

## التنسيق الاقتصادي الخاضع لقيود أمان تأخذ بالحسبان إمكانيات إعادة جدولة التوليد

د.م. نبيل الفقيه\*

### الملخص

هَدَفَ هذا البحث إلى تطوير نموذج رياضي وخوارزمية لحل مسألة التنسيق الاقتصادي الخاضع لقيود الأمان، تأخذ بالحسبان إمكانيات (capability) إعادة جدولة التوليد بعد الحالة الطارئة، استناداً إلى تقانة البرمجة الخطية. إن تكاليف التشغيل تبعاً لاستراتيجية التوليد المقترحة هي أقل من تكاليف التشغيل الآمن التقليدي ولها مستوى الأمان نفسه. أُدرِجَت الخوارزمية المقترحة في خوارزمية النظام البرمجي "SECURITY 2" لتحليل الأحداث المحتملة وتصميم الإجراءات الوقائية لضمان تشغيل آمن لنظم القدرة الكهربائية، الذي طورناه سابقاً. حُوِّلَت الخوارزمية الجديدة إلى نظام برمجي SECURITY III بلغة ++C. النظام البرمجي المطور لا يقوم فقط بتقييم أمان نظام القدرة وكشف الخطوط المحملة تحمياً زائداً في حالة الطوارئ، واستخدام تقانة البرمجة الخطية لتعديل استراتيجية التوليد وتقنين بعض الأحمال كإجراء تصحيح وقائي لإزالة التحميل الزائد عن الخطوط، بل يقترح أيضاً استراتيجية التوليد الأقل كلفة في التشغيل ولها مستوى أمان التشغيل الآمن التقليدي نفسه. تم التحقق من الخوارزمية المطورة والنظام البرمجي المنجز من خلال تطبيقه على عدد من الأنظمة الاختبارية وأظهرت النتائج فعالية الخوارزمية المقترحة والنظام البرمجي المطور.

**الكلمات المفتاحية:** أمان نظام القدرة، تنسيق اقتصادي، إعادة جدولة التوليد، تحليل الأحداث المحتملة، تصحيح وقائي.

\* أستاذ، قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق

## 1- المقدمة:

مع تنامي حجم نظم القدرة الكهربائية وتعقيد شروط تشغيلها، أصبح أمان نظام القدرة (Power system security) الذي يتعامل مع مقدرة النظام (System Capability) على مواجهة أحداث طارئة، مصدر قلق كبيراً لمشغل نظام القدرة [1].

في أغلب الأحيان، توصف حالات التشغيل المختلفة التي يمكن أن يمر بها نظام القدرة على الشكل الآتي: الحالة النظامية (Normal State)، وهي الحالة المطلوبة إذ تكون فيها جميعها بارامترات نظام القدرة ضمن حدود تشغيل عناصر النظام فضلاً عن هوامش بحيث يمكن للنظام أن يتحمل بعض الاضطرابات المحددة مسبقاً، دون تعريض أمانه للخطر. حالة إنذار (Alert State) وفيها يستمر عمل نظام القدرة ضمن الحدود المسموح بها، لكنه فاقد للهوامش التي كانت موجودة في حالة التشغيل النظامية، ويستمر النظام في تزويد القدرة كالمعتاد، دون أن يلحظ المستهلك أن اضطراباً ما أثر في النظام. إن هدف المشغل في هذه الحالة هو إعادة النظام إلى حالة تشغيل نظامية من خلال إجراءات معينة، لتأسيس هوامش التعامل مع اضطرابات جديدة. حالة الطوارئ (Emergency State) وتتسأ إذا حدثت اضطرابات أخرى أو إذا تعرض النظام إلى اضطراب كبير. في هذه الحالة، تصبح بعض البارامترات، على سبيل المثال التوترات أو جريان الاستطاعة في الخطوط خارج الحدود المسموحة، دون أن يكون هناك نقص في الاستطاعة، لكن يجب اتخاذ إجراءات سريعة وإلا فإن أجهزة أخرى سوف تُفصل بالحمايات المختلفة. وإذا لم ينجح المشغل بإعادة النظام إلى حالة تشغيل الإنذار (alert operation) وتدرجياً إلى حالة تشغيل نظامية (normal operation)، فهناك خطر بأن ينتهي في الحالة القصوى (Extreme State). في هذه الحالة ليست هناك نقص في استطاعة كافية لتزويد

الأحمال، وينخفض التردد، وغالباً ما تكون هناك حاجة لفصل أحمال من أجل تأمين النظام، إذ تُفصل أولاً الأحمال التي يمكن أن يُعاد وصلها بسهولة دون إلحاق أضرار كبيرة بالمستهلكين، وإذا كان هذا الإجراء غير ناجح فإن النظام أو أجزاء منه سوف تنهار (System Collapse)، بمعنى فصل مصدر الطاقة، وهي الحالة التي يجب تجنبها بالوسائل كلها. فإن لم يكن من بد، وجب إعادة النظام بأسرع ما يمكن إلى حالة تشغيل نظامية، ويجري غالباً جزء بعد آخر، وتُدعى هذه العملية إعادة النظام (System Restoration). ويؤدي التحكم المركزي دوراً مهماً في نقل نظام القدرة إلى حالة التشغيل النظامية [2].

يُعدّ جريان الاستطاعة إحدى الأدوات الأساسية لتحليل نظام القدرة، ويُستخدم في مراحل التشغيل فضلاً عن التخطيط، فقد استخدمته الشركات المتكاملة عامودياً (التي تمتلك كلياً التوليد والنقل والتوزيع) للتحكم في نظمها وفي التخطيط والتشغيل الاقتصادي الأمثل لمصادر التوليد. في السنوات الأخيرة، ومع تحرير أسواق الكهرباء، تم التعامل مع الاستطاعة الفعلية والردية كمنتجين مختلفين، فقد عُدت الاستطاعة الفعلية كسلعة قابلة للتداول، في حين عُدت الاستطاعة الردية كخدمة تابعة يزودها مشغل النظام ويدفع تكاليفها المستخدمون جميعهم. وبسبب الفصل بين هذين المنتجين، ازداد الاهتمام في الطرائق التي تبحث فقط في جريان الاستطاعة الفعلية. فقد أوردت المراجع ذات الصلة خلال السنوات الثلاثين الماضية، تقانات كثيرة لحل مسألة جريان الاستطاعة، ويمكن تصنيف هذه التقانات في مجموعتين من النماذج الرياضية: (a) النماذج التي تستند إلى البرمجة الخطية (LP) Linear Programming [3]، [4] و (b) النماذج التي تستند إلى البرمجة اللاخطية [5] (NLP) Nonlinear Programming، يضاف إليها تقانات الذكاء الاصطناعي التي تستخدم الشبكات العصبونية أو الخوارزميات الجينية [6].

وقد يكون -على الأغلب- كبيراً [14].

### 1-3 خصائص عناصر نظام القدرة

تمتاز بعض عناصر نظام القدرة الكهربائية (خطوط، محولات، منابع تغذية، أحمال) بخصائص يمكن أن تُسهم بعد حدوث اضطراب ما وقبل عمل أجهزة الحماية (ضمن مجال محدد وخلال زمن معين) في إعادة جدولة التوليد (generation rescheduling)، من تلك الخصائص تغيير قيمة التوليد، والاحتياطي الدوّار، وتبادل الطاقة بين الشبكات الإقليمية الأخرى، وعمليات الوصل أو الفصل، زيادة التحميل، واستثمار خصائص "نظم نقل التيار المتناوب المرنة" Flexible AC Transmission System (FACTS) ولاسيما نظام "المتحكم الموحد بجريان الاستطاعة" Unified (UPFC) [15] Power-Flow Controller وغير ذلك مما له أهمية كبيرة في إعادة نظام القدرة إلى حالة تشغيل نظامية [16]، [17]، [18].

### 2- أهمية البحث وأهدافه:

إنّ هدف التنسيق الاقتصادي "البحث" في نظام القدرة الكهربائية هو جدولة التوليد بحيث تكون كلفة التوليد والضياعات في حدودها الدنيا مع الاحتفاظ بأداء مقبول من حيث القيود المفروضة على المولدات، والاستطاعة الفعلية والرديّة، وحدود تحميل خطوط النقل، الخ...، وما دام أهم واجبات إدارة نظام القدرة الكهربائية تجاه المستهلكين هي تأمين الطاقة الكهربائية بموثوقية وجودة عاليتين، ما يعني أنه لو تعرض نظام القدرة لاضطراب ما وتوقف أحد عناصره عن أداء وظيفته استمر في تزويد الأحمال بالطاقة الكهربائية دون أن تتجاوز بقية العناصر قيود تشغيلها الاسمية، مع العلم أن ذلك يقتضي زيادة كبيرة في كلفة التشغيل، بسبب الانحراف الكبير لنقاط تشغيل وحدات التوليد عن التنسيق الاقتصادي "البحث"، تستمر طوال مدة العمل الطبيعي.

مما تقدم، يبرز السؤال المهم الآتي: إذا كان نظام القدرة

إن جريان الاستطاعة الخطي هو تبسيط لجريان الاستطاعة الكامل، يبحث فقط في جريان الاستطاعة الفعلية، مهملًا حساب التوترات والاستطاعة الرديّة وضياعات النقل، ويُستخدم -في كثير من الأحيان- في الدراسات التقانية والاقتصادية لنظم القدرة لتقييم تأثير تبادل الطاقة التجارية في شبكات النقل [7]، [8]. يمكن تطبيق جريان الاستطاعة الخطي إذا استوفى عدداً من الافتراضات. منها مثلاً، أن تكون مقاومة الخطوط ضئيلة، أي إنّ هناك حدوداً لقيمة النسبة  $X/R$  تضمن دقة معينة [9]، [10]. لذا، يُعدّ جريان الاستطاعة الخطي -في حالات كثيرة- بديلاً مهماً لجريان الاستطاعة التقليدي. وقد أُعيد الاهتمام بهذه الطريقة تقريباً مع تحرير أسواق الكهرباء والحاجة إلى أدوات بسيطة لتحليل نظام القدرة.

### 1-1- التنسيق الاقتصادي Economic Dispatch:

إن هدف التنسيق الاقتصادي في نظم القدرة الكهربائية هو التوصل إلى حالة تشغيل تلبي الطلب على الاستطاعتين الفعلية والرديّة دون تحميل عناصر النظام فوق مقدرتها، وبحيث تكون نفقات التشغيل أقل ما يمكن [11]، [12]. غير أن التنسيق الاقتصادي "البحث" (pure economic dispatch) قد لا يلبي أمان نظام القدرة، لأنه لا يضمن بقاء النظام في حالة تشغيل نظامية عند حدوث عطل (مثلاً انقطاع خط أو توليد)، وهذا يقود إلى مفهوم التنسيق الآمن لنظام القدرة الذي يضمن بقاء النظام في حالة تشغيل نظامية بعد العطل [13].

### 1-2- التنسيق الآمن secure dispatch:

يُنصح المشغل بتنفيذ إجراءات تصحيحية للتخفيف ما أمكن من حالات التحميل الزائد للخطوط (أو المحولات) واقتراح إجراءات تصحيحية وقائية (preventive correction actions) لتجنب التحميل الزائد لها عند تعرض نظام القدرة لأعطال متوقعة. مع العلم أن استراتيجية التوليد في هذه الحالة تحتم انحرافاً في التوليد عن التشغيل الاقتصادي "البحث"

(pu)، يُمثل خط النقل الواصل بين قضيبي التجميع  $z$  بدارة  $\pi$  كما يظهر في الشكل (1). بإهمال الناقلية التفرعية للخط  $G_{ij0}$  وبإهمال المقاومة الطولية للخط  $R_{ij}$  نجد:

$$y_{ij} = jB_{ij} = j \frac{-1}{\chi_{ij}} \quad \text{سمحية الخط الطولية} =$$

سمحية الخط التفرعية عند قضيبي التجميع  $i$ :

$$y_{ij0} = jB_{ij0} \quad (\text{تقابل } C/2)$$

الاستطاعة العقدية المحقونة في الخط  $ij$  من جهة القضيبي  $i$ :

$$S_{ij} = V_i [(V_i - V_j) y_{ij}]^* + V_i [V_i (y_{ij0})]^* \quad (1)$$

تبعاً لذلك، تكون الاستطاعة الفعلية:

$$P_{ij} = \text{Real}[S_{ij}] = V_i V_j B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) \quad (2)$$

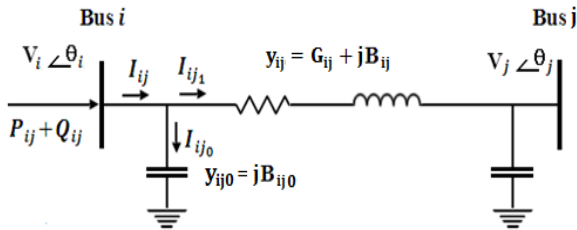
وبفرض التقريبات الآتية [20]:

$$\sin(\theta_i - \theta_j) \cong \theta_i - \theta_j \quad \text{Radian}$$

$$V_i = V_j \cong V_0 = 1 \text{ pu} \quad \text{التوتر الاسمي}$$

تصبح المعادلة (2):

$$P_{ij} = \frac{1}{\chi_{ij}} (\theta_i - \theta_j) \quad (3)$$



الشكل (1) تمثيل  $\pi$  لخط نقل يصل بين قضيبي توصيل [20]

ونكون الاستطاعة المحقونة في قضيبي التجميع  $i$  مساوية لمجموع الاستطاعات المحقونة في الخطوط المتصلة بالقضيبي  $i$ :

$$P_i = \sum_j P_{ij} = \sum_j \frac{1}{\chi_{ij}} (\theta_i - \theta_j) \quad (4)$$

$j$  over all nodes connected directly to  $i$

يعمل مسبقاً وفق التسيق الاقتصادي "البحث" وإذا أُخذ بالحسبان إمكانية تعديل الاستطاعة في بعض وحدات التوليد (خلال زمن معين)، ما استراتيجية التوليد الآمن الأقرب إلى التشغيل الاقتصادي "البحث"؟

إن الإجابة عن هذا السؤال هو الموضوع الرئيس في هذا البحث، وذلك من خلال تطوير نموذج رياضي وخوارزمية يمكن من خلالها اقتراح استراتيجية التوليد الآمن الأقل انحرافاً عن التشغيل الاقتصادي "البحث"، يُستثمر فيها مقدرة (capability) بعض وحدات التوليد في نظام القدرة على تعديل التوليد عقب حدوث اضطراب ما، ثم دمج الخوارزمية المقترحة في النظام البرمجي "SECURITY 2" لتحليل الأحداث المحتملة والإجراءات الوقائية" الذي قمنا بتطويره سابقاً [19].

### 3- النموذج الرياضي Mathematical Model:

يتألف النموذج الرياضي من المعادلات الرياضية التي تمثل نظام القدرة ومسألة جريان الحمولة الخطي وعوامل الحساسية sensitivity factors لانقطاع خط (أو محول) أو توقف محطة توليد ومسألة التحميل الأعظمي لخطوط النقل، التي تمهد لتصميم الخوارزمية الملائمة وبنائها لاقتراح استراتيجية التوليد المناسبة.

بداية، إفتُرِحَت استراتيجية التوليد بالاعتماد على تقانة البرمجة الخطية LP، وهي كما هو معلوم تقانة رياضية تعطي الحل الأمثل (Optimal Solution) لمسألة هندسية بعد صياغة النموذج الرياضي الذي تتطلبه طريقة (Simplex).

### 3-1 جريان الحمولة الخطي Linear Loadflow:

تقتصر هذه الطريقة التقريبية على حساب جريان الاستطاعة الفعلية في فروع الشبكة بدلالة المفاعلات الطولية للفروع (خطوط ومحولات) وزوايا الطور لعقد الشبكة  $\theta_i$  والاستطاعات الفعلية المحقونة  $P_i$  في هذه العقد. لاستخراج معادلات جريان الاستطاعة بالقيم الواحدة

$$P_{ij}^{new} = P_{ij}^{old} + \sum_{m=1}^n g_{ij,m} \times \Delta P_m \quad (9)$$

إذ:

$P_{ij}^{old}$  = جريان الاستطاعة على الخط  $ij$  قبل تغيير التوليد؛  
 $P_{ij}^{new}$  = جريان الاستطاعة على الخط  $ij$  بعد تغيير التوليد؛

$\Delta P_m$  = تغير استطاعة التوليد في قضيب التجميع  $m$ ؛

$g_{ij,m}$  = عامل حساسية الجريان على الخط  $ij$  بسبب التغير في استطاعة التوليد على القضيب  $m$ .

#### ▪ قيد جريان الخط (Line flow Constraint): [20]

يجب أن يكون الجريان الجديد دوماً أقل من الجريان الأعظمي  $P_{ij}^{max}$  (وهذا الحد الأعظمي يمكن أن يكون الحد الحراري لخط النقل أو حد الاستقرار الدائم، أيهما أقل).

$$-P_{ij}^{max} \leq P_{ij}^{new} \leq P_{ij}^{max}$$

وبالأخذ بالحسبان المعادلة (9) وبالفصل إلى مترابحتين نجد:

$$\sum_{m=1}^n g_{ij,m} \times \Delta P_m \leq P_{ij}^{max} - P_{ij}^{old} \quad (10-a)$$

$$\sum_{m=1}^n g_{ij,m} \times \Delta P_m \geq -P_{ij}^{max} - P_{ij}^{old} \quad (10-b)$$

نعتمد التغير في الاستطاعة  $\Delta P_m$  كمتحولات قرار Decision variables لمنظومة LP. وباعتبار أن طريقة Simplex تتعامل فقط مع متحولات موجبة نستخدم العلاقة:

$$\Delta P_m = \Delta P_m^+ - \Delta P_m^- \quad (11)$$

إذ:

$\Delta P_m^+$  = مقدار رفع الاستطاعة  $P_m$  على القضيب  $m$ ؛

$\Delta P_m^-$  = مقدار خفض الاستطاعة  $P_m$  على القضيب  $m$ .

المعادلات (4)، تمثل  $n$  معادلة خطية  $P = f(\theta)$  (إذ  $n$  عدد قضبان تجميع الشبكة) منها فقط  $n-1$  معادلة مستقلة. وبعد المعادلة غير المستقلة تمثل قضيباً مرجعياً reference bus اختيارياً، ويفرض أن  $\theta_{ref} = 0$ . نكتب المعادلات (4) بشكل مصفوفاتي:

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \end{bmatrix} = [B_x] \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (5)$$

وتحسب عناصر المصفوفة  $[B_x]$  كما يأتي [21]:

$$B_{xii} = \sum_j \frac{1}{\chi_{ij}} \quad \text{for } i \neq \text{ref} \quad (6-a)$$

$j$  over all lines connected to  $i$

$$B_{xii} = 0.0 \quad \text{for } i = \text{ref} \quad (6-b)$$

$$B_{xij} = \frac{-1}{\chi_{ij}} \quad \text{for } i \neq \text{ref} \text{ and } j \neq \text{ref} \quad (6-c)$$

$$B_{xij} = 0.0 \quad \text{for } i = \text{ref} \text{ or } j = \text{ref} \quad (6-d)$$

من المعادلة (5):

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \end{bmatrix} = [X] \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (7)$$

إذ:

$$[X] = [B_x]^{-1} \quad (8)$$

لما كانت عناصر السطر والعمود الموافقين للقضيب المرجع في المصفوفة  $[B_x]$  أصفاراً، ولإيجاد مقلوب المصفوفة  $[B_x]$ ، حُذِفَ سطر القضيب المرجع وعموده ثم قلب المصفوفة المتبقية، يُعاد بعد ذلك سطر المرجع وعموده إلى المصفوفة المقلوبة.

#### 3-2 صياغة قيود التنسيق الاقتصادي - الأمن

يُعطى الجريان الجديد على أي خط  $ij$  من الشبكة بعد إجراء تعديل على التوليد لأجل كل قضيب توليد  $m$  بالمعادلة الآتية [21]:

باعتبار متحولات القرار المناسبة للبرمجة الخطية هي  $\Delta P_m^+$  و  $\Delta P_m^-$  وليست  $P_m$  ينبغي تعديل القيد في المعادلة (15) إلى الشكل الآتي:

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq \Delta P_m^+ \leq P_m^{max} - P_m^{old} \\ 0 \leq \Delta P_m^- \leq P_m^{old} - P_m^{min} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

إذ  $m$  تأخذ القيم من 1 إلى  $n$ .

### 3-3 صياغة التابع الهدف Objective Function

بفرض أن استراتيجية التوليد (أي قبل حصول الأحداث الطارئة) تحقق التنسيق الاقتصادي للتوليد. ولكي لا نبتعد كثيراً عن هذا الوضع الأمثل للتشغيل يجب أن يكون مجموع تعديلات استطاعات التوليد أصغرياً. وتأسيساً على ذلك نصوغ التابع الهدف بالعلاقة:

$$\text{Minimize } \sum_{m=1}^n C_m (\Delta P_m^+ + \Delta P_m^-) \quad (17)$$

إذ:

$C_m$  عامل غرامة (penalty) انحراف التوليد عن التشغيل الاقتصادي.

### 3-4 البرمجة الخطية

من الفقرات (1-1) إلى (3-1) ومن العلاقات (12) إلى (17) يُستنتج النموذج الرياضي للإجراء التصحيحي الوقائي كما في العلاقات (18) الآتية:

### ▪ قيد تغطية الأحمال (Loads covering Constraint):

إن مجموع استطاعات التوليد يجب أن يساوي دوماً مجموع استطاعات الأحمال بافتراض إهمال الضياعات (تتطلب تقانة الجريان الخطي المعتمدة إهمال الضياعات الفعلية).

$$\sum_{m=1}^n P_m^{new} = P_{load} \quad (12)$$

$$\sum_{m=1}^n P_m^{old} = P_{load} \quad (13)$$

من المعادلات (9) و (11) و (12) و (13) نجد:

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^n P_m^{new} &= \sum_{m=1}^n (P_m^{old} + \Delta P_m^+ - \Delta P_m^-) = P_{load} \\ \sum_{m=1}^n P_m^{new} &= \sum_{m=1}^n P_m^{old} + \sum_{m=1}^n (\Delta P_m^+ - \Delta P_m^-) = P_{load} \\ \sum_{m=1}^n (\Delta P_m^+ - \Delta P_m^-) &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

إذ:

$P_m^{old}$  = الاستطاعة المحقونة في قضيب التجميع  $m$  قبل تغيير التوليد (استراتيجية التوليد I)؛

$P_m^{new}$  = الاستطاعة المحقونة في قضيب التجميع  $m$  في حالة التشغيل الوقائي (استراتيجية التوليد II).

و بحسب المعادلة (14) إن المجموع الجبري لتغيرات استطاعات التوليد للمولدات كلها يجب أن يساوي الصفر، وذلك لتحقيق التغطية الكاملة للأحمال.

### ▪ قيد تعديل استطاعة التوليد Generation Shift

constraint:

يستطيع كل مولد توليد استطاعة عظمى  $P_m^{max}$  ولا يُسمح له بالعمل لتوليد استطاعة أقل من حد أصغري  $P_m^{min}$ ، أي:

$$P_m^{min} \leq P_m \leq P_m^{max} \quad (15)$$

<b>Minimize:</b>	$\sum_{m=1}^n C_m (\Delta P_m^+ + \Delta P_m^-)$	التابع الهدف
<b>Subject to:</b>	$\sum_{m=1}^n (\Delta P_m^+ - \Delta P_m^-) = 0$	معادلة قيد تعديل التوليد
<b>And:</b>	$\sum_{m=1}^n g_{ij,m} (\Delta P_m^+ - \Delta P_m^-) \leq P_{ij}^{max} - P_{ij}^I$	(a) قيد جريان الخط
<b>Or</b>	$\sum_{m=1}^n g_{ij,m} (\Delta P_m^+ - \Delta P_m^-) \geq -P_{ij}^{max} - P_{ij}^I$	(b) قيد جريان الخط
<b>And:</b>	$\begin{aligned} 0 \leq \Delta P_m^+ &\leq P_m^{max} - P_m^I \\ 0 \leq \Delta P_m^- &\leq P_m^I - P_m^{min} \end{aligned}$	(c) قيود تعديل التوليد

لأجل:  $m=1 \dots n$

(18)

القضيب  $m$  في الحالة الطارئة؛  
 $VP_m^- =$  مقدار خفض الاستطاعة  $P_m^{III}$  المتاح على  
 القضيب  $m$  في الحالة الطارئة؛  
 $M$  تأخذ القيم من 1 إلى  $n$ .

▪ تعديل التوليد وفق الإجراء الوقائي الآمن المقترح:

$$\Delta P_m = P_m^I - P_m^{II} \quad (19)$$

للحصول على القيمة المطلوبة  $\Delta V_m$  أياً كانت إشارة كل  
 من  $\pm \Delta P_m$  و  $\pm \Delta PR_m$  نستخدم المعادلة الآتية:

$$\Delta V_m = \frac{||\Delta P_m| - |\Delta PR_m|| - (|\Delta P_m| + |\Delta PR_m|)}{2} \quad (20)$$

$$P_m^{III} = P_m^{II} + \Delta V_m, \quad \text{for } m=1 \dots n, m \neq \text{ref} \quad (21)$$

$$P_{ref}^{III} = P_{ref}^{II} - \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq ref}}^n \Delta V_m \quad (22)$$

إذ:

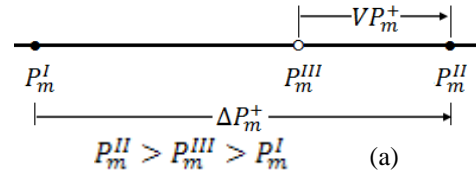
$P_m^I =$  الاستطاعة الفعلية المحقونة في القضيب  $m$  وفق  
 استراتيجية التوليد؛

$P_m^{II} =$  الاستطاعة الفعلية المحقونة في القضيب  $m$  وفق

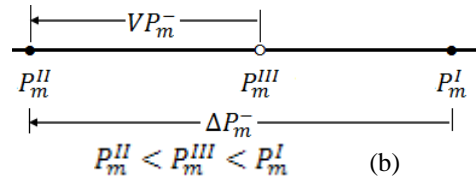
3-5 التنسيق الاقتصادي-الآمن مع إمكانية تعديل

التوليد (استراتيجية التوليد III المقترحة في هذا البحث)

بفرض أنه يمكن (في الحالة الطارئة) رفع استطاعة التوليد  
 على قضيب التجميع  $m$  بالمقدار  $VP_m^+$  أو خفضها  
 بالمقدار  $VP_m^-$  كما في الشكل (2).



يتم الانتقال من  $P_m^{II}$  باتجاه  $P_m^I$  بمقدار  $VP_m^+$  أو  $|\Delta P_m^+|$  أيهما  
 أقل.



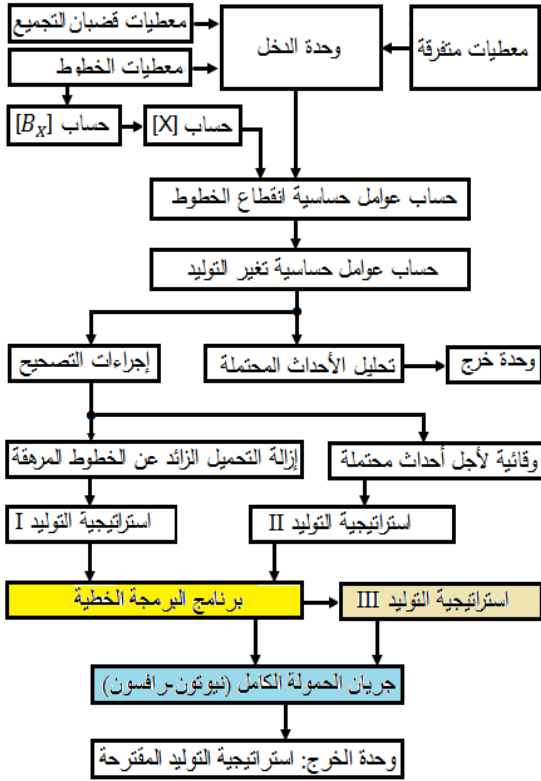
يتم الانتقال من  $P_m^{II}$  باتجاه  $P_m^I$  بمقدار  $VP_m^-$  أو  $|\Delta P_m^-|$  أيهما  
 أقل.

الشكل (2) مخطط رمزي مبسّط- مقدار الرفع/الخفض المتاح في  
 استطاعة التوليد في الحالة الطارئة

إذ:

$VP_m^+ =$  مقدار زيادة الاستطاعة  $P_m^{III}$  المتاح على

التوليد بعد الحالة الطارئة.



الشكل (3) المخطط الصندوقي للخوارزمية المطورة

أعدّ النموذج الرياضي المناسب لتقانة البرمجة الخطية عن طريق تشكيل التابع الهدف والقيود الآتية:

- قيد تغطية الأحمال؛
- قيود استطاعة التوليد للمولدات كلّها؛
- قيد جريان الاستطاعة لكل خط مرهق في الأنماط I و II و III.

بعد حساب جريان الاستطاعة الخطي تبدأ مرحلة حساب تتميز باستراتيجية توليد معدلة تعديلاً أولاً وينجز في هذه المرحلة حساب جريان حمولة خطي جديد للنمط I أو للنمطين II و III، ثم تحليل أحداث محتملة جديدة للنمطين II و III، وقد ينتج عنها ظهور تحميل زائد في خطوط جديدة. يعطي الحل الجديد وفق النمط II استراتيجية توليد جديدة (تشغيل وقائي آمن)، ويمكن متابعة العمليات وفق النمط III التي تقود إلى استراتيجية توليد آمنة ذات كلفة

استراتيجية التوليد II؛

$P_m^{III}$  = الاستطاعة الفعلية المحقونة في القصبان m فوق الإجراء المقترح (استراتيجية التوليد III)؛

$\Delta P_m$  = مقدار تغيير الاستطاعة الفعلية المحقونة في القصبان m (يمثل الانحراف عن التوليد الاقتصادي)؛

$\Delta PR_m$  = هامش التعديل المتاح في الاستطاعة الفعلية على القصبان m (توليد/أحمال)؛

$\Delta V_m$  = قيمة تعديل الاستطاعة على القصبان m (m ≠ ref.)

4- الخوارزمية المطورة والنظام البرمجي المنجز

دُمجت الخوارزمية المقترحة في خوارزمية النظام البرمجي "SECURITY 2 لتحليل الأحداث المحتملة والإجراءات الوقائية"، الذي قمنا بتطويره سابقاً [19] وإضافة خوارزمية حساب جريان الاستطاعة بطريقة Newton-Rap son وتحويل النموذج الرياضي والخوارزمية المطورة إلى نظام برمجي SECURITYIII

إن النظام البرمجي المطور SECURITYIII لا يقوم فقط بتحليل الأحداث المحتملة التي يمكن أن يتعرض لها نظام القدرة الكهربائية من حيث جريان الاستطاعة الفعلية وكشف الخطوط المحملة تحميلاً زائداً واستخدام تقانة البرمجة الخطية لتعديل استراتيجية التوليد وتقنين بعض الأحمال كإجراء تصحيح وقائي لإزالة التحميل الزائد عن الخطوط المرهقة، بل يقترح أيضاً استراتيجية توليد لها مستوى أمان التشغيل الآمن التقليدي نفسه وكلفة التشغيل فيها أقل. وهو يتيح للمستخدم إدخال البيانات وإخراج النتائج بالقيم الواحدة أو بالوحدات النظامية إذا توافرت معلومات الدخل الضرورية.

يبين الشكل (3) المخطط الصندوقي للخوارزمية المطورة، وقد

ميزنا فيها ثلاثة أنواع من الإجراءات التصحيحية:

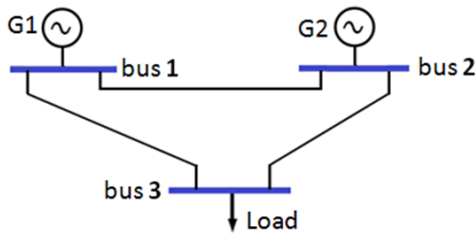
- I- إزالة التحميل الزائد عن الخطوط المرهقة.
- II- وقائية تفترض أعطالاً محتملة.
- III- وقائية تفترض أعطالاً محتملة مع إمكانية تعديل



باستخدام البرنامج المنجز SECURITY III، نُفِّدَت اختبارات عملية حاسوبية على نظم قدرة مختلفة، نعرض منها ما نُفِّدَ على نظامي القدرة 3 bus bar System و 3 و EEE 14-bus Transmission System وعلى جزء من نظام القدرة الكهربائية السورية.

#### 5-1 الاختبارات على 3-bus bar System:

في نظام القدرة 3-bus bar System المبين في الشكل (4) في نظام القدرة 230 kV؛ 50 Hz؛ المؤلف من 3 قضبان تجميع و 3 خطوط نقل يجري التوليد على قضيبي التجميع 1 و 2، نفترض أن استطاعة الأساس 100 MVA وتوتر الأساس 230 kV مع إمكانية تغيير معطيات هبوط التوتر النسبي على الخطوط [21]، وإدخال قيمة عامل الاستطاعة وكلفة التشغيل.



الشكل (4) مخطط الخط الواحد للنظام 3 bus bar System

الجدول (2) بيانات الخطوط

Line	Bus to bus	Series Z	Shunt Y
1	Line 1 - 2	0.007 + j0.040	0 + j0.082
2	Line 1 - 3	0.018 + j0.110	0 + j0.226
3	Line 2 - 3	0.004 + j0.024	0 + j0.049

\* All values in per unit.

الجدول (3) بيانات التوليد و الأحمال [pu]

Bus	P GEN	P LOAD	Pmin	Pmax	Cost (pu)
1	3.70		0.40	4.00	1.0
2	0.00		0.00	3.00	2.0
3		-3.70	-3.70	0.00	

بداية ومرة واحدة فقط، تُعَالَجُ بيانات الشبكة (خطوط/محولات) وتُحَسَبُ المصفوفة  $[B_{px}]$  ومقلوبها  $[X]$  وتُحَسَبُ عوامل حساسية تغير التوليد وعوامل حساسية

تشغيل أقل. يُزَالُ في هذه العمليات التحميل الزائد لأجل الخطوط كلها أو تظهر رسالة تشير إلى عدم إمكانية وجود حل رياضي للمسألة. وفي الحالة الأخيرة يمكن محاولة إيجاد حل عن طريق إجراء بعض التعديلات على قيود التوليد، أو تعديل معطيات هبوط التوتر المسموح وعامل الاستطاعة أو تعديل استطاعة بعض الأحمال غير المهمة.

يتكون البرنامج الحاسوبي المنجز من التتابع الرئيسية المبينة في الجدول (1).

الجدول (1) التتابع الرئيسية في البرنامج المنجز

#### SECURITYIII

اسم التابع	الوظيفة
Bus_Data	إدخال بيانات قضبان التجميع (توليد/أحمال)
Line_Trafo_Data	إدخال بيانات خطوط النقل/المحولات (المحددات، الحد الحراري للاستطاعة المنقولة، هبوط التوتر النسبي)
Input_Data	إدخال: كلفة التوليد؛ هامش تعديل التوليد؛ والأحمال...
Calculate_Bx	حساب عناصر المصفوفة $[B_{px}]$
Calculate_X	حساب مقلوب المصفوفة $[B_{px}]$ ؛ $[X] = [B]^{-1}$
Sens_Generation	حساب عوامل حساسية تعديل التوليد
Sens_LineOutage	حساب عوامل حساسية انقطاع الخطوط
Linear_Flow	حساب جريان الحمولة الخطي
Conting_Analysis	تحليل الأحداث المحتملة
Form_Constraints	تشكيل قيود: الخطوط، المولدات، تغطية الأحمال، والتابع الهدف.
Linear_Program	البرمجة الخطية
Correc_Act_I	إجراء تصحيح جريان الحمولة (استراتيجية التوليد I)
Preventive_Corr_II	إجراء تصحيح وقائي لأجل أحداث محتملة (استراتيجية التوليد II)
Preventive_Eco_III	إجراء تصحيح وقائي لأجل أحداث محتملة - الأقل انحرافاً عن التشغيل الاقتصادي (استراتيجية التوليد III)
NR_Load_Flow	حساب جريان الاستطاعة الكامل بحسب نيوتن-رافسون

#### 5- الاختبارات الحاسوبية Computer Simulation:

ومن ثمَّ فإن نتائج التشغيل الاقتصادي المقترح مبيّنة في الجدول (6) وجريان الاستطاعة الفعلية مبيّنة في الجدول (7).

الجدول (6) التنسيق الاقتصادي للتوليد (pu)

Bus	P GEN	P LOAD	Pmin	Pmax
1	3.2597	-	0.40	4.00
2	0.4403	-	0.00	3.00
3		-3.700	-03.70	0.00

الجدول (7) جريان الاستطاعة وفق استراتيجية التوليد (I)

Line	Bus to bus	P flow (pu)	Flow Limit (pu)
1	Line 1 – 2	2.0000	2.000
2	Line 1 – 3	1.2597	2.000
3	Line 2 – 3	2.4403	3.000

#### 5-1-2 استراتيجية التوليد (II) (إجراء وقائي):

إذا كان المطلوب هو اقتراح إجراء وقائي يضمن أمان نظام القدرة حتى في حال انقطاع أحد الخططين {1,2}، فإن الإجراء الوقائي الأمثل الذي يلبي كلا الاحتمالين يقضي تعديل التوليد وفق ما هو مبين في الجدول (8). من الجدول (8)، يمكن استنتاج أن التشغيل الآمن في هذه الحالة (استراتيجية II) يحتم فصل جزء من حمل القضيب 3 (نسبته 18.92%)؛ انحراف التوليد على قضيب التجميع 1 و2 عن التشغيل الاقتصادي "البحث" بالنسب 34.05% و 15.13%+ (بالنسبة إلى استطاعة التوليد الكلية) على التوالي، أمّا جريان الاستطاعة الفعلية فهو كما في الجدول (9).

الجدول (8) التوليد وفق إجراء وقائي لانقطاع أحد

الخططين: {1,2}

Contingency-Correction for Outage of lines: {1, 2} (pu)

Bus	P GEN	P LOAD	Pmin	Pmax
1	2.000	-	0.40	4.00
2	1.000	-	0.00	3.00
3		-3.00	-3.70	0.00

انقطاع الخطوط، المبيّنة في الشكل (5) والجدولين (4-a) و(4-b).

#### X Matrix for Network: 3 bus; Reference bus: 1

$$\begin{bmatrix} 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.031 & 0.025 \\ 0.000 & 0.025 & 0.040 \end{bmatrix}$$

الشكل (5) عناصر المصفوفة [X]

الجدول (4-a) عوامل حساسية الجريان بسببغير التوليد:

#### Generation Shift Factors for Network: 3 bus; Ref. bus: 1

	Bus1	Bus2	Bus3
Line 1 – 2	0.000	-0.770	-0.632
Line 1 – 3	0.000	-0.230	-0.368
Line 2 – 3	0.000	0.230	-0.632

الجدول (4-b) عوامل حساسية انقطاع الخطوط:

#### Line Outage Distribution Factors Network: 3 bus; Reference bus: 1

	Line (1 – 2) Outage	Line (1 – 3) Outage	Line (2 – 3) Outage
Line 1 – 2		1.00	-1.00
Line 1 – 3	1.00		1.00
Line 2 – 3	-1.00	1.00	

#### 5-1-1 اختبار جريان الاستطاعة وتعديله (استراتيجية التوليد I):

إذا كانت كلفة تشغيل التوليد عند قضيب التجميع 2 أعلى من كلفة تشغيل التوليد عند القضيب 1 يجب أن يكون التشغيل الاقتصادي لوحدات التوليد (مع إهمال ضياعات النقل) كما ورد في الجدول (3)، وتكون نتائج جريان الاستطاعة الفعلية كما في الجدول (5).

الجدول (5) جريان الاستطاعة وفق استراتيجية التوليد (I)

Line	Bus to bus	P flow (pu)	Flow Limit (pu)	
1	Line 1 – 2	2.3391	2.000	overload
2	Line 1 – 3	1.3609	2.000	
3	Line 2 – 3	2.3391	3.000	

غير أن التشغيل السابق لا يلبي شرط حد تحميل الخطوط الستاتيكي أو الحراري (جرى تناوله في [21]، [22]، [23])

على تغيير نقاط تشغيلها بنسب معينة. يبين الجدول (10) تفصيلاً لبيانات دخل الاستراتيجية III.

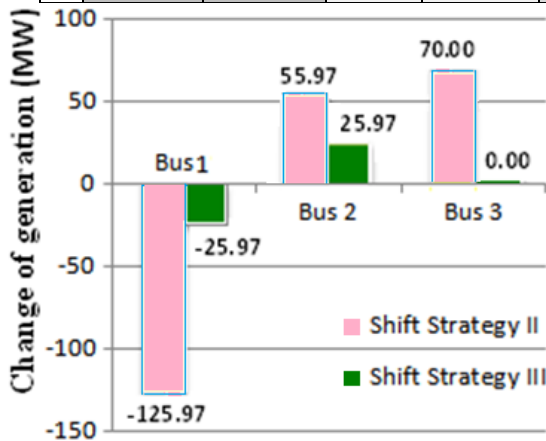
$$\Delta P_m = P_m^I - P_m^{II} \quad \text{إذ:}$$

$$\text{بفرض: } \begin{aligned} \text{DPR } G_m &= 25\% * \text{nominal } P G_m \\ \text{DPR } L_m &= 100\% * P \text{Load}_m \end{aligned}$$

الجدول (10) بيانات دخل النظام 3-bus bar System في استراتيجية التوليد III

Bus No.	Strategy I (pu)		Strategy II (pu)		Shift $\Delta P$ (pu)		Reserve margin (pu)		PG (pu)	
	P GEN	P LOAD	P GEN	P LOAD	GEN	LOAD	DPR G	DPR L	min	max

1	3.2597	-	2.000	-	-1.2597		$\pm 1.00$		0.40	4.00
2	0.4403	-	1.000	-	+0.5597		$\pm 0.75$		0.00	3.00
3		-3.700		-3.000		0.700		-3.70	-3.70	0.00



الشكل (6) انحراف التوليد عن التنسيق الاقتصادي البحث

يمكن أن نستنتج من الجدول (11) ومن الشكلين (6) و(7) أن نسبة انحراف التوليد على كل من قضيبي التجميع 1 و2 عن التشغيل الاقتصادي "البحث" (بالنسبة إلى استطاعة التوليد الكلية) هي فقط  $-7.02\%$  و  $+7.02\%$  على التوالي، دون فصل أي جزء من حمل القضيبي 3. يعمل نظام القدرة وفق هذه الاستراتيجية الوقت كله عدا الحالة الطارئة (انقطاع أحد خطوط النقل المشار إليها) إذ يُعاد إلى حالة التشغيل السابقة (استراتيجية التوليد II).

الجدول (9) جريان الاستطاعة وفق استراتيجية التوليد (II)

Line	Bus to bus	P flow (pu)	Flow Limit (pu)
1	Line 1 - 2	1.1264	2.00
2	Line 1 - 3	0.8736	2.00
3	Line 2 - 3	2.1264	3.00

3-1-5 استراتيجية التوليد III

إن الهدف من الاستراتيجية III المقترحة هو خفض نفقات التوليد باستثمار مقدرة وحدات التوليد (عند حدوث طارئ)

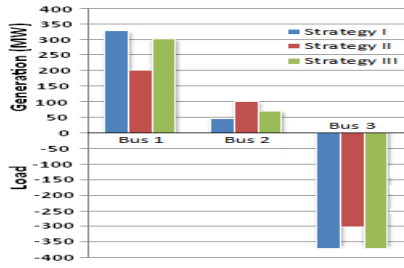
يُبين الجدول (11) استطاعة التوليد والأحمال وفق استراتيجية التوليد III المقترحة، كما يبين الجدول (12) نتائج جريان الاستطاعة الفعلية.

الجدول (11) التوليد والأحمال (استراتيجية التوليد III)

Strategy (III), Contingency-Correction for Outage of lines: {1, 2}					
Bus	P (pu)		Reserve margin (pu)		D P (pu)
	GEN	LOA D	DPR G	DPR L	
1	3.000	-	$\pm 1.00$		-0.2597
2	0.700	-	$\pm 0.75$		+0.2597
3		-3.700		-3.700	+0.0000

الجدول (12) جريان الاستطاعة (استراتيجية التوليد III)

Line	Bus to bus	P flow (pu)	Flow Limit (pu)
1	Line 1 - 2	1.800	2.00
2	Line 1 - 3	1.200	2.00
3	Line 2 - 3	2.500	3.00



الشكل (7) مقارنة استراتيجيات التوليد

بعد اقتراح استراتيجية التوليد، يمكن حساب جريان الاستطاعة الفعلية والرديئة الدقيق وفق طريقة نيوتن-رافسون والحصول على النتائج المبينة في الجدولين (13) و(14).

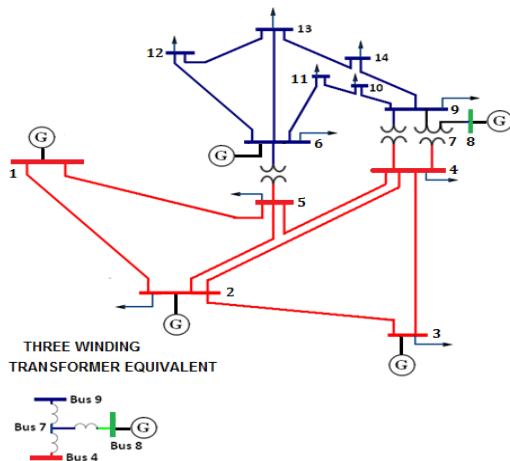
الجدول (13) نتائج جريان الاستطاعة للنظام 3-bus System بحسب طريقة نيوتن-رافسون

Bus No.	Bus Type*	Voltage		Generation (pu)				Load (pu)	
		V (pu)	Pha (deg)	P	Q	Qmin	Qmax	P	Q
1	1	1.0000	0.0000	3.0777	-0.5208	-2.0	2.00		
2	2	1.0000	-4.3411	0.7000	-0.0152	-1.5	1.50		
3	3	1.0000	-7.8922					-3.700	+0.6416

\*الجدول (14) جريان الاستطاعة و الضياعات في 3-bus System

Line No.	Bus to bus	Sending power flow			Receiving power flow			Power loss	
		Active	Reactive		Active	Reactive	Active	Reactive	
1	Line 1 - 2	1.8483	-0.2927	1.8714	-1.8240	0.3499	1.8572	0.0244	0.0572
2	Line 1 - 3	1.2294	-0.2281	1.2504	-1.2020	0.1698	1.2139	0.0274	-0.0583
3	Line 2 - 3	2.524	-0.3652	2.5502	-2.4980	0.4718	2.5422	0.0259	0.1067

\* All values in per unit on 230-kV, 100-MVA base; Total transmission losses: Active =0.077749pu; Reactive =0.222136pu



الشكل (8): مخطط الخط الواحد للنظام IEEE 14-bus Transmission System [24]

## 2-5 نظام النقل IEEE 14-bus Transmission System

كثيراً ما يُستخدم نظام القدرة IEEE 14-bus System كشبكة اختبارية لتحليل جريان الاستطاعة. يتسم جزؤه السفلي بأنه منطقة التوليد في حين جزؤه العلوي منطقة الأحمال. يحتوي هذا النظام على خمس مولدات كما هو مبين في الشكل (8). يُبين الجدولان (15) و (16) بيانات IEEE 14-bus system [24].

الجدول (15) التوترات الاسمية في IEEE 14-bus system

Bus number	Voltage [kV]
1-2-3-3-5	69
6-7-9-10-11-12-13-14	13.8
8	18

الجدول (16): بيانات قصبان التجميع في نظام القدرة [24] IEEE 14-bus

Bus No.	Bus Type*	P Generated(pu)	Q Generated (pu)	P Load(pu)	Q Load(pu)	Q <sub>min</sub> Generated (pu)	Q <sub>max</sub> Generated(pu)
1	1	2.32	0.000	0.000	0.000	-1.00	1.00
2	2	0.40	-0.424	0.217	0.127	-0.40	0.50
3	2	0.00	0.000	0.942	0.190	0.00	0.40
4	3			0.478	0.000		
5	3			0.076	0.016		
6	2	0.00	0.00	0.112	0.075	-0.06	0.24
7	3			0.000	0.000		
8	2	0.00	0.00	0.000	0.000	-0.06	0.24
9	3			0.295	0.166		
10	3			0.090	0.058		
11	3			0.035	0.018		
12	3			0.061	0.016		
13	3			0.135	0.058		
14	3			0.149	0.050		

\*Bus Type: (1) swing bus, (2) generator bus (PV bus), and (3) load bus (PQ bus),  $S_{base} = 100 MVA$

الجدول (18) جريان الاستطاعة الفعلية وفق استراتيجية التوليد I

Line	Bus to bus	P flow [MW]	Flow Limit
1	Line 1 – 2	147.88	150.00
2	Line 1 – 5	71.12	140.00
3	Line 2 – 3	70.05	140.00
4	Line 2 – 4	55.22	140.00
5	Line 2 – 5	40.91	140.00
6	Line 3 – 4	-24.15	140.00
7	Line 4 – 5	-62.32	140.00
8	Line 4 – 7	28.97	31.00
9	Line 4 – 9	16.62	31.00
10	Line 5 – 6	42.11	31.00
11	Line 6 – 11	6.28	-
12	Line 6 – 12	7.97	-
13	Line 6 – 13	16.67	-
14	Line 7 – 8	0.00	-
15	Line 7 – 9	28.97	-
16	Line 9 – 10	6.22	-
17	Line 9 – 14	9.87	-
18	Line 10 – 11	-2.78	-
19	Line 12 – 13	1.87	-
20	Line 13 – 14	5.03	-

2-2-5 استراتيجية التوليد II (إجراء وقائي):

يضمن التشغيل الآمن لنظام القدرة أن انقطاع أحد الخطوط/المحولات (من مجموعة يختارها المشغل) في نظام

1-2-5 تحليل جريان الحمولة وتعديل التوليد (استراتيجية

التوليد I) في IEEE 14-bus System:

يُبين الجدولان (17) و(18) نتائج جريان الاستطاعة الفعلية.

الجدول (17) الاستطاعة الفعلية للتوليد والأحمال في قصبان

التجميع وفق استراتيجية التوليد I

Bus	P GEN [MW]	P LOAD [MW]	min P [MW]	max P [MW]	Cost (pu)
1	219.00	-	40.0	300.00	1.0
2	40.00	-21.70	0.0	200.00	2.0
3	0.00	-94.20	0.0	150.00	3.0
4		-47.80			
5		-7.60			
6	0.00	-11.20	0.0	100.00	4.0
7		-0.00			
8	0.00	-0.00	0.0	80.00	5.0
9		-29.50			
10		-9.00			
11		-3.50			
12		-6.10			
13		-13.50			
14		-14.90			

Cost=299.00 unit

13	Line 6 – 13	19.25	-
14	Line 7 – 8	-6.73	-
15	Line 7 – 9	25.19	-
16	Line 9 – 10	1.12	-
17	Line 9 – 14	6.49	-
18	Line 10 – 11	-7.88	-
19	Line 12 – 13	2.66	-
20	Line 13 – 14	8.41	-

القدرة لن يؤدي إلى زيادة تحميل الخطوط/المحولات الأخرى، فمن أجل انقطاع محتمل لأحد الخطوط/المحولات الآتية: {1, {2, 3, 4, 5, 6, 7, 10} تكون نتائج الإجراء الوقائي للتوليد كما هو مبين في الجدول (19) وجريان الاستطاعة كما في الجدول (20).

الجدول (19) التوليد وفق إجراء وقائي لانقطاع أحد الخطوط: {1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10}

Contingency-Correction for Outage of lines: {1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10}				
Bus	P GEN [MW]	P LOAD [MW]	min P [MW]	max P [MW]
1	140.00	-0.00	40.0	300.00
2	40.00	-21.70	0.0	200.00
3	41.42	-94.20	0.0	150.00
4	-	-47.80		
5	-	-7.60		
6	30.85	-11.20	0.0	100.00
7	-	-0.00		
8	6.73	-0.00	0.0	80.00
9	-	-29.50		
10	-	-9.00		
11	-	-3.50		
12	-	-6.10		
13	-	-13.50		
14	-	-14.90		

Cost=501.31 unit

الجدول (20) جريان الاستطاعة (استراتيجية التوليد II)

Li ne	Bus to bus	Flow [MW]	Flow Limit
1	Line 1 – 2	93.10	140.00
2	Line 1 – 5	46.90	140.00
3	Line 2 – 3	43.37	140.00
4	Line 2 – 4	39.56	140.00
5	Line 2 – 5	28.48	140.00
6	Line 3 – 4	-9.42	140.00
7	Line 4 – 5	-48.04	140.00
8	Line 4 – 7	18.46	31.00
9	Line 4 – 9	11.92	31.00
10	Line 5 – 6	19.74	31.00
11	Line 6 – 11	11.38	-
12	Line 6 – 12	8.76	-

يُقترح في هذه الاستراتيجية تعديل التوليد في قضبان التجميع {1, 3, 6, 8}، أي انحراف التوليد في قضبان التجميع 1 و3 و6 و8 عن التشغيل الاقتصادي (نسبة إلى استطاعة التوليد الكلية) بالنسب الآتية على التوالي: - 30.5%، +16.0%، +11.9%، +2.6% من ثمَّ زيادة كلفة التشغيل الكلية من 299 unit إلى 501.31 unit (بما يتناسب مع كلفة تشغيل كل وحدة وتعديل التوليد فيها).  
2-5- استراتيجية التوليد III (يمكن إعادة جدولة التوليد) إذا كان هامش تعديل التوليد في مثالنا هو 25% من الاستطاعة الاسمية لكل وحدة وأن بيانات دخل استراتيجية التوليد III كما في الجدول (21)، فإن نتائج هذه الاستراتيجية المبينة في الجدولين (22) و(23) استوجبت تعديل التوليد على قضبان التجميع {1, 2, 3, 6} أي انحراف التوليد في قضبان التجميع 1 و2 و3 و6 عن التشغيل الاقتصادي (نسبة إلى استطاعة التوليد الكلية) فقط بالنسب الآتية: -4.36%، +0.58%، +1.51%، +2.26% على التوالي. وتصبح كلفة التشغيل الكلية 325.72unit.

الجدول (21) بيانات دخل استراتيجية التوليد III في النظام IEEE 14-bus System

Bus No.	Strategy I (MW)		Strategy II(MW)		Shift $\Delta P$ (MW)		Reserve margin(MW)		P G (MW)	
	P GEN	P LOAD	P GEN	P LOAD	GEN	LOAD	DPR G	DPR L	min	max
1	219.00	-	140.00	-	-79.00	-	±75.00		40.00	300.00
2	40.00	-21.70	40.00	-21.70	-	0.00	±50.00	-21.70	0.00	200.00
3	0.00	-94.20	41.42	-94.20	+41.42	0.00	±37.50	-94.20	0.00	150.00
4		-47.80	-	-47.80	-	0.00		-47.80		
5		-7.60	-	-7.60	-	0.00		-7.60		
6	0.00	-11.20	30.85	-11.20	+30.85	0.00	±25.00	-11.20	0.00	100.00
7		-0.00	-	-0.00	-	0.00		-0.00		
8	0.00	-0.00	6.73	-0.00	+6.73	0.00	±20.00	-0.00	0.00	80.00
9		-29.50		-29.50	-	0.00		-29.50		
10		-9.00		-9.00	-	0.00		-9.00		
11		-3.50		-3.50	-	0.00		-3.50		
12		-6.10		-6.10	-	0.00		-6.10		
13		-13.50		-13.50	-	0.00		-13.50		
14		-14.90		-14.90	-	0.00		-14.90		

الجدول (22) التوليد والأحمال وفق استراتيجية التوليد III

Strategy (III), Contingency-Correction for Outage of lines: {1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10}					
Bus	Reserve margin				
	P GEN	P LOAD	DPR G	DPR L	D P
1	207.72	-	±75.00		-11.28
2	41.51	-21.70	±50.00	-21.70	+1.51
3	3.92	-94.2	±37.50	-94.2	+3.92
4		-47.8		-47.8	-
5		-7.6		-7.6	-
6	5.85	-11.2	±25.00	-11.2	+5.85
7		-0.00		-0.00	-
8	0.00	-0.00	±20.00	-0.00	+0.00
9		-29.50		-29.50	-
10		-9.00		-9.00	-
11		-3.50		-3.50	-
12		-6.10		-6.10	-
13		-13.50		-13.50	-
14		-14.90		-14.90	-

يدوم الوفر في كلفة التشغيل وفق هذه الاستراتيجية طوال مدة العمل النظامي لنظام القدرة، إذ تعرّض نظام القدرة إلى حالة طارئة تتمثل في فصل أحد الخطوط أو المحولات التي أشير إليها، تُنقل نقاط تشغيل التوليد بشكل آمن لتعمل وفق الاستراتيجية (II) إلى أن تُزال أسباب فصل (الخط/المحولة) ويُعاد وصله.

الجدول (23) جريان الاستطاعة وفق استراتيجية التوليد III

Line	Bus to bus	Flow [MW]	Flow Limit
1	Line 1 – 2	140.00	140.00
2	Line 1 – 5	67.72	140.00
3	Line 2 – 3	67.31	140.00
4	Line 2 – 4	53.28	140.00
5	Line 2 – 5	39.22	140.00
6	Line 3 – 4	-22.97	140.00
7	Line 4 – 5	-61.15	140.00
8	Line 4 – 7	27.75	31.00
9	Line 4 – 9	15.92	31.00
10	Line 5 – 6	38.18	31.00
11	Line 6 – 11	7.43	-
12	Line 6 – 12	8.14	-
13	Line 6 – 13	17.26	-
14	Line 7 – 8	-0.00	-
15	Line 7 – 9	27.75	-
16	Line 9 – 10	5.07	-
17	Line 9 – 14	9.10	-
18	Line 10 – 11	-3.93	-
19	Line 12 – 13	2.04	-
20	Line 13 – 14	5.80	-

يمكن حساب جريان الاستطاعة الفعلية والردية الدقيق وفق نيوتن-رافسون كما في الجدولين (24) و(25).

الجدول (24) نتائج حساب جريان الاستطاعة في نظام القدرة IEEE 14-bus System

Bus No.	Bus Type*	Voltage		Generation				Load	
		V [kV]	Pha. (deg.)	P[MW]	Q[MVAR]	Q min[MW]	Q max[MVAR]	P[MW]	Q[MVAR]
1	1	69.0000	0.0000	221.85	-26.80	-1.00	1.00		
2	2	68.3721	-5.4268	41.51	50.00	-0.40	0.50	21.70	12.70
3	2	66.8127	-13.9144	3.92	40.00	0.00	0.40	94.20	19.00
4	3	66.1917	-11.0886					47.80	0.00
5	3	66.5367	-9.4462					7.60	1.60
6	2	13.2577	-15.6403	5.85	24.00	-0.06	0.24	11.20	7.50
7	3	13.2466	-14.6618					0.00	0.00
8	2	18.0000	-14.6618	0.00	22.75	-0.06	0.24	0.00	0.00
9	3	12.9265	-16.5861					29.50	16.60
10	3	12.8685	-16.7747					9.00	5.80
11	3	13.0065	-16.3653					3.50	1.80
12	3	13.0203	-16.7157					6.10	1.60
13	3	12.9361	-16.8124					13.50	5.80
14	3	12.6491	-17.9539					14.90	5.00



الجدول (25): جريان الاستطاعة والضيعات في IEEE 14-bus System

Line No	Bus to bus	Sending power flow			Receiving power flow			Power loss	
		Active	Reactive		Active	Reactive		Active	Reactive
		MW	MVAR	MVA	MW	MVAR	MVA	MW	MVAR
1	Line 1-2	149.82	-28.78	152.55	-145.33	37.23	150.03	4.48	8.45
2	Line 1-5	72.03	1.98	72.06	-69.22	4.89	69.39	2.81	6.87
3	Line 2-3	71.45	-2.49	71.49	-69.01	8.58	69.54	2.44	6.09
4	Line 2-4	54.02	0.70	54.03	-52.29	0.99	52.30	1.73	1.70
5	Line 2-5	39.67	1.86	39.71	-38.75	-2.30	38.82	0.92	-0.44
6	Line 3-4	-21.27	12.42	24.64	21.74	-14.45	26.10	0.46	-2.03
7	Line 4-5	-60.17	8.21	60.73	60.71	-7.71	61.19	0.54	0.51
8	Line 4-7	27.45	0.59	27.45	-27.45	1.12	27.47	0.00	1.71
9	Line 4-9	15.48	4.65	16.16	-15.48	-3.07	15.78	-0.00	1.58
10	Line 5-6	39.66	3.51	39.81	-39.66	0.78	39.67	-0.00	4.30
11	Line 6-11	8.13	4.95	9.51	-8.03	-4.76	9.33	0.09	0.20
12	Line 6-12	7.95	2.71	8.40	-7.86	-2.51	8.25	0.09	0.20
13	Line 6-13	18.23	8.05	19.93	-17.95	-7.49	19.45	0.28	0.56
14	Line 7-8	-0.00	-21.84	21.84	0.00	22.75	22.75	-0.00	0.91
15	Line 7-9	27.45	20.72	34.39	-27.45	-19.31	33.56	0.00	1.41
16	Line 9-10	4.51	2.93	5.38	-4.50	-2.91	5.35	0.01	0.03
17	Line 9-14	8.92	2.85	9.36	-8.79	-2.58	9.16	0.13	0.27
18	Line 10-11	-4.50	-2.89	5.35	4.53	2.96	5.41	0.03	0.06
19	Line 12-13	1.76	0.91	1.98	-1.75	-0.91	1.97	0.01	0.01
20	Line 13-14	6.20	2.60	6.72	-6.11	-2.42	6.57	0.09	0.18

Total transmission losses: 14.1255MW; 37.4969MVAR

الجدول (26) ملف الدخل لخطوط الشبكة

Line No.	NAME OF LINE			X PU	
	FROM	TO			
1	1	THAWRA	12	HAMA	0.148
2	1	THAWRA	17	ALEPPO-D	0.122
3	1	THAWRA	20	MESKNEH-II	0.068
4	1	THAWRA	22	RAQQA	0.041
5	1	THAWRA	25	FEIROZEH	0.016
6	2	MEHRDEH	12	HAMA	0.007
7	3	BANIAS	13	TARTUS	0.014
8	3	BANIAS	15	LATAKIA	0.039
9	4	QATTENEH	11	QABOUN-II	0.106
10	4	QATTENEH	12	HAMA	0.049
11	4	QATTENEH	13	TARTUS	0.062
12	4	QATTENEH	25	FEIROZEH	0.016
13	5	SWEDIEH	24	HASSAKEH	0.108
14	6	TISHREEN	27	ADRA-II	0.030
15	7	MIDAN-II	8	SH-MESKN	0.057
16	7	MIDAN-II	11	QABOUN-II	0.011
17	7	MIDAN-II	27	ADRA-II	0.027
18	8	SH-MESKN	9	IRBED	0.043
19	10	QABOUN-I	11	QABOUN-II	0.002
20	11	QABOUN-II	27	ADRA-II	0.029
21	12	HAMA	17	ALEPPO-D	0.091
22	12	HAMA	25	FEIROZEH	0.044
23	12	HAMA	26	SAEHER	0.002
24	13	TARTUS	14	LEBANON	0.003
25	15	LATAKIA	16	IDLEP	0.086
26	16	IDLEP	17	ALEPPO-D	0.041
27	17	ALEPPO-D	18	ALEPPO-F	0.013
28	18	ALEPPO-F	19	ALEPPO-B	0.011
29	18	ALEPPO-F	20	MESKNEH-II	0.077
30	20	MESKNEH-II	21	MESKNEH-I	0.001
31	22	RAQQA	23	DEIRZOR	0.114
32	22	RAQQA	24	HASSAKEH	0.134
33	23	DEIRZOR	24	HASSAKEH	0.104
34	25	FEIROZEH	27	ADRA-II	0.104

مع أن IEEE 14-bus Transmission System لا يُعد مثلاً نموذجياً لتطبيق جريان الحمل الخاطي، كون النسبة  $X/R$  تتراوح بين 2 و3، فإن نتائج جريان الاستطاعة الفعلية في الجدولين (23) و(25) متقاربة. علماً أن الدقة تزداد بازدياد النسبة  $X/R$ ، وهذا محقق في شبكات النقل (توتر عالٍ). على سبيل المثال، إن النسبة  $X/R$  في خطوط شبكتي النقل الكهربائية السورية 230 kV و 400 kV هي 5.36 و 12.64 على التوالي.

3-5- تحليل الأمان واقتراح الإجراءات الوقائية على جزء من الشبكة الكهربائية السورية توتر 230 kV:

يتألف الجزء المدروس من الشبكة من 27 قضيب تجميع (6 Bus) توليد و 21 Bus (أحماًلاً) و 34 خطأ [25]، علماً أن النظام البرمجي المنجز صالح لتحليل الأمان الشامل واقتراح استراتيجيات التوليد لأي نظام قدرة توافرت بياناته، يُبين الجدولان (26) و(27) ملفي الدخل للخطوط وقضبان التجميع.

الجدول (27) ملف الدخل لقضبان التجميع

Bus Data for Network syr1					
S Base = 100 MVA					
Name	Bus	P GEN	P LOAD	min P	max P
THAWRA	1	550.0		200.0	700.0
MEHRDEH	2	300.0		180.0	400.0
BANIAS	3	300.0		100.0	400.0
QATTENEH	4	60.0		40.0	100.0
SWEDIEH	5	80.0		50.0	100.0
TISHREEN	6	300.0		200.0	400.0
MIDAN-II	7		-90.0		
SH-MESKN	8		-90.0		
IRBED	9		-50.0		
QABOUN-I	10		-90.0		
QABOUN-II	11		-90.0		
HAMA	12		-110.0		
TARTUS	13		-100.0		
LEBANON	14		-70.0		
LATAKIA	15		-120.0		
IDLEP	16		-70.0		
ALEPPO-D	17		-90.0		
ALEPPO-F	18		-80.0		
ALEPPO-B	19		-90.0		
MESKNEH-II	20		-30.0		
MASKNEH-I	21		-30.0		
RAQQA	22		-70.0		
DEIRZOR	23		-70.0		
HASSAKEH	24		-70.0		
FEIROZEH	25		-20.0		
SAEHER	26		-20.0		
ADRA-II	27		-100.0		

نظراً إلى عدم توافر بيانات كلفة التشغيل الحقيقية لمحطات التوليد أو حتى الفروقات النسبية في كلفة تشغيلها، سيكون هدف هذا الاختبار هو أن تكون استراتيجية التوليد المقترحة هي الأقل انحرافاً عن التشغيل الأصلي base case. أجري تحليل الأمان وصُممت الإجراءات التصحيحية الوقائية لأجل قيم مختلفة لهبوط التوتر المسموح وعامل الاستطاعة ولاقطاعات خطوط مختلفة.

1-3-5 تحليل جريان الحمولة (استراتيجية التوليد I)

الجدول (28) استراتيجية التوليد II للشبكة syr1

RESULT OF CORRECTION ACTION II					
Number of Line Flow Constraints = 2					
Gen. No.	Initial (MW)	Strategy II(MW)	Shift ΔP(MW)	P G (MW)	
	P GEN	P GEN	GEN	min	max
1	550.00	372.34	-177.66	200.00	700.00
2	300.00	300.00	0.00	180.00	400.00
3	300.00	400.00	100.00	100.00	400.00
4	60.00	79.88	19.88	40.00	100.00
5	80.00	80.00	0.00	50.00	100.00
6	300.00	357.77	57.77	200.00	400.00

يُلاحظ من الجدول (28) ما يأتي: يجب خفض استطاعة التوليد من المحطات بانياس وقطينة وتشرين بمقدار 100 MW، 19.88 MW، 177.66MW وزيادة استطاعة التوليد في محطة الثورة بمقدار 57.77 MW وأن مجموع

عند هبوط توتر مسموح به 10 % وعامل استطاعة 0.85

نلاحظ كما هو مبين في الشكل (9) الآتي:

فصل خط الثورة-حلب D، لا يؤدي إلى زيادة تحميل أي خط؛

فصل خط حماه - حلب D، يؤدي إلى زيادة تحميل خط

الثورة-حلب D؛

فصل فيروزة - عدا II، يؤدي إلى زيادة تحميل خط قطينة-

قايون II.

Network Name: syr 1

Permissible Voltage Drop = 10%

Power Factor = 0.85

Overloaded lines for line outages

Line No. Flow (MW) Limit (MW)

Line 2 is opened

Line 21 is opened

2 152.17 132.26 Overloaded by 15.1%

Line 34 is opened

9 210.00 187.50 Overloaded by 12.0%

Contingency-Correction for Outage of lines:

2 21 34

الشكل (9) الخطوط المحملة بشكل زائد عند فصل أحد الخطوط:

{2, 21, 34}

2-3-5 استراتيجية التوليد II (إجراء وقائي)

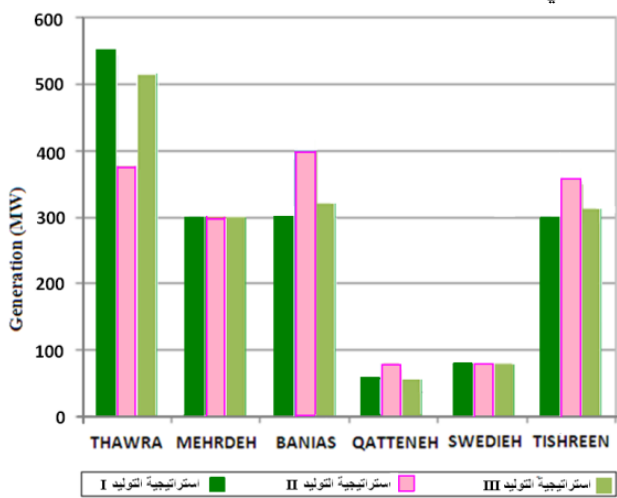
الإجراء الوقائي المقترح هو تعديل التوليد في أربع محطات

هي: (الثورة، بانياس، قطينة، تشرين)، كما هو مبين في

الجدول (28).

الانحراف في استطاعة التوليد وفق الاستراتيجية II عن التوزيع الاقتصادي البحت يساوي [MW] 355.31 أي 22.35% من استطاعة التوليد الكلية.

نظراً إلى أنّ عمل نظام القدرة وفق الاستراتيجية III المقترحة يستمر الوقت كلّه عدا الحالة الطارئة (انقطاع أحد خطوط النقل المشار إليها) التي لو حدثت، أُعيد التوليد إلى حالة التشغيل السابقة (استراتيجية التوليد II)، لذا يتحقق خفض كبير في نفقات التشغيل.



الشكل (10) نتائج إستراتيجيات التوليد

الانحراف في استطاعة التوليد يساوي [MW] 355.31 أي 22.35% من استطاعة التوليد الكلية. يبيّن الجدول (29) جريان

الاستطاعة وفق استراتيجية التوليد II

الجدول (29) جريان الاستطاعة وفق إستراتيجية التوليد II

Line No	from	to	Flow [MW]	Flow limit
1	1	12	-3.81	109.02
2	1	17	82.93	132.26
3	1	20	112.20	237.29
4	1	22	130.00	359.00
5	1	25	51.02	359.00
6	2	12	299.99	359.00
7	3	13	202.50	359.00
8	3	15	197.50	359.00
9	4	11	97.17	187.50
10	4	12	-17.48	329.30
11	4	13	-32.50	260.25
12	4	25	32.69	359.00
13	5	24	80.80	149.40
14	6	27	357.77	359.00
15	7	8	140.00	283.08
16	7	11	-56.83	359.00
17	7	27	-173.17	359.00
18	8	9	50.00	359.00
19	10	11	-90.00	359.00
20	11	27	-139.67	359.00
21	12	17	117.37	177.32
22	12	25	31.35	359.00
23	12	26	20.00	359.00
24	13	14	69.99	359.00
25	15	16	77.50	187.62
26	16	17	7.50	359.00
27	17	18	117.80	359.00
28	18	19	90.00	359.00
29	18	20	-52.20	209.55
30	20	21	30.00	359.00
31	22	23	43.52	141.54
32	22	24	16.48	120.42
33	23	24	-26.48	155.15
34	25	27	55.06	155.15

3-3-5 إستراتيجية التوليد III (يمكن إعادة جدولة التوليد)

يبيّن الجدول (30) والشكل (10) نتائج استراتيجيات التوليد، ومنها استراتيجية التوليد III. أمّا جريان الاستطاعة فهو مبيّن في الجدول (31). تُلحظ من الجدول (30) أنه يجب خفض استطاعة التوليد في محطة الثورة بمقدار 35.60 MW فقط وزيادة استطاعة التوليد في المحطات بانياس وقطينة وتشرين فقط بمقدار 23.17 MW، 0.00 MW، 12.43 MW على التوالي.

بإجراء مقارنة بين استراتيجيتي التوليد III و II، يُلحظ أن مجموع الانحراف في استطاعة التوليد وفق الاستراتيجية III عن التوزيع الاقتصادي "البحت" يساوي [MW] 71.20 أي 4.48% من استطاعة التوليد الكلية، في حين كان مجموع

الجدول (30) نتائج استراتيجيات التوليد للشبكة syr1

Generator	P GEN (MW)				Reserve margin(MW)		P G (MW)	
	Strategy I	Strategy II	Strategy III	Shift ΔP	-DPR G	+DPR G	min	max
1	550.00	372.34	514.40	-35.60	-165.00	+165.00	200.0	700.0
2	300.00	300.00	300.00	0.00	-75.00	+75.00	180.0	400.0
3	300.00	400.00	323.17	23.17	-78.00	+76.83	100.0	400.0
4	60.00	79.88	60.00	-0.00	-21.00	+21.00	40.0	100.0
5	80.00	80.00	80.00	0.00	-20.00	+20.00	50.0	100.0
6	300.00	357.77	312.43	12.34	-48.00	+48.00	200.0	400.0

- نُجِّمَت الخوارزمية المقترحة في خوارزمية النظام البرامجي "SECURITY 2" لتحليل الأحداث المحتملة والإجراءات الوقائية"، كما أُضِيقت خوارزمية Newton-Raphson لحساب توترات العقد وجريان الاستطاعة الفعلية والريية والضياعات في خطوط النقل.
- حُوِّلَت الخوارزمية المطورة إلى نظام برامجي SECURITY III بلغة ++C، تم التثبيت من فعاليته من خلال تطبيقه على عدد من الأنظمة القياسية وأظهرت النتائج كفاءته العالية من حيث المرونة ودقة النتائج. ومن ميزاته أنه قابل للتعديل والتطوير.
- يتيح النظام البرامجي للمشغل ترتيب أفضلية تشغيل وحدات التوليد بشكل انتقائي (بحسب معيار يختاره المشغل مثل: كلفة التشغيل، وتقنين التوليد في بعض مصادر الطاقة بهدف مواجهة حالات الطوارئ أو زيادة الطلب وقت الذروة، اختيار الأحمال التي يُسمح أو لا يُسمح بفصل أي جزء منها، الخ).

- يُعد النظام البرامجي SECURITY III شكلاً مطوراً للنظام البرامجي "SECURITY 2"، ومن ثمَّ يمكن استثماره في تحليل الأمان بشكل آلي أو انتقائي لأحداث محتملة حيث يُسمى الخطوط المحملة تحميلاً زائداً مع إظهار نسبة الزيادة في التحميل، مما يعطي المشغل فكرة مسبقة عن وضع نظام القدرة في حالة العطل قبل حدوثه فعلاً.

الجدول (31) جريان الاستطاعة وفق استراتيجية التوليد III

Line flow after correction actions				
Line No	from	to	Flow [MW]	Flow limit
1	1	12	8.77	109.02
2	1	17	98.36	132.26
3	1	20	124.11	237.29
4	1	22	130.00	359.00
5	1	25	153.16	359.00
6	2	12	299.99	359.00
7	3	13	153.25	359.00
8	3	15	169.92	359.00
9	4	11	113.21	187.50
10	4	12	-34.96	329.30
11	4	13	16.75	260.25
12	4	25	-34.00	359.00
13	5	24	80.00	149.40
14	6	27	312.43	359.00
15	7	8	140.00	283.08
16	7	11	-63.78	359.00
17	7	27	-166.22	359.00
18	8	9	50.00	359.00
19	10	11	-90.00	359.00
20	11	27	-130.57	359.00
21	12	17	117.61	177.32
22	12	25	26.20	359.00
23	12	26	20.00	359.00
24	13	14	69.99	359.00
25	15	16	-49.92	187.62
26	16	17	-20.08	359.00
27	17	18	105.89	359.00
28	18	19	90.00	359.00
29	18	20	-64.11	209.55
30	20	21	30.00	359.00
31	22	23	-43.52	141.54
32	22	24	16.48	120.42
33	23	24	-26.48	155.15
34	25	27	84.36	155.15

#### 6-النتائج:

- طُوِّرَ نموذج رياضي وخوارزمية يمكن من خلالها اقتراح استراتيجية التوليد الأمان الأقل انحرافاً عن التشغيل الاقتصادي البحت، يُستثمر فيها مقدرة (capability) بعض وحدات التوليد في نظام القدرة على تعديل التوليد عقب حدوث اضطراب ما، ومن ثمَّ فإن نفقات التشغيل وفق الاستراتيجية المقترحة هي الأقل مقارنة بالتشغيل الأمان التقليدي، ولها مستوى الأمان نفسه.

- |     |  |                 |
|-----|--|-----------------|
| 13. | PEREIRA, M.; PINTO, L.; CUNHA, S.; Oliveira, G. <i>A Decomposition Approach to Automated Generation /Transmission Expansion Planning</i> . IEEE Trans. on Power App. and Systems, Vol. PAS-104, No. 11, 1985, 3074-3083.                           |                 |
| 14. | Ramesh, K.; Jose, N. E. <i>Survey on Optimal Power Flow under Security Constraints</i> . International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol. 3, No. 1, 2013, 526-535.  |                 |
| 15. | ZHANG, X. P.; REHTANZ, C.; PAL, B. "Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control". Springer Verlag: Berlin, Germany 2006, 383.  |                 |
| 16. | XIAO, Y.; SONG, Y. H.; SUN, Y. Z. <i>Power Flow Control Approach to Power Systems with Embedded FACTS Devices</i> . IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 17, No. 4, 2002, 943-950.   |                 |
| 17. | ORFANOIANNI, T.; BACHER, R. <i>Steady-State Optimization in Power Systems with Series FACTS Devices</i> . IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 18, No. 1, 2003, 19-26.   |                 |
| 18. | CHUNG, C. Y. <i>Generation Rescheduling Methods to Improve Power Transfer Capability Constrained by Small-Signal Stability</i> . IEEE Trans. on power system, Vol. 19. No. 1, 2004, 524-530.   |                 |
| 19. | حمزة، علي؛ الفقيه، نبيل <i>نظام برامجي 2 ECURITY</i> لتحليل الأحداث المحتملة وتصميم الإجراءات الوقائية لضمان تشغيل آمن لنظم القدرة الكهربائية. مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية، المجلد 17، العدد الأول، 2001، 107-87.                              |                 |
| 20. | WOOD, A.; WOLLENBERG, B. F. <i>Power Generation, Operation, and Control</i> . 2 <sup>nd</sup> . ed., John Wiley & Sons, 2012, 569.   |                 |
| 21. | حمزة، علي؛ الفقيه، نبيل <i>تصميم وتنفيذ نظام برامجي SECURITY 1</i> لتحليل أمان نظم القدرة الكهربائية باستخدام النماذج الخطية. مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية، المجلد 15، العدد الثاني، 1999، 120-93.  |                 |
| 22. | SAADAT, H. <i>Power System Analysis</i> . 2 <sup>nd</sup> . ed., McGraw-Hill, New York, 2004, 712.   |                 |
|     |  | <b>المراجع:</b> |
| 1.  | MORISON, K.; WANG, L.; KUNDUR, P. <i>Power System Security Assessment</i> . IEEE Power & Energy Magazine, Sept./Oct. 2004, 30-39.  |                 |
| 2.  | ANDERSSON, G. <i>Modelling and Analysis of Electric Power Systems</i> . Lecture 227-0526-00, ITET ETH Zürich September 2008.   |                 |
| 3.  | MONTICELLI, A.; PEREIRA, M. V.F.; Granville, S. <i>Security constrained optimal power flow with post contingency corrective rescheduling</i> . IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 2, No. 1, 1987, 175-181.   |                 |
| 4.  | KIRSCHEN, D.S.; VAN MEETEREN, H. P. <i>MW/Voltage control in a linear programming based optimal power flow</i> . IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 3, No. 2, 1988, 481-489.   |                 |
| 5.  | SUN, D. I. <i>Optimal Power flow by Newton approach</i> . IEEE Trans. on Power App. and Systems, Vol. PAS-103, 1984, 2864-2880. 2012, 512.   |                 |
| 6.  | EFE, S. B.; CEBECI, M. <i>Power flow analysis by Artificial Neural Network</i> . International Journal of Energy and Power Engineering, Vol. 2, No. 6, 2013, 204-208.  |                 |
| 7.  | ETSO - European Association of Electricity Transmission System Operators. <i>Reconciliation of market splitting with coordinated auction concepts</i> . Discussion Paper, Feb. 2002, <a href="http://www.etsa-net.org">http://www.etsa-net.org</a> |                 |
| 8.  | KNIGHT, U.G. <i>Power Systems in Emergencies: From Contingency Planning to Crisis Management</i> . 1 <sup>st</sup> . ed., John Wiley & Sons, 2001, 392.  |                 |
| 9.  | DECKMANN, S.; PIZZOLANTE, A. C.; MONTICELLI, A. J.; STOTT, B.; ALSAC, O. <i>Numerical testing of power system load flow equivalents</i> . IEEE Trans. on Power App. and Systems, Vol. 6, 1999, 2292-2300.  |                 |
| 10. | NASAR, S. A.; TRUTT, F. C. <i>Electric power systems</i> . CRC Press, USA, 1999, 306.  |                 |
| 11. | XIN Ma; YONG Liu. <i>Economic Dispatch Considering Ancillary Service Based on Revised Particle Swarm Optimization Algorithm</i> . ICIC 2010, LNCS 6215, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010, 175-184.   |                 |
| 12. | YALI, W.; LIQING, X.; XUE, J. <i>Improve Multiobjective Particle Swarm Optimization for Environment/ Economic Dispatch Problem in Power System</i> . ICIC 2011, LNCS 6729, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011, 49-56.                          |                 |

23	LAURIA, D.; MAZZANTI, G.; QUAIÀ, S. <i>Comparison between single-circuit overhead transmission lines based on line costs and loadability</i> . Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2012 International Symposium on , 20-22 June 2012, 877-882.
24	<i>Power flow data of the IEEE 14 bus system.:</i> <a href="http://www.ee.washington.edu/research/pstca/">http://www.ee.washington.edu/research/pstca/</a>
25	بيانات وزارة الكهرباء 2009*.