.04.2001**

Input Data

Integration Step = .0001 sec Maximum Integration Period = .1 sec

F	Pm	Pemax-Onfault	Pemax-Postfault	H-inertia	δ_0
60	.9 pu	0 pu	1.1024 pu	3.5 sec	0.73 rad

Results

δ_s = .9551504 rad

V_{cr} = .1650779

t [sec]	δ [Rad]	ω [Rad/sec]	V(δ, ω) [pu]
0.0000	0.7300	0.0000	....
0.0001	0.7300	0.0048	0.0178
0.0002	0.7300	0.0097	0.0178
0.0003	0.7300	0.0145	0.0178
0.0004	0.7300	0.0194	0.0178
0.0005	0.7300	0.0242	0.0178
0.0006	0.7300	0.0291	0.0178
0.0007	0.7300	0.0339	0.0178
0.0008	0.7300	0.0388	0.0178
0.0009	0.7300	0.0436	0.0178
0.0010	0.7300	0.0485	0.0178
0.0011	0.7300	0.0533	0.0178
			....
			....
0.0863	0.9105	4.1830	0.1631
0.0864	0.9109	4.1878	0.1635
0.0865	0.9113	4.1927	0.1638
0.0866	0.9118	4.1975	0.1642
0.0867	0.9122	4.2024	0.1646
0.0868	0.9126	4.2072	0.1649
0.0869	0.9130	4.2121	0.1653

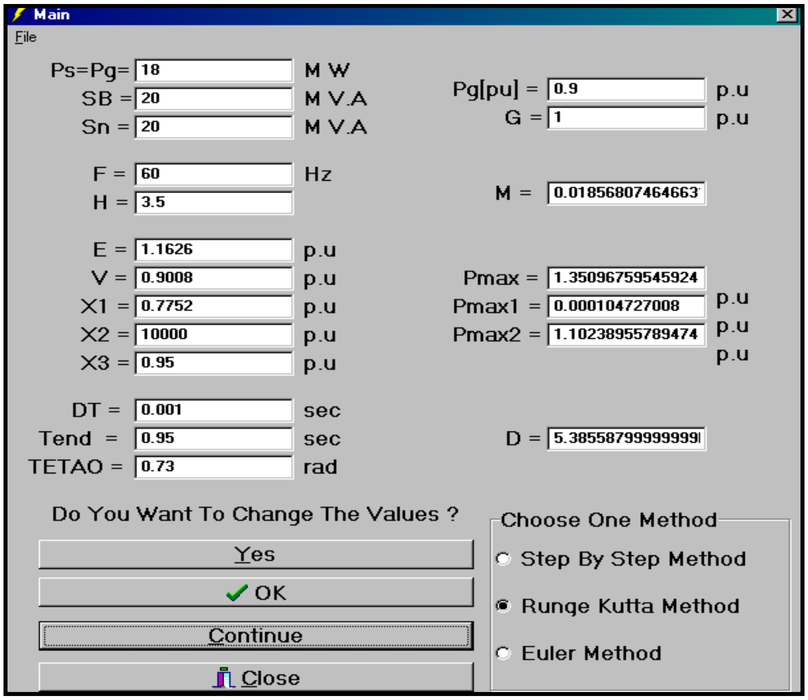
t_{cc} = 0.0868 sec

الشكل 7 : خرج البرنامج STABILITY3 للشبكة الاختبارية

الحل باستخدام الطريقة التقليدية

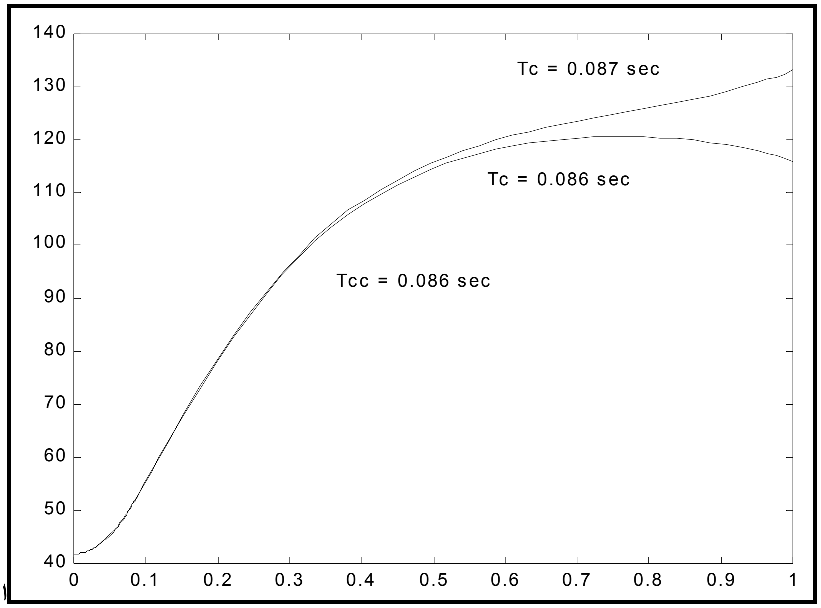
بغرض المقارنة بين الطريقتين الجديدة والتقليدية نقدم هنا الحل بالطريقة التقليدية و بواسطة برنامجنا المنجز في بحث سابق /1/ و بمقاطعة النتائج بواسطة Matlab /5/. خوارزمية الحل هنا تقتضي حل معادلات التأرجح الثلاث للنظام ورسم منحني التأرجح لأجل أزمان فصل مختلفة ومراقبة أول منحنٍ يبدي تزايداً مستمرا لزاوية الاستقرار مع الزمن. نكرر الحساب ونرسم منحنيات التأرجح ونرصد زمن الفصل الحرج بطريقة التجربة والخطأ.

ندخل معطيات الدخل في النافذة الرئيسية ونختار طريقة Runge-Kutta و نباشر الحساب (الشكل 8).



الشكل 8: نافذة الحوار الرئيسية للحل التقليدي

منحنيات التأرجح المحسوبة بالحاسوب والعائدة لثلاثة أزمان فصل في الفترة الحرجة مبينة في الشكل 9.



لشكل 9 : منحنيات التأرجح للشبكة الاختبارية حسب الطريقة التقليدية

المقارنة:

على الرغم من أن النتيجتين متماثلتان، إلا أن الوصول إلى النتيجة بالطريقة الجديدة أسهل وأسرع من الطريقة التقليدية. إذ إنَّ عملية التجربة والخطأ تحتاج لزمن أطول، بالإضافة إلى إمكانية الوقوع في الخطأ. أما الطريقة الجديدة فتعطي نتيجة دقيقة وبشكل آلي من قبل البرنامج مباشرة. لذلك نسمي الطريقة الجديدة طريقة مباشرة Direct method ونقدر زمن التحضير والحساب للطريقة الجديدة بقرابة 60% من الزمن للطريقة التقليدية.

6 – 2 تطبيق من الشبكة السورية:

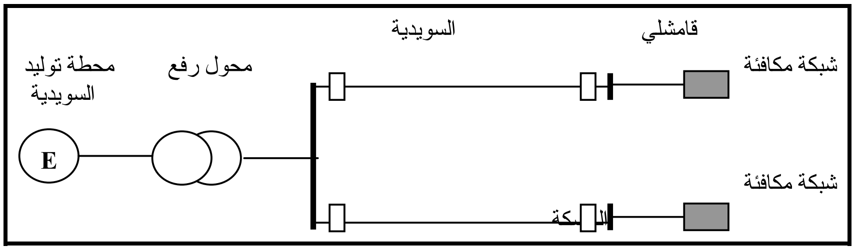
المطلوب دراسة الاستقرار العابر لمولدات محطة السويدية (الشكل 10) في حالة حصول عطل متناظر على خط السويدية – قامشلي أو خط السويدية – الحسكة . تحوي المحطة 5 مولدات عنفية (عنفات غازية) و 5 محولات رافعة للتوتر .

مواصفات كل مولد : $S_n = 37.5$ MVA, $V_n = 10.5$ kV, $X'_d = 0.246$ pu, $H = 3.7$ sec

مواصفات كل محولة : $S_n = 42$ MVA, 10.5/230 kV, $X_t = 6.84\%$

خط السويدية – قامشلي: $l = 89.9$ km, $X = 0.413$ Ohm/km ، خط السويدية – الحسكة: $l = 136$

km, X = 0.413 Ohm/km



الشكل 10: مخطط الخط الواحد للشبكة الكهربائية في منطقة السويدية ـ قامشلي ـ الحسكة

نختار استطاعة أساس 100 MVA وتوتر أساس 230 kV في منطقة خطوط النقل . و نظرا لأن المولدات الخمس تتأرجح معا فنكافئها بمولد مكافئ مواصفاته منسوبة للأساس الجديد:

. $X'_d = 0.1312$ pu, $H = 7.77$ sec, $E' = 1.1$, $\delta_1 = 15.47$ deg

المحول المكافئ : $X_t = 0.163$ pu ، خط القامشلي : $X = 0.07$ pu ،

خط الحسكة : $X = 0.106$ pu

نستعيض عن بقية الشبكة الخارجية المرئية من باس القامشلي بشبكة لانهائية توترها V =1 بزاوية صفر خلف مفاعلة تحسب قيمتها بدلالة استطاعة القصر لباس القامشلي $S''_{k,Qam}$ من العلاقة :

$$X_{n,Qam} = 1.1x\ 230^2/S''_{k,Qam} = 0.09\ pu$$

كما نستعيض عن بقية الشبكة الخارجية المرئية من باس الحسكة بشبكة لانهائية توترها V =1 بزاوية صفر خلف مفاعلة

تحسب قيمتها بدلالة استطاعة القصر لباس الحسكة $S''_{k,Has}$ من العلاقة :

$$X_{n,Qam} = 1.1x\ 230^2/S''_{k,Has} = 0.07\ pu$$

استطاعات القصر لباسات الشبكة السورية كافة حسبت من قبل المؤلفين بواسطة برنامج حسابات الأعطال المصمم من قبلهم، وكانت القيم للباسات موضع الاهتمام :

$$S''_{k,Qam} = 1241\ MVA,\ S''_{k,Has} = 1669.944\ MVA.$$

نفرض حصول العطل المتناظر في منتصف خط القامشلي و نحسب مفاعلات النقل قبل العطل وفي أثنائه وبعده:

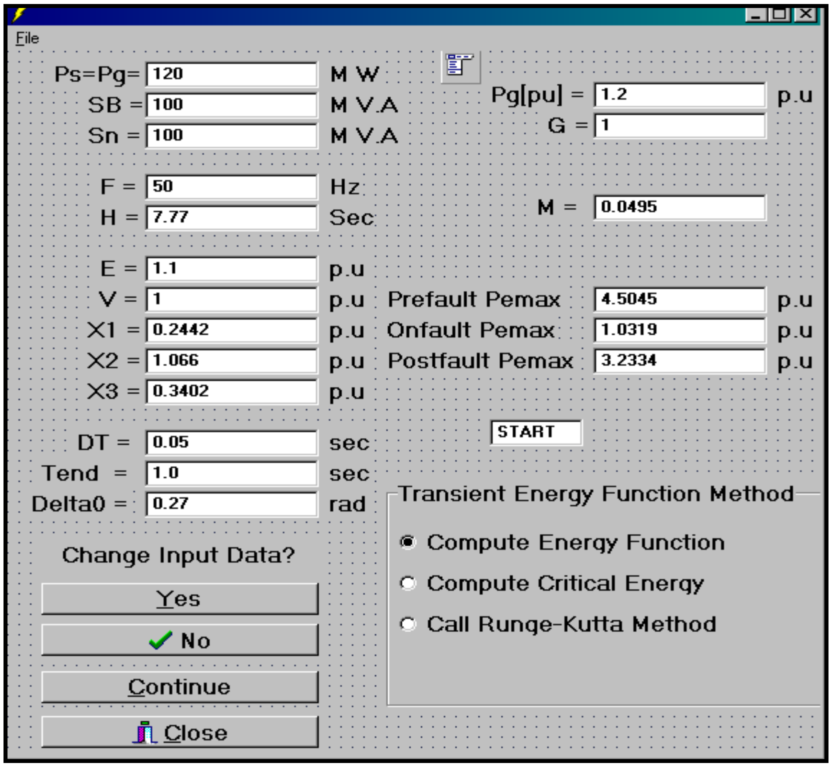
$$X_1 = 0.2442\ pu,\ X_2 = 1.066\ pu,\ X_3 = 0.3402\ pu.$$

ونفرض أن المحطة تقدم استطاعة فعلية مقدارها 120 MW .

الحل باستخدام البرنامج STABILITY3 الطريقة الجديدة:

ندخل معطيات الشبكة السورية، ونبدأ الحساب من خلال شاشة الحوار المبينة في الشكل 12.

استخدمنا في الحساب خطوة تكامل أولية كبيرة نسبياً (0.05) لتقليل زمن الحساب فحصلنا على زمن فصل حرج أولي (0.500) ثم أكملنا الحساب بخطوة أصغر (0.01)، و تبين من نتائج الحاسوب المبينة في (الشكل 13) أن زمن الفصل الحرج هو 520 ms . وهذه النتيجة تشير إلى وجود هامش استقرار كبير لمولدات السويدية ، إذ إنَّ العطل يمكن أن يدوم أكثر من 520 ميللي ثانية ، وهذا الزمن بالطبع أكبر بثلاث مرات على الأقل من الزمن الأصغري لاستجابة حمايات الخطوط في الشبكة السورية (زمن استجابة نظام حماية الخط في الشبكة السورية بمافيها استجابة المرحلات المسافية و استجابة تماسات القواطع الآلية قرابة 150 ميللي ثانية).



الشكل 12: شاشة الحوار الرئيسية لأجل الشبكة السورية (السويدية)

Program STABILITY3
Transient Stability Analysis by Transient Energy Function (TEF) Method
Designed by Prof. Dr.-Ing. Ali Hamzeh, Dipl.Eng. Ammar Saati
أ. د. علي حمزة م. محمد عمار ساعاتي
Damascus University, Department of Electrical Engineering

A part of Syrian Network Date:03.04.2001

Input Data

Integration Step = .05 sec, Maximum Integration Period = 1.0 sec

F	**Pm**	**Pemax-Onfault**	**Pemax-Postfault**	**H-inertia**	**δ_0**
50 Hz	1.2 pu	1.0319 pu	3.2334 pu	7.77 sec	0.27 rad

Results

δ_s = .3802218 rad
V_{cr} = 3.147575 pu

t [Sec]	δ [Rad]	**ω** [Rad/sec]	**V(δ, ω)** [pu]
0.0000	0.2700	0.0000	....
0.0500	0.2933	0.9273	0.0325
0.1000	0.3620	1.8087	0.0810
0.1500	0.4727	2.6026	0.1796
0.2000	0.6202	3.2768	0.3479
0.2500	0.7980	3.8134	0.6022
0.3000	0.9992	4.2128	0.9480
0.3500	1.2174	4.4948	1.3768
0.4000	1.4474	4.6967	1.8681
0.4500	1.6865	4.8692	2.3937
0.5000	1.9348	5.0715	2.9237
0.5500	2.1953	5.3683	3.4274

t_{cc} = **0.500** sec

The calculation is continued with an integration step = .01 sec

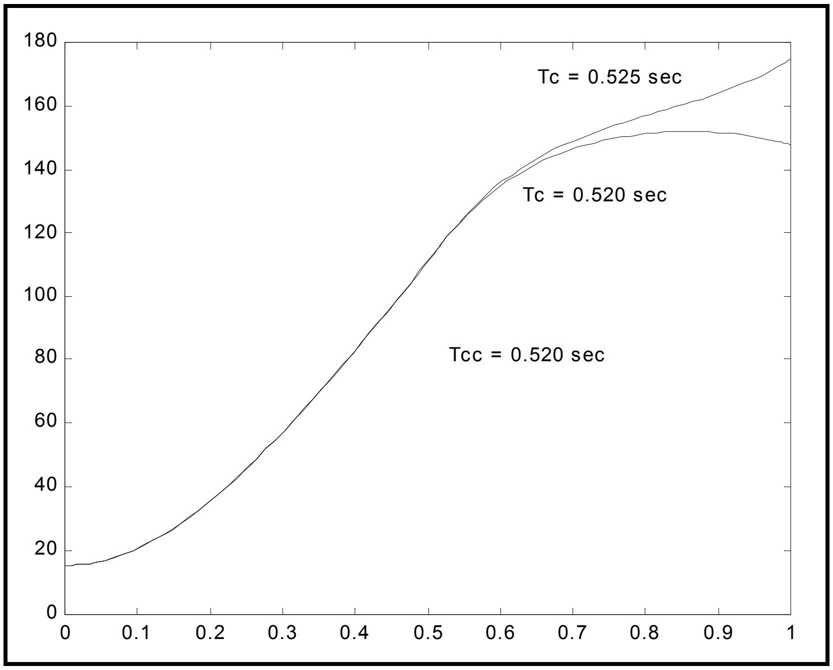
0.5000	1.9348	5.0715	2.9241
0.5100	1.9858	5.1212	3.0278
0.5200	2.0373	5.1751	3.1303
0.5300	2.0893	5.2339	3.2313

Exact result: t_{cc} = **0.520** sec

الشكل 13: خرج البرنامج STABILITY3 لأجل الشبكة السورية

الحل بالطريقة التقليدية

باستخدام STABILITY 1 وبالاستعانة ببرنامج ماتلاب /5/ ندخل معطيات الشبكة السورية ونختار طريقة Runge- Kutta ونجري الحساب لأزمان فصل متعددة، وندع الحاسوب يثبت آخر منحن مستقر وأول منحن غير مستقر (طريقة التجربة والخطأ) . نستنتج أن زمن الفصل الحرج هو أيضا 520 ميللي ثانية (الشكل 14) كما في الطريقة الجديدة.



الشكل 14: منحنيات التأرجح لمولدات السويدية حسب الطريقة التقليدية

7 – استنتاجات

- يستخدم البحث طريقة غير تقليدية هي طريقة تابع الطاقة العابرة في تحليل الاستقرار العابر لنظام قدرة كهربائية ممثل بمولد وحيد يغذي شبكة خارجية تمثل بتوتر ثابت خلف مفاعلة تحسب بدلالة استطاعة القصر للباس الذي عنده اختصرت الشبكة الخارجية.
- يبين البحث أن طريقة تابع الطاقة العابرة أكثر دقة وتحتاج إلى زمن تحضير وحساب أقل من الطريقة التقليدية بنسبة 40% تقريباً.

- البرنامج المنجز مكتوب بلغة Delphi المتطورة وهي لغة عالية المستوى ومرئية وغرضية التوجه.
- يستخدم البرنامج طريقة Runge-Kutta لمكاملة معادلة التأرجح للنظام في أثناء العطل.
- خطوة الحساب قابلة للتغيير بسهولة من خلال نافذة البرنامج الرئيسية مما يسمح بإنجاز حساب أولي بخطوة كبيرة (لتقليص زمن الحساب) يعطي فكرة أولية عن t_{cc} . يتلو ذلك حساب بخطوة أصغر بهدف رصد قيمة أدق لـ t_{cc}.
- خرج البرنامج هو جدول يعطي قيم δ و $V(\delta,\omega)$ كتابع للزمن لكل خطوة تكامل، ويظهر مباشرةً قيمة t_{cc} المطلوبة.
- هذه الورقة هي حسب علمنا أول نص باللغة العربية في موضوع البحث، ومن ثَمَّ فالبرنامج هو الأول من نوعه في القطر.
- البرنامج قيد التطوير حالياً ليكون قادراً على دراسة الاستقرار العابر بطريقة تابع الطاقة العابرة لنظام قدرة متعدد الآلات التزامنية.

المراجع

1- حمزة، علي وساعاتي، محمد عمار: برنامج STABILITY1 بلغة Delphi لحساب الزمن الحرج لفصل الأعطال في نظم القدرة الكهربائية
مجلة بحوث جامعة حلب – العدد 27 لعام 2000.

2- حمزة، علي وساعاتي، محمد عمار: برنامج STABILITY2 بلغة Delphi لتحليل الاستقرار العابر لنظام قدرة كهربائية متعدد الآلات
مجلة بحوث جامعة حلب – العدد 29 لعام 2001.

3- P.Kundur : Power System Stability and Control
McGraw-Hill 1994.

4- P.W. Sauer, M.H Pai : Power System Dynamics and Stability
Prentice Hall 1998.

/5/ H. Saadari: Power System Analysis
Senior Consulting Editor 1999

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق: 2001/4/28.

Computer Program STABILITY3 in Delphi for Transient Stability Analysis of Power Systems Using Transient Energy Function Method

Ali Hamzeh **M. Ammar Saati**

Department of Electrical Engineering

FMEE

Damascus University

Abstract

Transient stability studies are vital for operational planning of power systems. In transient stability, we are interested in computing the critical clearing time t_{cc} of a fault occurring on the power systems. The graphical analysis methods have failed to compute t_{cc}. Therefore the numerical analysis is used to solve the swing equations of generators. However, one disadvantage is that, depending on the size, complex and modeling refinement of the system, it may require huge computational effort.

This paper introduces an unconventional analytical method, namely Transient Energy Function (TEF) method, and proves the capacity of the method. The significant advantage of the used approach is that, integration of the swing equations is in principle limited only to the fault-on period.

The paper presents the mathematical model, the algorithm and the design and implementation of the developed Computer Program STABILITY3 in Delphi. The program has been tested successfully through many typical network, and used to study the transient stability of a part of the Syrian high voltage grid.

As for as our knowledge is concerned, the paper is considered as the first text in Arabic in this research area, and the developed program is also of the same order.