

## تحليل الاستقرار الساكن في حسابات نظم القدرة الكهربائية

الدكتور حسان السويدان  
قسم هندسة الطاقة الكهربائية  
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية  
جامعة دمشق

### الملخص

يرتبط الاستقرار الساكن بالسلوك الديناميكي لنظام القدرة الكهربائية بعد تعرضه لاضطرابات خفيفة مثل تغيرات في الأحمال أو التوليد أو فصل بعض التجهيزات.. الخ.  
تم في هذا البحث تحليل معادلات الحالة الحدية للشبكة الكهربائية والاستقرار الساكن، واستناداً إلى ذلك قدمنا أسلوباً لتقييم هذا الاستقرار يعتمد على تغير إشارة مصفوفة اليعقوبي خلال عمليات التكرار لحساب جريان الحمل.  
وقد بينت النتائج التجريبية على نظام قدرة متكامل فعالية هذا الأسلوب، كما بينت تجارب أخرى أنه عند زيادة تحميل النظام الكهربائي فإنه في بعض الحالات يتم الوصول إلى الحالة الحدية للشبكة الكهربائية قبل الوصول إلى حد الاستقرار الساكن.

## ١- مقدمة:

تأتي أهمية تحليل الاستقرار الساكن (Steady-state Stability) من كون الاستقرار ووجود هامش احتياطي له أحد الشروط الأساسية لعمل نظام القدرة الكهربائية.

ويقصد بالاستقرار الساكن قدرة النظام على العودة إلى نقطة العمل المستقرة (Equilibrium Point (أو إلى نقطة قريبة منها) بعد تعرضه لاضطرابات صغيرة وبطيئة.

ويتم تحديد الاستقرار الساكن بواسطة طرق مختلفة منها ما يسمى بالمقاييس العملية كإيجاد مشتق الاستطاعة الفعلية للمولدات المربوطة على الشبكة بدلالة زاوية العزم  $\delta$  والذي يسمى بمعامل الاستطاعة التزامنية الساكن Steady-state Synchronizing Power Coefficient، وهذه الطريقة مشتقة من التحليل الديناميكي بفرض إهمال الاهتزازات على دوائر الآلات التزامنية، إلا أن هذا المقياس يتضمن عدداً من الافتراضات التي تؤدي في بعض الحالات وخاصة في الأنظمة الكهربائية الكبيرة إلى نتائج غير دقيقة.

بالإضافة إلى ذلك هناك ما يسمى بالطريقة المباشرة التي تعتمد على التحليل الرياضي لإيجاد جذور المعادلات التفاضلية لنظام القدرة الكهربائية (Eigenvalues Method) أو استبدال ذلك بدراسة تغير إشارة المعامل  $a_n$  في المعادلة المميزة (Characteristic Equation)، وهذه الطريقة تحتاج إلى مجهود رياضي كبير وعمليات برمجية معقدة ومكلفة اقتصادياً.

سنقوم في هذا البحث بدراسة معادلات نظام القدرة الكهربائية وتحديد الحالة الحدية للشبكة (Network Limit) الكهربائية ودراسة معادلات وطرق تحديد الاستقرار الساكن لذلك النظام واعتماداً على ذلك سنبين أن مصفوفة اليعقوبي لمعادلات الاستقرار لنظام القدرة الكهربائية تتطابق مع مصفوفة اليعقوبي لمعادلات جريان الحمولة لهذا النظام مما يتيح لنا استخدام قيم وإشارة مصفوفة اليعقوبي الأخيرة الناتجة خلال عمليات التكرار لحساب جريان الحمولة للحكم على الاستقرار الساكن للنظام المدروس بطريقة سهلة نسبياً ولا تحتاج إلى برمجيات خاصة.

## ٢- معادلات نظام القدرة الكهربائية والحالة الحدية للشبكة

### Power System Equations and Network Limit

يمكن التعبير عن نظام القدرة الكهربائية رياضياً بواسطة جملة المعادلات:

$$F(X, Y) = 0 \quad (1)$$

حيث:  $Y = [y_1 \dots y_n]^T$  شعاع الاستطاعة وطويلة التوتر في العقد.

$X = [x_1 \dots x_n]^T$  المركبات الديكارتية أو القطبية لأشعة التوتر في العقد.

وهذه المعادلات هي معادلات لاخطية ويمكن حلها فقط بطرق التكرار العددية. وبسبب العلاقة اللاخطية هذه لا يمكن دائماً الحصول على حل لتلك المعادلات، أي أن هناك قيماً حديه لكل من الاستطاعة وطويلة التوتر في العقد يؤدي تجاوزها إلى غياب حل جملة المعادلات (1). فمثلاً لنظام القدرة البسيط المكون من عقدتين

والمبين في الشكل (1) فإن الاستطاعة المنقولة على الخط لا يمكن أن تتجاوز  $P_{\max} = \frac{U_1 U_2}{x}$

والموافقة للزاوية  $\delta_{12} = \frac{\pi}{2}$ ، أي أن الحالة الحدية لهذه الشبكة توافق النقطة  $\delta_{12} = \frac{\pi}{2}$  ومن ثم فإن مشتق

الاستطاعة بالزاوية  $\frac{\partial P}{\partial \delta_{12}}$  يكون مساوياً للصفر في هذه النقطة.

من هنا يمكن اعتبار مشتق الاستطاعة بالزاوية في هذا النظام البسيط كمقياس على اقتراب وصول الشبكة إلى الحالة الحدية [1].

ولإيجاد هذا المقياس بالنسبة للنظم الأكثر تعقيداً ننطلق من شعاع المتحولات المستقلة (Independent Variables) وشعاع المتحولات التابعة (State Variables) لهذا النظام.

ينشر التابع  $F(X) = [f_1(x), \dots, f_n(x)]^T$  وفقاً لسلسلة تايلور بالنسبة للنقطة  $X_0$  وبإهمال الحدود اللاخطية فإنه من أجل أي تغير بسيط  $\Delta X$  نحصل على العلاقة التقريبية الآتية:

$$\Delta Y = \frac{\partial F}{\partial X}(X_0) \Delta X \quad (2)$$

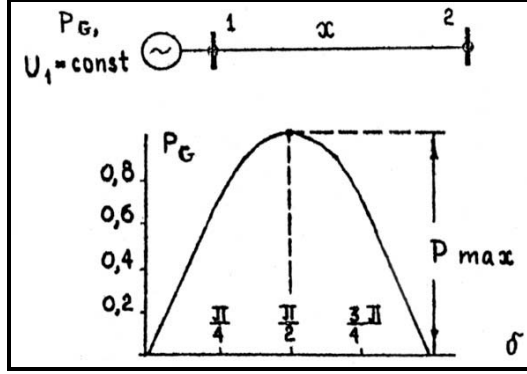
حيث:

$$\Delta Y = F(X) - F(X_0)$$

و

$$\frac{\partial F}{\partial X} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

مصفوفة اليعقوبي (Jacobian Matrix) للشعاع  $F(X)$  في النقطة  $X_0$ .



الشكل ١: نظام قدرة بسيط مكون من عقدتين

إذا كان معين مصفوفة اليعقوبي (Jacobian Matrix Determinant)  $\frac{\partial F}{\partial X}(X_0)$  لا يساوي

الصفر فإن أي تغيير في الشعاع  $\Delta Y$  يؤدي إلى تغيير في الشعاع  $\Delta X$  والذي يمكن إيجاده من العلاقة (2)، لهذا فإن النظام في النقطة  $X_0$  لن يكون حدياً ذلك لأن أي تغيير في شعاع المتحولات المستقلة مهما كان

صغيراً سيؤدي إلى قيم جديدة للمتحولات التابعة. أما إذا كان معين المصفوفة  $\frac{\partial F}{\partial X}$  مساوياً للصفر فإن

التغيير في الشعاع  $\Delta Y$  لن يؤدي إلى تغيير في الشعاع  $\Delta X$ ، وبمعنى آخر فإنه في هذه الحالة لا يمكن إيجاد حلول لمعادلات نظام القدرة الكهربائية (1)، ومن ثم فإن النظام الحدي (حد الاستطاعة المنقولة) يوافق

النقطة  $X_{Limit}$  التي يكون فيها معين اليعقوبي  $(\det \frac{\partial F}{\partial X})$  مساوياً للصفر.

### ٣- الاستقرار الساكن لنظم القدرة الكهربائية

#### Steady-state Stability of Power Systems

إن حد الاستقرار الساكن هو الاستطاعة العظمى التي يمكن نقلها على الشبكة بين المنبع والحمل عند تعرض النظام لاضطرابات صغيرة (Small Disturbances). ويتعرض النظام بصورة دائمة إلى اضطرابات صغيرة نتيجة لتغير الأحمال وللحصول على القيمة الحدية يتم زيادة الأحمال المربوطة على النظام وبمعدلات صغيرة. وبعد كل زيادة يتم تعديل دارات التهييج في المولدات للحفاظ على توترات ثابتة على أقطابها. ومن ثم حساب جريان الحمولة لنصل في النهاية إلى حالة عدم الاستقرار. وتعمل المولدات الحديثة عند قيم مختلفة لزوايا الحمولة (العزم) وبحيث لا تتجاوز القيمة  $60^\circ$  وهذا يترك  $30^\circ$  لتغطية شبكة النقل.

ومعروف أن أبسط مقياس للاستقرار الساكن هو  $K_E = \frac{\partial P}{\partial \delta} = P_{\max} \cos \delta > 0$  (شكل 2) أي أن عامل

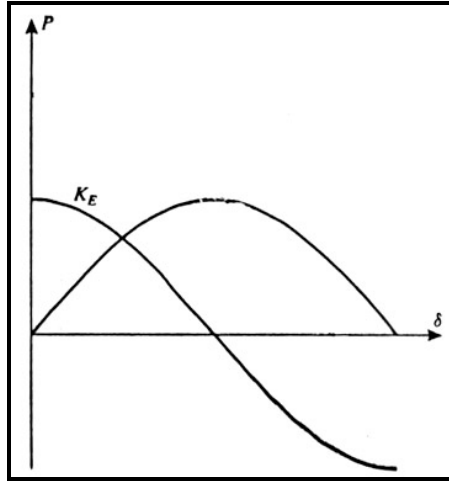
الاستطاعة التزامنيه يجب أن يكون موجباً، على أن استخدام هذا المقياس يتضمن الافتراضات التالية [2]:

- تتمثل المولدات بممانعات ثابتة على التسلسل مع توترات اللاحمل.
- عزوم الدخل ثابتة.
- إهمال تغيرات السرعة.
- إهمال الإجهاد الكهرميكانيكي.
- تغيرات الزاوية  $\delta$  صغيره.

وعند زيادة درجة تعقيد النظام مثلاً إدخال عزم العطالة للآلات التزامنية، تأثير منظم السرعة، تأثير

التنظيم الآلي للتوتر فإن المقياس  $\frac{\partial P}{\partial \delta} = 0$  يعطي نتائج غير دقيقة عن حالة النظام من ناحية الاستقرار

الساكن. لذلك نلجأ في مثل تلك النظم إلى طرق التحليل الرياضي لتقييم هذا الاستقرار لنظم القدرة الكهربية.



الشكل ٢: عامل الاستطاعة التزامنية  $K_E$

يتكون نظام القدرة الكهربية من مجموعة من العناصر الكهرميكانيكية، والتي يمكن تمثيل حركتها.. بمعادلات تفاضلية من الشكل:

$$\frac{dx_i}{dt} = G_i(x_1, \dots, x_n), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

وباعتبار:

$$\Delta x_i = x_i - x_{i0}$$

حيث:

$x_{i0}$ : بارامترات النظام الكهربائي في الحالة المستقرة وهي حلول المعادلات:

$$G_i(x_1, \dots, x_n) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

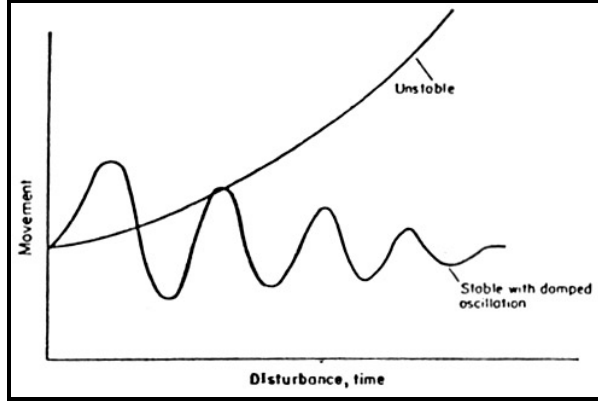
ومن ثم:

$$\frac{d\Delta x_i}{dt} = g_i(\Delta x_1, \dots, \Delta x_n) \quad (5)$$

تسمى المعادلة السابقة بمعادلة اضطراب الحركة وبديهي من أجل نظام القدرة غير المتعرض للاضطراب فإن:

$$\Delta x_1 = \Delta x_2 = \dots = \Delta x_n = 0 \quad (6)$$

وفي حين يتعرض النظام لاضطرابات كبيره (فصل أحد الخطوط، أو المولدات، خروج أو دخول أحمال... الخ) على فترات متباعدة، فإنه يتعرض للاضطرابات الصغيرة بصورة مستمرة، وتختلف استجابة النظام تبعاً لدرجة الاضطراب ومكان توضع، ويبين الشكل (3) الأشكال الممكنة لاستجابة النظام بعد تعرضه لاضطراب ما [3].



الشكل ٣: أشكال الاستجابة لنظام القدرة بعد تعرضه لاضطراب ما

تعتمد دراسة الاستقرار الساكن رياضياً على طرق التقريب حيث يتم نشر التوابع اللاخطية إلى سلسلة من الحدود الخطية والاكتفاء بدراسة الحد الأول.

بتطبيق ذلك على المعادلة (5) ونشرها وفقاً لسلسلة تايلور نحصل على:

$$\frac{d\Delta x_i}{dt} = \sum_{K=1}^n a_{ik} \Delta x_k + L_i (\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n) \quad (7)$$

حيث:

$L_i (\Delta x_1, \dots, \Delta x_n)$  - مجموع الحدود التي مرتبتها أعلى من المرتبة الأولى.

$a_{ik}$  - العوامل الثابتة للحدود الخطية.

وبإهمال الحدود العليا والاكتفاء بالحد من المرتبة الأولى من المعادلة السابقة نحصل على:

$$\frac{d\Delta x_i}{dt} = \sum_{K=1}^n a_{ik} \Delta x_k \quad (8)$$

أو بشكل معادلة مصفوفات:

$$\frac{d\Delta X}{dt} = A \Delta X \quad (9)$$

وتوافق المعادلة (9) المعادلة المميزة:

$$\det (A - PE) = 0 \quad (10)$$

حيث:

$E$ : المصفوفة الواحدية.

$A$ : مصفوفة البعقوبي المحسوبة في نقطة التوازن:

$$\mu A = \frac{\partial G}{\partial X} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial g_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

وتبعاً لجذور المعادلة المميزة يقسم انهيار الاستقرار لنظم القدرة الكهربائية إلى نوعين [4]:

١- انهيار الاستقرار اللادوري (Aperiodic) الموافق لظهور جذور حقيقية موجبة (Positive roots) للمعادلة المميزة.

٢- انهيار الاستقرار الاهتزازي (Oscillatory) الموافق لظهور جذور عقديه (Complex roots) ذات أجزاء حقيقية موجبة.

إن انهيار الاستقرار الساكن لنظام القدرة الكهربائية يمكن أن يحدث في بارامترات النظام المهتزة تصاعدياً والتي تسمى بالاهتزازات الذاتية للنظام. وتدل الخبرة المترابطة في استثمار نظم القدرة على أن السبب الرئيسي في حدوث انهيار الاستقرار الساكن في بعض الحالات هو تأثير المنظمات الآلية، والتي قد

تتعارض (سواء من حيث بنيتها أم بارامتراتهما) مع متطلبات الاستقرار. لذلك عند اختيار بنية المنظمات الآلية وتحديد عوامل التضخيم (عوامل التنظيم) والثوابت الزمنية لعناصر هذه المنظمات، يصبح من الضرورة استخدام طرق تحليل الاستقرار الساكن مع الأخذ بالحسبان إمكانية حدوث الاهتزازات الذاتية.

في الحالات التي لا يكون هدفها اختيار وتحليل عمل المنظمات الآلية (غالباً ما يفترض أنه تم اختيار بارامترات التنظيم تلك المنظمات بحيث لا يحدث أية اهتزازات ذاتية في نظام القدرة الكهربائي) فإن دراسة الاستقرار تقتصر على تحليل انهيار الاستقرار اللادوري وهذا يؤدي إلى تبسيط الدراسة بشكل ملموس.

من المعلوم في نظرية الاستقرار أنه حتى لا يكون للمعادلة المميزة (10) التي يمكن تمثيلها على شكل كثير حدود بدلالة للعامل P:

$$D(P) = P^n + a_1 P^{n-1} + \dots + a_n = 0 \quad (11)$$

جذور حقيقية موجبة  $P_k$  فإن الشرط اللازم والكافي هو أن تكون جميع الحدود في المعادلة (11) أكبر من الصفر. إن تغير إشارة أي من الحدود يعني ظهور جذور حقيقية موجبة أو جذور عقدية ذات أجزاء حقيقية موجبة.

لدى دراسة هذه المعطيات بصورة معمقة يتبين بأنه لتحديد حد الاستقرار خلال عملية زيادة تحميل النظام المستقر ليس هناك حاجة لدراسة إشارات جميع الحدود في المعادلة (11) وذلك لأن أول حد ستتغير إشارته إلى إشارة سالبة هو الحد  $a_n$  حيث وكما هو واضح من المعادلات (10) و(11).

$$a_n = (-1)^n \det A \quad (12)$$

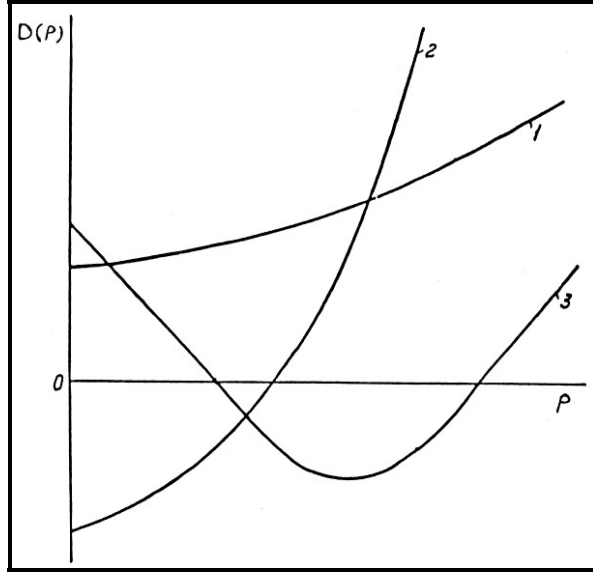
حيث:

$$A = \frac{\partial G}{\partial X} \quad \text{و} \quad a_n = 0 \quad \text{عند} \quad P_k = 0$$

ومن ثمّ إذا حدث خلال عملية زيادة تحميل النظام الكهربائي الابتدائي تغير في إشارة الحد  $a_n$  فإن ذلك سيؤدي إلى ظهور جذر حقيقي موجب وينتقل النظام الكهربائي إلى حالة عدم الاستقرار اللادوري.

في هذه الحالة وعند  $P = 0$  لدينا  $D(P) < 0$  وعند  $P \rightarrow \infty$  فإن  $D(P) > 0$  (شكل 4 المنحني 2) أي أن حدود المعادلة  $D(P) = 0$  تقع في المجال  $0 < P < \infty$ .





الشكل ٤ : علاقة  $D(P)$  لنظام مستقر (1) ولأنظمة غير مستقره (2,3)

وعملياً ولاستخدام معيار الإشارة الموجبة للحد  $a_n$  من المعادلة المميزة لتحديد استقرار النظام الكهربائي نقوم بحساب سلسلة متتابعة من الأنظمة الكهربائية مع زيادة التحميل في كل مرة وتحديد  $a_n$  من أجل كل حالة. فإذا حافظ الحد  $a_n$  للمعادلة المميزة على إشاراته عند العبور من نظام مستقر إلى نظام آخر قيد الاختبار، فإن ذلك يعني أن النظام قيد الاختبار هو مستقر لجهة الاستقرار الساكن، إلا أن ذلك يتطلب مجهوداً حسابياً كبيراً وبرمجيات معقدة غير مبررة في كثير من الأحيان وبخاصة إذا كان المطلوب فقط الحكم على النظام بأنه مستقر (عند نقط تشغيل معينة) لجهة الاستقرار الساكن أم لا وبغض النظر عن القيم الحسابية المتعلقة بذلك.

نعود إلى جملة المعادلات (3)، إن الأجزاء اليمينية لهذه الجملة هي عبارة عن معادلات نظام القدرة

الكهربائية (1) ذلك أن المشتقات  $\frac{dx_j}{dt}$  تصبح مساوية للصفر في نقطة التوازن، أي أن:

$$G_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = F(X, Y) = 0$$

ومن ثمَّ فإن مصفوفة اليعقوبي  $A = \frac{\partial F}{\partial X}$  لمعادلات الاستقرار الساكن (3) تتطابق مع مصفوفة اليعقوبي

$$\frac{\partial F}{\partial X} \text{ لمعادلات نظام القدرة الكهربائية.}$$

من هنا نستطيع في المعادلة (12) استبدال المصفوفة A بالمصفوفة  $\frac{\partial F}{\partial X}$  أي:

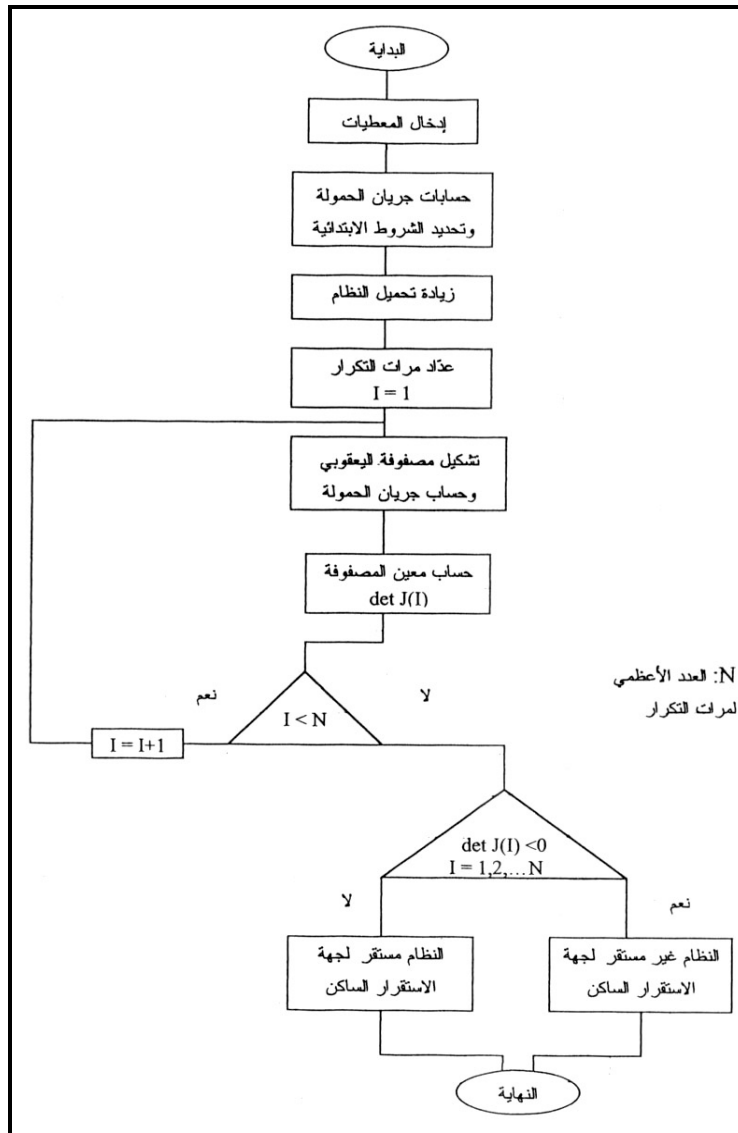
$$a_n = (-1)^n \det \frac{\partial F}{\partial X} \quad (13)$$

ومن هذه المعادلة نصل إلى النتيجة التالية:

إن الحد  $a_n$  للمعادلة المميزة يساوي إلى يعقوبي جملة معادلات نظام القدرة الكهربائية. ومعلوم أن مصفوفة اليعقوبي تلك يتم تشكيلها خلال كل مرحلة تكرار من عمليات حساب جريان الحمل للنظام المذكور، أي أنه بدلاً من إجراء الحسابات المعقدة لجذور معادلات الاستقرار الساكن لنظام القدرة الكهربائية ويتم تحديد إشارة يعقوبي جملة معادلات نظام القدرة الكهربائية خلال عمليات التكرار لحساب جريان الحمل. من أجل ذلك نقوم في أثناء حسابات نظام القدرة الكهربائية وتحديد جريان الحمل بزيادة تحميل النظام بالتدرج وإجراء عمليات التكرار ومراقبة إشارة اليعقوبي في كل مرة وعند تغير إشارة اليعقوبي تكون قد وصلنا إلى حد الاستقرار الساكن وذلك وفقاً للخطوات المبينة في المخطط الصندوقي في الشكل (٥).

على أنه لا بد من الإشارة إلى أن تطابق مصفوفة اليعقوبي لحساب نظام القدرة الكهربائية الساكن مع مصفوفة اليعقوبي لحساب الاستقرار يحدث فقط في حالة كتابة معادلات نظام القدرة الساكن والمعادلات التفاضلية لحساب استقرار ذلك النظام في صيغة واحدة (مثلاً توازن الاستطاعة). كما أن حد الاستقرار يتطابق مع حد الاستطاعة المنقولة فقط إذا كانت مميزات المولدات والأحمال عند حساب النظام في حالة زيادة التحميل في حالة حدوث الاضطرابات الصغيرة (تحديد الاستقرار) متماثلة. على أن مميزات المولدات والأحمال في حالتها حساب النظام وتحديد استقراره يمكن أن تتباين، وذلك للأسباب التالية:

- ١- في حسابات نظم القدرة الكهربائية بما في ذلك حالات زيادة التحميل يفترض وجود محطة توليد (أو عدة محطات) مزودة بمنظمات للتردد تسمى عقدة المرجع (Slack Bus)، والتي تمثل قضيباً تجميع لانهائياً يقوم بمهمة تنظيم التردد في النظام. وهذا الافتراض غير دقيق في حالة حسابات الاستقرار حيث منظمات التردد تعمل وفقاً لدايتها التكاملية وعند الاضطرابات الصغيرة ذات الفترات الزمنية القصيرة لا يؤخذ تأثيرها في الحسبان.
- ٢- في حسابات نظام القدرة الكهربائية تعدد طولية التوتر في عقد التوليد ثابتة بسبب وجود منظمات التوتر في تلك العقد أما في حسابات الاستقرار فتعدد القوى المحركة خلف المفاعلة العابرة ثابتة، وتعدد التوترات على قضبان تجميع المولدات متغيرة بسبب محدودية مجال وسرعة الاستجابة لدارات المنظمات تلك خلال الفترات الزمنية القصيرة.
- ٣- عند وجود محولات مزودة بألية تنظيم التوتر تحت الحمل في نظام القدرة الكهربائية فإنه يمكن اعتبار استطاعة الحمل ثابتة ضمن مجال التنظيم خلال حسابات ذلك النظام. على حين في حسابات التحقق من الاستقرار الساكن فإن استطاعة الحمل تتغير وفقاً لمميزاتها الساكنة بسبب القدرة المحدودة لاستجابة المنظمات للاضطرابات الصغيرة.



الشكل ٥: المخطط الصندوقي للدراسة الحاسوبية لحسابات الاستقرار الساكن

ويزداد الفرق بين حد الاستقرار وحد الاستطاعة المنقولة بزيادة الفرق بين شروط حساب نظام القدرة الكهربائية وحساب الاستقرار. ويزيد حد الاستقرار في بعض الحالات عن حد الاستطاعة المنقولة كما هو الحال خلال عملية زيادة تحميل النظام، فإنه في مرحلة ما نصل إلى حد الاستطاعة المنقولة دون أن يصل النظام إلى حد الاستقرار. على حين في حالات أخرى وكما سيتبين لنا من خلال الدراسة الحاسوبية أن ذلك النظام يمكن أن يصل إلى حد الاستقرار قبل وصوله إلى حد الاستطاعة المنقولة.

وعادةً ولتشغيل النظام الكهربائي عند نقط تشغيل آمنة من ناحية الاستقرار يترك ما يسمى باحتياطي الاستقرار الساكن بالاستطاعة الفعلية (Steady-state Margine) في نقاط مختلفة من النظام، وتحدد تلك النقاط استناداً إلى حسابات النظم الفعلية ويعطى معامل احتياطي الاستقرار بالعلاقة [5]:

$$C_E = \frac{P_{\max} - P_m}{P_{\max}}$$

حيث:

$P_{\max}$ : الاستطاعة الفعلية العظمى (الدرجة Critical) التي يمكن أن تعطىها المولدة التزمانية.

$P_m$ : الاستطاعة الفعلية المحمل بها المولد.

ويتراوح احتياطي الاستقرار بين قيمتين  $C_E = 0$  و  $C_E = 1$ .

ولبيان مدى فعالية الأسلوب المقترح في التحقق من استقرار نظام القدرة الكهربائية لجهة الاستقرار الساكن قمنا بإجراء حسابات الاستقرار الساكن بالطريقة التقليدية والأسلوب المقترح على عدد من الأنظمة من بينها النظام المتكامل للشبكة السورية.

### ٤- الدراسة الحاسوبية والنتائج الحسابية:

تم إجراء حسابات الاستقرار الساكن على الشبكة السورية kV 400 ÷ 230 المبينة بالشكل (6)، وتتألف هذه الشبكة من 47 عقدة و 77 خطاً. واستخدمنا نتائج حسابات جريان الحمولة كشروط ابتدائية لإنجاز حسابات الاستقرار تلك (الجدول 1).



## تحليل الاستقرار الساكن في حسابات نظم القدرة الكهربائية

في حسابات الطريقة التقليدية أخذنا كعينة أحد المولدات العنيفة ذي استطاعة اسمية 170 MW في محطة بانياس الحرارية، ويبين بالجدول (2) محددات هذا المولد.

كانت الاستطاعة الفعلية المقدمة من المولد في الشروط الابتدائية 120 MW ،والاستطاعة الردية  $E_{TERM} = 1.05pu$  ، والتوتر على مخارج المولدة  $E_{TERM} = 1.05pu$  .  
انطلاقاً من هذه المعطيات واعتماداً على المعادلة:

$$\bar{E}_q = E_{TERM} + jXd\bar{I}_0$$

نجد:

$$\bar{E}_q = 2.63740$$

حيث:

$\bar{E}_q$  : شعاع القوة المحركة الداخلي للمولد.

أي أن زاوية الحمولة أو العزم (الزاوية المحصورة بين شعاع القوة المحركة الكهربائية  $\bar{E}_q$  وشعاع التوتر على أقطاب المولدة  $E_{TERM}$ ) تساوي:

$$\delta = 37.4^\circ$$

ومعامل الاستقرار الساكن:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{E_q V}{X_T} \cos\delta > 0$$

موجب في هذه الحالة.

كذلك يمكن إيجاد معامل احتياطي الاستقرار الساكن:

$$C_E = \frac{P_{max} - P_m}{P_{max}} = 0.37$$

ويبين الشكل (7) منحنى الاستجابة الزمني للتوتر على مخارج المولد عند تعرضه لاضطراب طفيف ممثل بزيادة تيار التهيج بمقدار 1% .

الجدول 1. نتائج حسابات جريان الحمولة على الشبكة السورية في الشروط الابتدائية

(1) اسم المحطات في البرنامج (2) القوة المحركة الكهربائية على مخارج المولدة (3) الاستطاعة الفعلية

(4) الاستطاعة الردية (5) عامل الاستطاعة (6) التيار الحقيقي (7) التيار الردي

PTI INTERACTIVE POWER SYSTEM SIMULATOR--PSS/E THU, JUN 22 2000 15:53  
 PEEGT NETWORK 1999  
 FILENAME M3.RAW

1)	2)	3)	4)	5)	6)	7)				
-----MACHINE INITIAL CONDITIONS-----										
X-----	BUS	-----X ID	ETERM	EFD	POWER	VAR	P.F.	ID	IQ	
25954	SWDPT01	10.5	1	1.177114	2.051	20.00	15.00	0.8000	0.8478	0.4617
25955	SWDPTG02	10.5	1	1.177114	2.051	20.00	15.00	0.8000	0.8478	0.4617
25956	SWDPTG03	10.5	1	1.177114	2.051	20.00	15.00	0.8000	0.8478	0.4617
31141	TISHST01	115.8	1	1.0500	2.8018	126.39	148.67	0.6477	0.6943	0.2656
31142	TISHST02	115.8	1	1.0500	2.8478	140.00	149.55	0.6834	0.7244	0.2903
31143	TISHGT01	115.0	1	1.0325	2.4882	98.00	90.00	0.7365	0.7150	0.3707
31144	TISHGT02	115.0	1	1.0288	2.4097	98.00	85.00	0.7554	0.6935	0.3744
31201	NASRGT01	115.0	1	1.0500	2.3815	98.00	75.01	0.7941	0.6232	0.3889
31202	NASRGT02	115.0	1	1.0500	2.3815	98.00	75.01	0.7941	0.6232	0.3889
31203	NASRGT03	115.0	1	1.0500	2.3815	98.00	75.01	0.7941	0.6232	0.3889
32401	JANDGT01	115.0	1	1.0915	2.8851	98.00	85.00	0.7554	0.6878	0.3128
32402	JANDGT02	115.0	1	1.0915	2.8851	98.00	85.00	0.7554	0.6878	0.3128
32403	JANDST01	115.0	1	0.9953	2.7865	95.00	85.00	0.7452	0.8010	0.2908
32404	JANDGT03	115.0	1	0.9952	2.7368	98.00	85.00	0.7554	0.7754	0.2925
32405	JANDGT04	115.0	1	0.9952	2.7368	98.00	85.00	0.7554	0.7754	0.2925
32406	JANDST02	115.0	1	0.9953	2.0531	95.00	85.00	0.7452	0.7390	0.4259
32442	MEHRST02	112.0	1	1.1069	2.5353	105.00	60.00	0.8682	0.4799	0.3305
32443	MEHRST03	115.0	1	1.0982	2.9115	145.00	100.00	0.8232	0.6111	0.4430
32471	ZARST01	15.0	1	1.0821	5.1866	200.00	160.00	0.7809	2.2808	0.6330
33511	BANSST01	115.0	1	1.0500	2.1030	120.00	77.49	0.8401	0.5175	0.3770
33512	BANSST02	115.0	1	1.0500	2.0462	100.00	76.24	0.7952	0.4630	0.3214
33513	BANSST03	115.5	1	1.1608	2.8834	110.00	70.00	0.8437	0.3847	0.3625
33514	BANSST04	115.5	1	1.0500	2.2630	110.00	76.84	0.8198	0.4850	0.3556
34611	ZAYZGT01	115.0	1	1.0500	2.6236	98.00	73.03	0.8019	0.6558	0.3149
34612	ZAYZGT02	115.0	1	1.0500	2.6236	98.00	73.03	0.8019	0.6558	0.3149
34613	ZAYZGT03	115.0	1	1.0500	2.6236	98.00	73.03	0.8019	0.6558	0.3149
34651	ALEPST01	115.0	1	1.0394	1.6200	60.00	45.00	0.8000	0.2044	0.1752
34652	ALEPST02	115.0	1	1.0500	2.0686	160.00	72.12	0.9117	0.4871	0.3894
34653	ALEPST03	115.0	1	1.0500	2.0686	160.00	72.12	0.9117	0.4871	0.3894
34654	ALEPST04	115.0	1	1.0500	2.2231	200.00	75.63	0.9354	0.6055	0.4591
34655	ALEPST05	115.0	1	1.0500	1.8673	90.00	67.85	0.7985	0.3216	0.2387
34721	DAMHT01	13.8	1	1.0500	2.6361	100.00	82.83	0.7701	0.9098	0.5380
35702	BATHHT02	113.8	1	1.0181	1.5532	16.00	1.00	0.9981	0.3453	0.4567
35711	THAWHT01	113.8	1	1.0500	1.7247	60.00	32.11	0.8817	0.3745	0.4037
35712	THAWHT02	113.8	1	1.0500	1.7247	60.00	32.11	0.8817	0.3745	0.4037
35716	THAWHT06	113.8	1	1.0500	1.7247	60.00	32.11	0.8817	0.3745	0.4037
35921	TAYMGT01	110.5	1	1.0500	4.1902	30.00	6.47	0.9775	0.4850	0.4990
35922	TAYMGT02	110.5	1	1.0500	4.1902	30.00	6.47	0.9775	0.4850	0.4990
35923	TAYMGT03	110.5	1	1.0500	4.1902	30.00	6.47	0.9775	0.4850	0.4990
35951	SWEDGT01	111.5	1	1.0500	2.1138	30.00	-1.07	0.9994	0.4400	0.5194
35953	SWEDGT03	111.5	1	1.0500	2.1661	32.00	-0.91	0.9996	0.4538	0.5236
35954	SWEDGT04	111.5	1	1.0500	2.2132	31.00	0.43	0.9999	0.4424	0.5046
35955	SWEDGT05	111.5	1	1.0500	2.1661	32.00	-0.91	0.9996	0.4538	0.5236
62423	QATNST03	115.0	1	1.0500	1.9234	16.00	12.35	0.7916	0.3999	0.2678
62428	HOMSREF1	115.0	1	1.0500	2.1404	20.00	12.57	0.8466	0.4574	0.3273
62429	HOMSREF2	115.0	1	1.0500	2.0483	15.00	12.30	0.7732	0.3855	0.2545
62445	MEHRGT05	115.0	1	1.0500	1.7915	30.00	1.15	0.9993	0.4360	0.5020
63515	BAHSGT05	115.0	1	1.0500	2.1916	30.00	10.70	0.9419	0.5476	0.4448
64656	ALEPST06	115.0	1	1.0500	2.2619	30.00	12.26	0.9257	0.5695	0.4368
65954	SWDPTG04	110.5	1	1.0664	1.6340	15.00	-3.00	0.9806	0.2412	0.4962

INITIAL CONDITIONS CHECK O.K.

الجدول 2. محددات المولدة التزامنية العنقية 170MW في محطة توليد بانياس

**GENROU**  
Round Rotor Generator Model  
(Quadratic Saturation)

This model is located at system bus # 33511 IBUS.  
 machine # 1 I.  
 This model uses CONs starting with # \_\_\_\_\_ J,  
 and STATEs starting with # \_\_\_\_\_ K.  
 The machine MVA base is \_\_\_\_\_ for each of  
 \_\_\_\_\_ units = \_\_\_\_\_ MBASE.  
 ZSORCE for this machine is 0 + j 1 on the  
 above MBASE.

$P_m$   $\rightarrow$  PMECH

$E_{fd}$   $\rightarrow$  EFD

$V_t$   $\rightarrow$  VOLT at terminal bus

GENROU

SPEED  $\rightarrow$  Speed

ISORCE  $\rightarrow$  Source Current

ETERM  $\rightarrow$  Terminal Voltage

ANGLE  $\rightarrow$  Angle

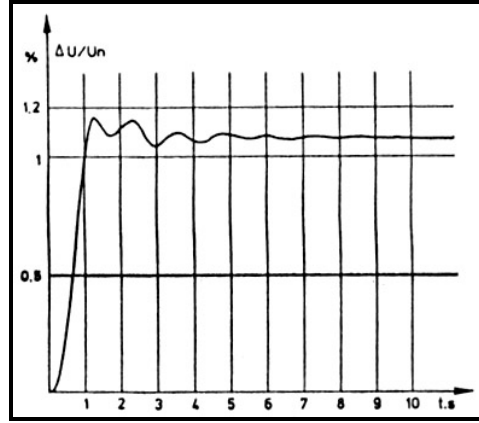
CONs	#	Value	Description
J		5	$T_{do} (> 0)$ (Seconds)
J+1		0.05	$T'_{do} (> 0)$ (Seconds)
J+2		1	$T_{qp} (> 0)$ (Seconds)
J+3		0.05	$T'_{qp} (> 0)$ (Seconds)
J+4		2.5	Inertia H
J+5		0	Speed Damping D
J+6		1.382	$X_d$
J+7		1.327	$X_q$
J+8		0.207	$X'_d$
J+9		0.345	$X'_q$
J+10		0.13	$X''_d = X''_q$
J+11		0.069	$X_f$
J+12		0.1	S(1.0)
J+13		0.25	S(1.2)

STATEs	#	Description
K		$E'_q$
K+1		$E'_d$
K+2		$\psi_{kd}$
K+3		$\psi_{kq}$
K+4		$\Delta$ Speed (p.u.)
K+5		Angle (radians)

$X_d, X_q, X'_d, X'_q, X''_d, X''_q, X_f, H$  and  $D$  are in p.u., machine MVA base.  
 $X''_d$  must be equal to  $X''_q$ .

IBUS, 'GENROU', I,  $T_{do}, T'_{do}, T_{qp}, T'_{qp}, H, D, X_d, X_q, X'_d, X'_q, X''_d, X''_q, X_f, S(1.0), S(1.2)$





الشكل ٧: منحني الاستجابة للتوتر على أقطاب المولد 170MW بعد زيادة تيار التهيج بمقدار 1%

ويتكرر الحسابات على مولدات مختلفة من محطات التوليد في الشبكة السورية نجد أن زاوية الاستقرار  $\delta$  مثلاً لأحد مولدات محطة تشرين الحرارية  $\delta = 35.80^\circ$  بهامش استقرار 0.38 ولأحد مولدات محطة الثورة المائية 0.288 بهامش استقرار 0.58.. وهكذا.

وتدل هذه الحسابات على أن المولدات في الشبكة السورية تعمل على نقاط تشغيل مقبولة من ناحية الاستقرار الساكن وبهامش استقرار جيد.

إن تحديد قيم عملية واقتصادية لمعامل احتياطي الاستقرار يشكل مسألة معقدة بعض الشيء، ذلك أن زيادة قيمة ذلك المعامل يسمح من جهة بتخفيض عدد حالات انهيار الاستقرار والأعطال المتصلة بذلك على نظام القدرة الكهربائية. ولكنه من جهة أخرى يؤدي إلى عدم استثمار كامل طاقة النظام ومن ثمّ زيادة النفقات في بناء محطات جديدة. لذلك فإن الاختيار الصحيح لقيم معامل احتياطي الاستقرار الساكن يجب أن تستند إلى نتائج دراسات فنية واقتصادية وإن كان ذلك يصطدم بعقبتين رئيسيتين:

أولاً: هناك صعوبة في التنبؤ بحجم الأعطال الناجمة عن انهيار الاستقرار: انقطاع التغذية عن المستهلك، حجم الانخفاض في الاستطاعة المولدة، الزمن اللازم لإزالة الأعطال وأسباب أخرى.

ثانياً: إن إنجاز حسابات علمية وعملية لاختيار معامل احتياطي الاستقرار يتطلب توافر معطيات موثوق بها عن آثار انقطاع التغذية عن المستهلكين بأنواعهم كافة من الناحيتين التقنية والاقتصادية.

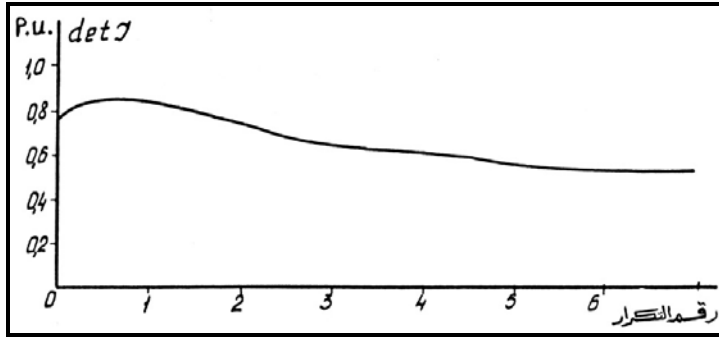
في ضوء ذلك يتم في الوقت الحاضر اختيار قيم معامل احتياطي الاستقرار استناداً إلى الخبرة والتجربة العملية، وعلى هذا الأساس تحدد قيمة ذلك المعامل في النظم التي تعمل بصورة طبيعية (والمجهزة بنظم تحكم جيدة) بـ 20%، وفي النظم التي تسمح خطوطها بزيادة التحميل وقطع التغذية عن المستهلكين يمكن أن نصل بقيمة ذلك المعامل إلى 8%.

فيما يخص الشبكة السورية فإننا لا نستطيع الوصول إلى تلك القيم لعدة أسباب تقنية واقتصادية منها ضعف تأثير نظم التحكم في بعض المحطات وخاصة القديمة منها وتحميل بعض الخطوط بطاقتها القصوى. وقد أكدت نتائج الحسابات بالأسلوب المقترح على النتيجة السابقة حيث تم إنجاز الحسابات على الشبكة السورية بواسطة برنامج تمثيل وتحليل الشبكات PSS/E [6]. مثلت الحملات باستطاعة ثابتة واخترنا عقدة جندر كعقدة مرجع (العقدة 1)، وبعد تعريض النظام لتغير طفيف عن طريق زيادة تيار التهبيج المولدة العنفيه في محطة توليد بانباس بمقدار 1% قمنا بمتابعة قيم اليعقوبي خلال مراحل عمليات التكرار لحسابات جريان الحمولة وفي كل تكرار قمنا بتسجيل قيمة مصفوفة اليعقوبي وحصلنا بالنتيجة على المنحني المبين بالشكل (8)، ومنه تبين أن معين اليعقوبي لم يغير إشارته خلال عمليات التكرار تلك ولم يصل إلى القيمة صفر مما يدل على أن الشبكة السورية تعمل عند نقط تشغيل مستقرة من ناحية الاستقرار الساكن.

ولبيان علاقة يعقوبي جملة معادلات نظام القدرة الكهربائية  $\frac{\partial F}{\partial X}$  بحد الاستطاعة المنقولة وحد

الاستقرار، قمنا بإجراء سلسلة أخرى من التجارب على الشبكة السابقة تم خلالها زيادة تحميل النظام عن طريق إقصاء الاستطاعة المولدة في محطة تشرين الحرارية بمقدار  $\Delta P$ ، وتسجيل قيم اليعقوبي  $\det J$  في كل مرة شكل (8). لأجل المنحنيات 2,3 أخذ بالحسبان بالإضافة إلى أثر زيادة التحميل أثر التغيرات الطفيفة التي تتعرض لها الأحمال عند تسجيل قيم اليعقوبي ( $\det J$ ).

كذلك لأجل المنحنيات 3 و4 تم تثبيت التوتر  $U = \text{const}$  على قضبان تجميع المولدات خلال عملية زيادة التحميل. وصول  $\det J$  إلى القيمة صفر يعني الوصول إلى حد الاستقرار، في حين وصول  $\det J$  إلى القيمة صفر يعني الوصول إلى حد الاستطاعة المنقولة.



الشكل ٨: تغير قيم اليعقوبي خلال مراحل عمليات التكرار

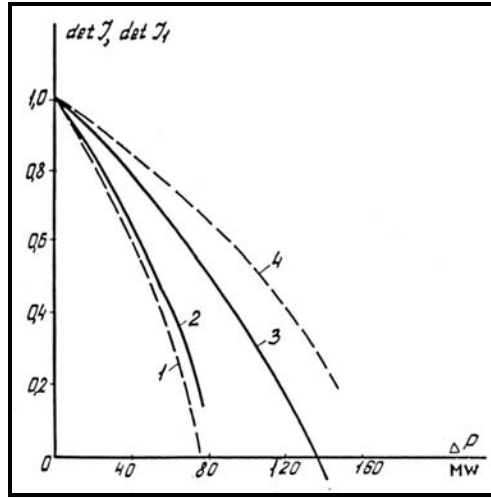
نستنتج من المنحنيات 1 و2 في الشكل (9) أنه تم الوصول إلى حد الاستطاعة المنقولة قبل الوصول إلى حد الاستقرار، أما عند تثبيت التوتر على قضبان تجميع المولدات عند زيادة التحميل (المنحنيات 3 و4) فإنه تم الوصول إلى حد الاستقرار قبل الوصول إلى حد الاستطاعة المنقولة. ويعود السبب في ذلك إلى إهمال أثر دائرة تنظيم التوتر في المولدات.

ونشير أخيراً إلى مجموعة من الوسائل التي تسهم في الحفاظ على الاستقرار الساكن لنظام القدرة الكهربائية:

### (١) مراكز التنسيق:

حيث تقوم هذه المراكز بمراقبة أداء نظام القدرة الكهربائية ومعرفة مسارات جريان الاستطاعة وقياسها في النقاط الأساسية من الشبكة واستطاعة محطات التوليد والتوتر في نقط التحكم من النظام ومدى قربها وبعدها عن نقاط التوتر الحرجة وتأثيرها في احتياطي الاستقرار، وكذلك مراقبة بارامترات النظام الأخرى واتخاذ الوسائل اللازمة لإعادة النظام إلى مجال العمل المسموح به.

وتساهم البرامج المتطورة لتحليل الأنظمة الكهربائية واستقرارها وخاصة بعد تزايد ساعات الحواسيب في مراكز التنسيق في تحقيق تشغيل فعال لنظام القدرة الكهربائية عن طريق إجراء حسابات للنظام عند نقط تشغيل حرجة وإعطاء صورة مسبقة عن تلك النقط بحيث نحافظ على النظام بعيداً عن تلك النقط قدر الإمكان.



الشكل ٩: علاقة قيم اليعقوبي بتغير الاستطاعة في عقدة تشرين

من أجل المنحنيات (1,2)  $E' = \text{const}$  من أجل المنحنيات (3,4)  $U = \text{const}$

### (٢) نظم التحكم والحماية الآلية:

تتيح تلك النظم إمكانيات كبيرة في تحقيق تشغيل آمن لنظام القدرة الكهربائية في ظروف استثمار الطاقة القصوى للنظام، ويسهم في ذلك نظم التحكم والحماية الحديثة المجهزة بنظم محوسبة للقيادة الآلية عن

طريق إعادة بارامترات النظام إلى قيم تشغيل مقبولة عند تجاوزها للحدود المسموح بها وبحيث نحافظ على الاستطاعة الفعلية  $P$  وزاوية الحمل  $\delta$  والتوتر أدنى من القيم العظمى المسموح بها لهذه البارامترات.

ومثال على ذلك نظم التحكم الآلي بالتردد التي تقوم بتنظيم التردد وتحقيق توزيع أمثل للاستطاعة بين النظم ومحطات التوليد ويظهر أثرها هنا واضحاً في أوقات الذروة العظمى والدنيا؛ حيث تبرز الحاجة لزيادة تحميل محطات التوليد وقت الذروة العظمى وتخفيضه في أوقات الذروة الدنيا وبحيث يبقى التردد ثابتاً.

وكذلك نظم التحكم بالتوتر والاستطاعة الردية التي تقوم بها المولدات التزامنية ومعوّضات الاستطاعة الردية والمحولات وبحيث يتم الحفاظ على مستوى توتر طبيعي في محطات تحويل المستهلك وزيادة الاستقرار الساكن لنظام القدرة الكهربائية.

### ٥- الخاتمة:

بناءً على ما ذكر واستناداً إلى النتائج التي تم الحصول عليها يتبين لنا أنه عند استخدام النماذج الرياضية التقليدية لعناصر الشبكة وبفرض أن جميع المولدات التزامنية مجهزه بمنظمات لدارات التهييج ذات مجال واسع للتنظيم، بالإضافة إلى استخدام نموذج واحد للأحمال الكهربائية ووجود قضيب تجميع لانهائي في الشبكة فإن مصفوفة اليعقوبي لحساب جريان الحمل لنظام القدرة الكهربائية تتطابق مع مصفوفة اليعقوبي لجملة معادلات الاستقرار الساكن، ومن ثمّ فإن هناك تطابقاً ما بين حد الاستقرار الساكن والحالة الحدية للشبكة الكهربائية. لذلك يمكننا وعند توافر الشروط السابقة استخدام إشارة اليعقوبي لجملة معادلات نظام القدرة الكهربائية خلال عمليات التكرار لحساب تلك النظم لتحديد الاستقرار الساكن لنظام القدرة الكهربائية، ومن ثمّ يمكن في هذه الحالة استخدام برمجيات حساب نظام القدرة الكهربائية وتحليل جريان الحمل لدراسة الاستقرار الساكن دون الحاجة إلى البرمجيات الديناميكية المعقدة والمكلفة اقتصادياً.

وتبين لنا كذلك أنه عند زيادة تحميل النظام فإنه يمكن الوصول في بعض الحالات إلى الحالة الحدية للشبكة الكهربائية دون حدوث انهيار للاستقرار الساكن خاصة إذا توافر هامش جيد للاستقرار يتم اختياره وفقاً لمقاييس علمية يتم تحديدها استناداً إلى نتائج دراسات تحليلية واقتصادية، وتؤدي مراكز التنسيق ونظم التحكم الآلي بالإضافة إلى نظم الحماية والتحكم بجريان الاستطاعة دوراً هاماً في الحفاظ على الاستقرار الساكن وخاصة في شروط استثمار الطاقة القصوى لنظام القدرة الكهربائية.

## المراجع

- 1- Padiyar, K.R., Power system dynamics, John Wiley & Sons Ltd., Singapore, 1994.
- 2 - Weedy, B.M., Electric. Power Systems, John. Wely & Sons, 1979.
- 3- Paul M. Anderson, A.A. Fouad, Power system control and stability, IEEE Press, 1994.
- 4- Barret, J.P., Bornard. P, Meyer. B., Power System simulation, chapman & Hall, UK, 1997.
- 5- Machowsk, Jan, Bialek Janusz, Bumby James, Power system dynamics and stability, John Wiley & Sons, New York, 1997.
- 6- PSS program for power system simulation and analysis, PTI company, UK, 2000.

· تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق: ٢٠٠١/٣/١٢.