

نظام برامجي مرئي لتحليل الأحداث المحتملة، واقتراح الإجراءات الوقائية لتحقيق تشغيل آمن لنظم القدرة الكهربائية

د. نبيل الفقيه⁽¹⁾ د. أسامة بحبوح⁽²⁾

الملخص

تم في هذا البحث تطوير هام للنظام البرامجي SECURITYII لتحليل الأحداث المحتملة، وتصميم الإجراءات الوقائية لضمان تشغيل آمن لنظم القدرة الكهربائية، الذي كان قد نشر في مجلة جامعة دمشق. النظام البرامجي المرئي الجديد يقوم بوظائف البرنامج السابق كلها، فضلاً عن مجموعة من الخيارات والدراسات والمقارنات. كما يتميز بأسلوب رسومي لإدخال بيانات الشبكة الكهربائية ومطابق لمعايير هندسة البرمجيات، مع دراسة تحليلية باعتماد منهجية معتمدة هي لغة النمذجة الموحدة (UML) Unified Modeling Language. وقد اختير النموذج البرمجي اللولبي خلال البحث، ما أتاح الحصول على منتج برامجي موثوق به يتصف بأعلى المعايير الممكنة. طبق البرنامج على مجموعة من الشبكات العملية الاختبارية، كما استخدم لتحليل الأمان لجزء من الشبكة السورية لتوتر 230 kV، وتم التثبت من فعالية البرنامج ومرونته ودقة نتائجه.

الكلمات المفتاحية: أمان نظام القدرة، إعادة جدولة التوليد، تحليل الأحداث المحتملة، إجراء وقائي، لغة النمذجة الموحدة.

(1) أستاذ في قسم هندسة الطاقة الكهربائية- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة دمشق.

(2) قسم هندسة الحواسيب والأتمتة- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة دمشق.

A Visual Software System for Contingency Analysis and Proposing Preventive Actions to Achieve Secure Operation of Electric Power Systems

Dr. Eng. Nabil Fakih⁽¹⁾ and Dr. Eng. Ousama Bahbouh⁽²⁾

Abstract

In this paper, an important development in the SECURITY II software system, published earlier in the Journal of Damascus University, was achieved to analyze potential events and create preventive actions in order to ensure secure operation of electrical power systems. This new visual program system performs all functions of the previous program as well as a range of options, studies and comparisons. It also uses a graphical interface approach to insert in the power system data and complies it with the software engineering standards, as well as with analytical method which is based on approved language methodology, Unified Modeling Language (UML). In this research, a spiral model software was selected, which allowed getting reliable software product with the highest possible standards. The program was applied on a set of test standard networks and also used to analyze the security of a part of the Syrian Network for 230 kV. The effectiveness, flexibility of the program, and the accuracy of its results were all verified.

Keywords: Power System Security, Generation Rescheduling, Potential Events Analysis, Preventive Action, Unified Modeling Language.

⁽¹⁾ Professor, Department of Electrical Power System, Faculty of Mechanical & Electrical Engineering- Damascus University.

⁽²⁾ Department Automation and Computer Engineering, Faculty of Mechanical & Electrical Engineering- Damascus University.

المقدمة Introduction

تُعدُّ نظم القدرة الكهربائية الحديثة، شبكات معقدة من المولدات التزامنية وخطوط النقل الكهربائية والأحمال^[1]. ومع تنامي حجم هذه النظم، وتعقيد شروط تشغيلها، برزت حاجة ملحة لحل مسألة تشغيلها بالشكل الأمثل، بهدف رفع أمان نظام القدرة Power System Security، وتكيفية لمواجهة الأحداث الطارئة، التي تعدُّ مصدر قلق كبيراً لمشغل نظام القدرة^[2] ومخططه. يتطلب حل هذه المسألة إيجاد نموذج رياضي يصف نظام القدرة، ومن ثم تحليله للحصول على المحددات المطلوبة. يزداد تعقيد المسألة بزيادة عدد محدداتها، ودقة النتائج المرجوة، ما يعني زيادة الكلفة الزمنية، وهو أمر غير مرغوب فيه، خاصة عندما يطلب من مشغل النظام إيجاد الحل الأمثل لمسألة التشغيل لحظة حدوث طارئ ما، بغية الاستمرار بتزويد المستهلكين بالقدرة الكهربائية ضمن الحدود التشغيلية الممكنة.

لتخفيض زمن الحساب، كان لا بدّ من نقل النموذج الرياضي إلى برنامج حاسوبي مرئي Visual Program، يقوم بجميع ما يحتاجه المشغل Operator، من تحليل للأحداث المحتملة، وتحديد مقدرة وحدات التوليد، وحسابات أخرى عدّة، ضماناً لجودة الخدمة من الناحية الاقتصادية والفنية، وبما يحقق أمان (أمن) نظام القدرة الكهربائية، ويُعدُّ ذلك تطويراً لمجموعة من الأبحاث السابقة. ففي عام 1999 أنجز أول برنامج حاسوبي يعمل تحت بيئة DOS من قبل الباحثين ع. حمزة و ن. الفقيه لتحليل أمان نظم القدرة الكهربائية باستخدام النماذج الخطية^[3]. بعد ذلك طوّر الباحثان عام 2001 البرنامج، بإضافة تقانة البرمجة الخطية لتعديل استراتيجيات التوليد، وتقنين بعض الأحمال كإجراء وقائي لإزالة التحميل الزائد عن الخطوط المرهقة^[4]. أمّا اقتراح استراتيجية التوليد الأقل كلفة في التشغيل وبمستوى أمان التشغيل الآمن التقليدي نفسه فقد أنجز من

قبل الباحثن. الفقيه في عام 2015^[5]. وكمتابعة لهذا العمل، صمّم ونفّذ برنامج حاسوبي مرئي، باستخدام بيئة MATLAB ذات الإمكانيات الكبيرة في مجالات هندسية عدّة، منها نمذجة الأنظمة^[6] ومحاكاتها، ووفق المعايير المعتمدة في هندسة البرمجيات، من تحليل وتصميم للنظام، لتتبعه مرحلة التنفيذ بكتابة النص البرمجي، ومن ثم مرحلة الاختبار وهي من أصعب المراحل وأدقها لتعلقها بضمان أمن نظام القدرة^[7] وموثوقيته. تم برمجياً في هذا البحث اعتماد النموذج اللولبي ومنهجية لغة النمذجة الموحدة Unified Modeling Language (UML)، ما أتاح الحصول على منتج برمجي بمواصفات قياسية وموثوقية عالية. كما أضيف العديد من الخوارزميات والخيارات الجديدة. فمن ناحية إدخال البيانات، أصبح رسوماً سهلاً جداً، وبواجهات تخاطبية بسيطة. كما أضيفت خوارزمية إيجاد الحل الأمثل للتوليد وتقنين الأحمال الى حالة انقطاع خط واحد من مجموعة خطوط مختارة. وأصبح بالإمكان تحديد الخط الأكثر خطورة في الشبكة عند انقطاعه، ومحاكاة الخطوط جميعها وبشكل رسومي وإخراج أنيق، مع كتابة البيانات كلّها على الواجهة. مع وجود خيارات للمستخدم لتحديد أهمية الأحمال، فضلاً عن كلفة تغيير التوليد على كل مولد في الشبكة. وقد طبّقت الدراسة على شبكات اختبارية عدّة، مع التثبت من نتائج المحاكاة.

حالات تشغيل نظام القدرة Power System Operation States

في عام 1967 أنشأ T.E. DyLiacco الإطار النظري الذي عرّف حالات تشغيل Operating States نظام القدرة^{[8],[9]} وتلاه Fink, L.H. and Carlsen. عام 1978 في الإطار نفسه^[10]. كانت هذه التعاريف هي الدافع الأساس لدراسة سلوك نظام القدرة، الذي تحكمه

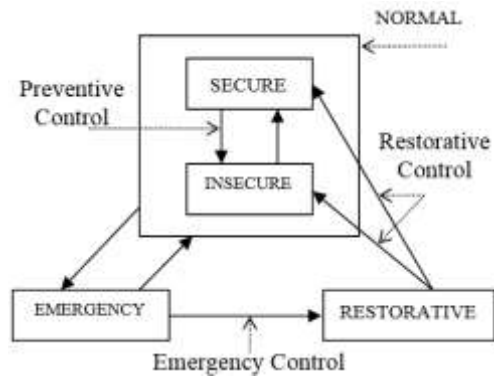
ويؤدي التحكم المركزي دوراً مهماً في نقل نظام القدرة إلى حالة التشغيل النظامية^[13].

نمذجة نظام القدرة Power System Modeling, Simulation and Simulation

مع ازدياد تعقيد النظم الهندسية وزيادة متطلبات أدائها أصبحت المحاكاة الحاسوبية الحل الوحيد أمام مهندسي التصميم لدراسة تصاميمهم قبل اعتمادها أو الشروع بينها، وعلى الرغم من المزايا العظيمة للمحاكاة الحاسوبية فإن لها ولا شك محدودية، إذ تكون الإجابات التي نحصل عليها من عملية المحاكاة محدودة بمقدرتنا على نمذجة الظواهر الفيزيائية بشكل صحيح، ومن ثم الحصول على توصيف رياضي دقيق للنظام متضمناً محدداته جميعها، والشروط المؤثرة فيه^[6].

يعتمد البحث لإيجاد النموذج الرياضي على تقنيتي جريان الحمولة الخطي، وعوامل التحسس لأهم الأحداث التي يمكن أن يتعرض لها نظام القدرة، وبصرف النظر عن عدد قضبان التجميع Bus bars ومستويات توتراتها، وذلك كخطوة أولى، قبل كتابة خوارزمية تحليل الأحداث المحتملة، بحيث يمكن تقويم أمان أي نظام قدرة كهربائية، والانتقال نحو تصميم نظام برامجي مرني متكامل. تبين أن الكتب والدوريات التي تتناول مسألة الأمان لم تنتشر أية برامج يمكن اقتباسها والاعتماد عليها، لذلك ربما يكون برنامج المحاكاة المرئي المنجز هو الأول من نوعه في القطر، لدراسة أمان نظام القدرة وتحليله وتقديره، لاتخاذ القرار المناسب لحالتي جدولة التوليد أو جدولة التوليد وتقنين الأحمال، مع تميزه بإدخال البيانات بطرائق عدة كالطريقة الرسومية التخطيئية ذات المرونة في إدخال البيانات وإخراجها وتخزينها وتعديلها بمواصفات قياسية معتمدة في هندسة البرمجيات من دون الحاجة إلى خبرات

مجموعة من المعادلات التفاضلية والجبرية غير الخطية^[11]. توصف حالات التشغيل التي يمكن أن يمر بها نظام القدرة كما في الشكل (1)، إذ يستند هذا التصنيف إلى هيكلية DyLiacco التي تفترض أن تشغيل نظام القدرة يجري تحت نوعين من القيود Constraints، هي قيود الحمل، وقيود التشغيل^[12].



الشكل (1) تقييم أمن نظام القدرة والتحكم به

نميز بين أربع حالات تشغيل مختلفة هي:

أ- الحالة النظامية Normal State:

هي الحالة المرغوب فيها المحققة لقيود التحميل والتشغيل في أثناء العمل.

ب- حالة الإنذار Alert State:

يستمر عمل نظام القدرة ضمن الحدود المسموحة في هذه الحالة، لكنه فاقد للهوامش التي كانت موجودة في حالة التشغيل النظامية.

ت- حالة الطوارئ Emergency State:

تنشأ عند حدوث اضطرابات إضافية، والنظام موجود في حالة إنذار، ما يعني تجاوز قيود التشغيل.

ث- الحالة القصوى Extreme State:

في هذه الحالة لا تتحقق قيود التحميل لعدم وجود استطاعة كافية لتزويد الأحمال، وينخفض التردد، وغالباً ما يكون هناك حاجة لفصل أحمال من أجل تأمين النظام،

على خبرة مهندسي مركز التنسيق في وزارة الكهرباء وتقديرهم. كما أنّ البرمجيات العالمية المستخدمة في تحليل نظم القدرة الكهربائية مثل (PSS/E, PSA, WASP, NEPLAN, ETAP, SINCAL) ذات تكلفة عالية (PSS/E نحو \$ 100000 لكل مستخدم) وهي غير متوافرة جميعها، وما وجد منها فهو نسخة قديمة غير مستثمرة تقريباً، ويتطلب العمل عليها اتباع دورة خاصة. فضلاً عن ذلك، لا يمكن إجراء أي تعديل على وظائف هذه البرمجيات، أو التعرف الى الرموز المصدرية Source Code لها، ما يحتم ضرورة الارتباط الدائم بالشركات الأجنبية.

بالنظر إلى الواقع المحلي، يتبين لنا أهمية تطوير نماذج رياضية متكاملة، وخوارزميات برمجية، تصاغ كبرنامج مرئي محلي لمحاكاة نظم القدرة الكهربائية واقتراح إجراءات التشغيل المثلى، متجاوزاً سلبيات البرمجيات الأجنبية وتمتعاً بالميزات الآتية:

- 1- برنامج محاكاة بواجهات تخطيبية رسومية، سهل التعامل وبمواصفات قياسية.
- 2- المرونة في إدخال البيانات وإخراجها وتخزينها وتعديلها باستخدام الطريقة الرسومية أو الجداول.
- 3- حساب جريان الحمولة في الحالة المستقرة.
- 4- تحليل الأحداث المحتملة التي يتعرض لها نظام القدرة.
- 5- يُستثمر في تحليل أمان نظام القدرة بشكل آلي أو انتقائي لأحداث محتملة، حيث يُسمى الخطوط المرهقة، مع إظهار النسب المئوية.
- 6- يتيح للمشغل ترتيب أفضلية تشغيل وحدات التوليد بشكل انتقائي حسب معيار يختاره المشغل.
- 7- إمكانية تعديل معمارية نظام القدرة بحذف أو إضافة عناصر، كخطوط النقل وقضبان التجميع.

فنية خاصة، أو طريقة الإدخال وفق جداول مولدة في البرنامج.

أهمية البحث

يقتضي التخطيط التشغيلي Operating Planning لنظم القدرة الكهربائية تصميم برامج تحقق تشغيلاً مقبولاً من الناحية الاقتصادية والفنية^[3]. فضلاً عن دراسة تعرض نظام القدرة الكهربائية لأحداث كانقطاع خط، أو انقطاع توليد أو كليهما^[4].

هدف البحث إلى تطوير نماذج رياضية وخوارزميات برمجية ونكاملها، لحل مسائل تحليل نظام القدرة الكهربائية، بحساب جريان الحمولة في الحالة المستقرة. وتحليل الأحداث المحتملة التي يتعرض لها نظام القدرة، وكشف عناصر نظام القدرة المحملة تحميلاً زائداً وبيان نسبة التحميل، ما يُعطي المشغل صورة مسبقة عن وضع نظام القدرة في حالة الأعطال قبل حدوثها فعلاً، واقتراح الإجراءات التصحيحية التي تخفف من حالات التحميل الزائد في الخطوط في حالات الطوارئ، وتقويم أمان نظام القدرة، ومن ثمّ التوصل محلياً إلى نظام برامجي متكامل يجمع بين ما تمّ التوصل إليه في بحوث سابقة^[3]، ^[4]، ^[13] في نظام برامجي واحد يمتاز بمرونة استخدام ومتطلبات مادية منخفضة. وهذا ما يعطي مجموعة من الآثار الإيجابية كخفض الضياعات الكهربائية، وزيادة أمان نظام القدرة الكهربائية السورية وموثوقيته. مع إمكانية استخدام البرنامج المنجز في عمليات محاكاة نظام القدرة الكهربائية من قبل طلاب الدراسات العليا والمختصين. ولا شك في أهمية الحصول على منتج وطني محلي، قابل للتعديل والتطوير محلياً وفق متطلبات الجهة المستثمرة، والافادة ممّا توصل إليه العلم الحديث في هذا المجال. فدراسة مبدئية لما هو مطبق محلياً في تحليل نظام القدرة الكهربائية السورية^[14]، يتبين أنّ الاعتماد الأكبر يكون

$$P_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} = \sum_{j=1}^n b_{ij}(\theta_i - \theta_j) \quad (2)$$

نفرض قضيباً مرجعياً Reference Bus اختيارياً له $\theta_r = 0$. نكتب المعادلة (2) بشكل مصفوفاتي:

$$\tilde{P} = [B]\tilde{\theta} \Rightarrow \tilde{\theta} = [X]\tilde{P} \quad (3)$$

حيث:

$$B_{ii} = \begin{cases} \sum_{j=1}^n \frac{1}{x_{ij}} & : i \neq ref \\ 0 & : i = ref \end{cases} \quad (4)$$

ب- عوامل التحسس Sensitivity Factors:

يجب أن نتوقع في كل لحظة تعرض نظام القدرة الكهربائية إلى أعطال قد تؤدي إلى خروج خط أو أكثر من الخدمة، أو فصل منوبة أو أكثر عن الشبكة استجابة لنظام الحماية. يقتضي أمان نظام القدرة تزويد مركز التنسيق بصورة مستمرة ومسبقة بمعلومات عن الانقطاعات التي تسبب حمولات زائدة Overloads على الخطوط، وهذا يتطلب تحليل عدد كبير من الانقطاعات، ووضع النتائج تحت تصرف مركز التنسيق بالسرعة القصوى. إن العامل الحاسم في اختيار طريقة التحليل هو السرعة في إيجاد الحل بتقريب مقبول. لذا فقد شاع استخدام طرائق عوامل التحسس التي تستند إلى جريان الحمولة الخطي. تعطي هذه العوامل التغير في الاستطاعة المنقولة على الخطوط لأجل تغير في التوليد، أو تغير في هيكلية الشبكة. يوجد أنواع عدّة لهذه العوامل، منها: عوامل التحسس لتغير التوليد وعوامل التحسس لانقطاع الخطوط^[5].

ت- الحمل الأعظمي لخط النقل

:Maximum Loading of a transmission line

يقتضي تقدير أمان الشبكة الكهربائية اكتشاف خطوط النقل المرهقة، وهذا يستدعي حساب الاستطاعة العظمى التي يستطيع الخط نقلها. يوجد معياران مستخدمان لهذه

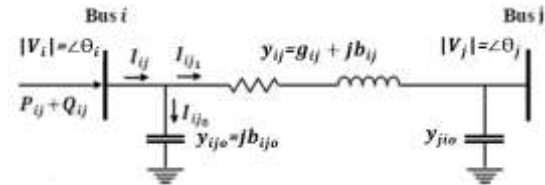
8- البحث عن الحمول المثلى لبعض محددات نظام القدرة.

النموذج الرياضي Mathematical Model

يتألف النموذج الرياضي من المعادلات الرياضية الممثلة لنظام القدرة، ومسألة جريان الحمولة الخطي، وعوامل التحسس لانقطاع خط (أو محول)، أو توقف محطة توليد، ومسألة التحميل الأعظمي لخطوط النقل. وذلك تمهيداً لتصميم الخوارزمية الملائمة وبنائها لإجراء التحليل الوقائي لأمان نظام القدرة.

أ- جريان الحمولة الخطي Linear Load Flow:

تستند هذه الطريقة إلى حساب جريان الاستطاعة الفعلية في فروع الشبكة بدلالة المفاعلات الطولية للفروع x_{ij} (خطوط ومحوّلات)، وزوايا الطور لعقد الشبكة θ_i ، والاستطاعات الفعلية المحقونة P_i في هذه العقد. لاستخراج معادلات جريان الحمولة، نعتمد تمثيل π لخط نقل يصل بين قضيبتي التجميع i و j ، كما هو مبين في الشكل (2).



الشكل (2) تمثيل π لخط نقل يصل بين قضيبتي تجميع

بإهمال مقاومة الخط الطولية (المقاومة التفرعية مهملة دوماً)، ويفرض بعض التقريبات الرياضية^[15]، نحصل على الاستطاعة الفعلية المنتقلة من قضيب التجميع i إلى قضيب التجميع j :

$$P_{ij} = b_{ij}(\theta_i - \theta_j) = \frac{1}{x_{ij}}(\theta_i - \theta_j) \quad (1)$$

تكون الاستطاعة المحقونة في قضيب التجميع i مساوية لمجموع الاستطاعات المحقونة في الخطوط المتصلة بقضيب التجميع i التي يساوي عددها n :

يساوي دوماً مجموع استطاعات الأحمال (بإهمال الضياعات):

$$\sum_{m=1}^n P_m^{new} = \sum_{m=1}^n P_m^{old} = P_{load} \quad (11)$$

إن المجموع الجبري لتغيرات الاستطاعة المحقونة في عقد الشبكة يجب أن يساوي الصفر:

$$\sum_{m=1}^n (\Delta P_m^+ - \Delta P_m^-) = 0 \quad (12)$$

(3) قيد تعديل استطاعة التوليد Generation Shift Constraint: يمكن أن يقدم كل مولد استطاعة m بحيث:

$$P_m^{min} \leq P_m \leq P_m^{max} \quad (13)$$

ولما كانت متحولات القرار الملائمة للبرمجة هي ΔP_m^+ و ΔP_m^- وليست P_m ، يصبح قيد المعادلة (13) بالشكل:

$$0 \leq \Delta P_m^+ \leq P_m^{max} - P_m^{old} \quad (14)$$

$$0 \leq \Delta P_m^- \leq P_m^{old} - P_m^{min} \quad (15)$$

اذ m تأخذ القيم من 1 إلى n .

ج- صياغة تابع الهدف Objective Function:

بفرض أن استراتيجية التوليد قبل حدوث العطل تحقق التنسيق الاقتصادي للتوليد، عندها يجب أن يكون الانحراف عن التنسيق الاقتصادي للتوليد أقل ما يمكن، أي أنّ التعديل في استطاعة التوليد أصغرياً، ومن ثمّ يكون تابع الهدف:

$$\text{Minimize} \sum_{m=1}^n C_m (\Delta P_m^+ + \Delta P_m^-) \quad (16)$$

اذ: C_m كلفة penalty انحراف التوليد عن التشغيل الاقتصادي. علماً أن قيد جريان الخط معطى بالمعادلتين

المسألة، هما الحد الحراري للخط، وحد الاستقرار الساكن^[3].

ث- صياغة قيود التنسيق الاقتصادي الآمن:

يعطى الجريان الجديد للاستطاعة على الخط ij بعد تغير التوليد في قضيب التجميع m بالعلاقة:

$$P_{ij}^{new} = P_{ij}^{old} + g_{ij,m} * \Delta P_m \quad (5)$$

أما عند تغير التوليد في جميع قضبان التجميع فتصبح العلاقة كما يأتي:

$$P_{ij}^{new} = P_{ij}^{old} + \sum_{m=1}^n g_{ij,m} * \Delta P_m \quad (6)$$

(1) قيد جريان الخط Line Flow Constraint:

يجب أن يكون الجريان الجديد دوماً أقل من جريان أعظمي p_{ij}^{max} (يمكن أن يكون p_{ij}^{max} الحد الحراري لخط النقل أو حد الاستقرار الساكن، أيهما أقل) وفق العلاقة:

$$-p_{ij}^{max} \leq P_{ij}^{new} \leq p_{ij}^{max} \quad (7)$$

من العلاقة (6)، وبالفصل إلى متراجحتين نجد:

$$\sum_{m=1}^n g_{ij,m} * \Delta P_m \leq p_{ij}^{max} - P_{ij}^{old} \quad (8)$$

$$\sum_{m=1}^n g_{ij,m} * \Delta P_m \geq -p_{ij}^{max} - P_{ij}^{old} \quad (9)$$

نعتمد التغير في الاستطاعة ΔP_m كمتحولات قرار في البرمجة الخطية. ولما كانت طريقة simplex تتعامل فقط مع متحولات موجبة، نفرض أن مقدار رفع الاستطاعة P_m على القضيب m هو ΔP_m^+ ، ومقدار خفض الاستطاعة P_m على القضيب m هو ΔP_m^- فيكون:

$$\Delta P_m = \Delta P_m^+ - \Delta P_m^- \quad (10)$$

(2) قيد تغطية الأحمال Loads Covering

Constraint: إن مجموع استطاعات التوليد يجب أن

(8, 9)، وقيد تغطية الأحمال بالمعادلة (12)، وقيد تعديل التوليد بالمعادلتين (14, 15).

الدراسة التحليلية للنظام System

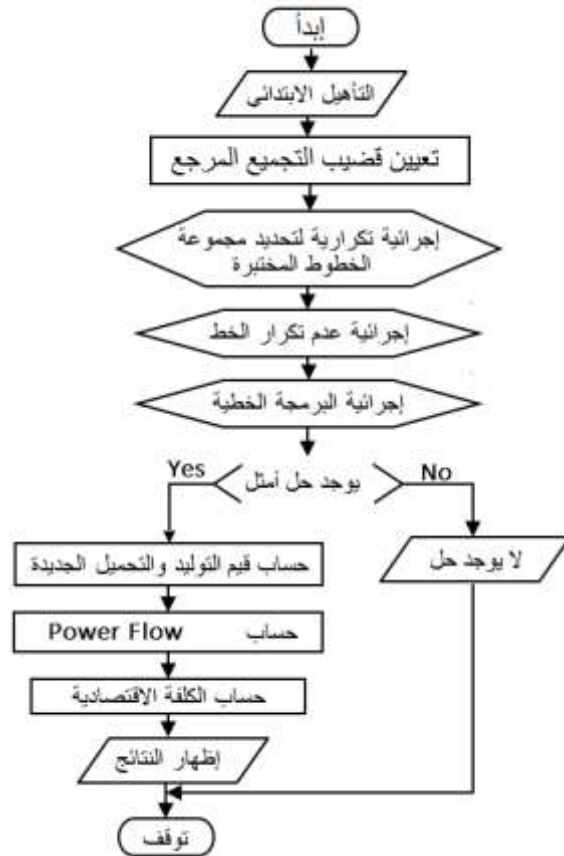
:Analysis

تتطلب كتابة برنامج بإمكانيات عالية وتخصصية كثيراً من الجهد. لا يقتصر الجهد المبذول على وقت كتابة الترميز المصدري، بل يتعداه إلى المراحل اللاحقة التي تستدعي تطوير البرنامج أو تعديله بما يناسب المتطلبات الجديدة للمستخدمين. من المعلوم أن تعديل برنامج ما أو تطويره، يتطلب جهداً كبيراً حتى لو قام بذلك المبرمج نفسه، فكيف اذا طلبت الشركة المستثمرة للبرنامج طلبت من جهات مبرمجة أخرى القيام بالتطوير؟ هذه الإشكالية، فضلاً عن احتمال فقدان الترميز المصدري، حفزت المهتمين للبحث عن حل مناسب، نتج عنه علم هندسة البرمجيات، الذي يهدف إلى تقليل الفجوة بين المستخدم والمطور، بإيجاد لغة متكاملة بين مهندسي البرمجيات، تُوحد الرموز بينهم وفق منهجية محددة.

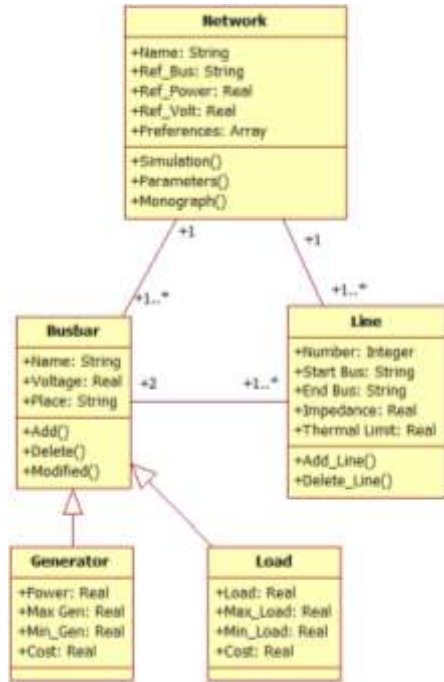
:Programming Method المنهجية البرمجية

يفيد وجود لغة مشتركة في تمثيل النظام بلغة دقيقة تفسر تفسيراً واحداً. كما تقدم وسيلة رمزية مبسطة تبين مدى فهمنا للمشروع، وتعبّر عن مختلف نماذج العمل البرمجي. برزت في منتصف التسعينيات ثلاث منهجيات بدأت تتقارب لكي تكون الأقوى بين المنهجيات جميعها. بعد ذلك دمجت هذه المنهجيات بما يسمى لغة النمذجة الموحدة (UML)، فأضحت اللغة المعتمدة لترميز العمليات البرمجية [16]. تفيد UML في إعادة صياغة البرنامج من قبل أي شخص. فهي لغة نمذجة رسومية عامة للتعبير عن منتجات التطوير البرمجي، بتقديم صيغة لوصف العناصر الرئيسة للنظم.

ونظراً إلى العدد الكبير من الخوارزميات، اكتفينا بعرض خوارزمية إيجاد الحل الأمثل عند انقطاع أي خط من مجموعة خطوط مختارة. يبين الشكل (3) المخطط التدفقي للخوارزمية التي تبدأ بقيام المستخدم بالنقر بواسطة الفأرة على الخطوط المرغوب فيها، ليقوم البرنامج بإيجاد الحل الأمثل الذي لا يتسبب عنده انقطاع أي خط من الخطوط المختارة بتحميل زائد لباقي خطوط/محولات الشبكة.



الشكل (3) خوارزمية إيجاد الحل الأمثل عند انقطاع أي خط من مجموعة خطوط مختارة



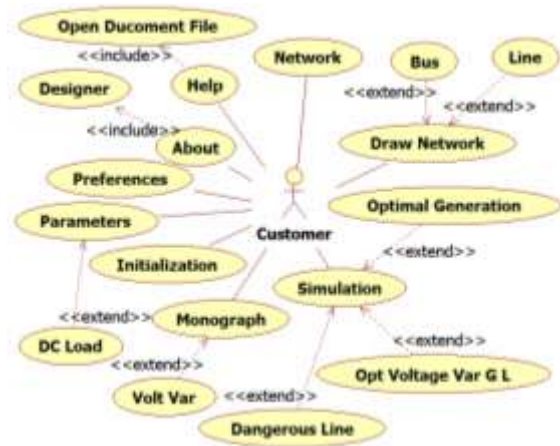
الشكل (5) مخطط الأصناف للبرنامج

النموذج البرمجي Programming Model:

تمر عملية بناء أي منتج بمراحل عدّة يطلق عليها اسم دورة الحياة ^[17] Life Cycle. تتضمن دورة حياة تطوير أي منتج برمجي عدداً من المراحل هي تحديد المتطلبات وتعريفها، ومن ثم تصميم النظام والبرنامج، وبعد ذلك كتابة البرنامج، ليتم في النهاية اختبار وحدات البرنامج والنظام، ليصار إلى تسليمه وإجراء الصيانة الأخيرة عليه. قد تأخذ دورة الحياة أنماطاً أو نماذج عدّة مثل: النموذج الانحداري Waterfall Model، والنموذج اللولبي Spiral Model، ونموذج إطار العمل التكراري Iterative Model. بعد مقارنة هذه النماذج البرمجية المشهورة اخترنا لهذا البحث النموذج اللولبي للأسباب الآتية:

1- يقسم المشروع وفق النموذج اللولبي إلى سلسلة من الدورات الحياتية القصيرة، وكل دورة تنتهي بإصدار برنامج قابل للتنفيذ، وهذا ما يدعم العمل ويجزئ المشكلة إلى مشكلات بسيطة سهلة الحل.

وقد أفدنا في بحثنا من علم هندسة البرمجيات، ولاسيماً لغة النمذجة الموحدة UML في رسم مخطط حالات الاستخدام Use Case Diagram، الذي يُعدّ الخطوة الأولى في تصميم البرمجيات المتقدمة القياسية وكتابتها، فهو تعبير عن سلوك النظام المرئي من الخارج والقابل للاختبار، كما هو مبين في الشكل (4).



الشكل (4) مخطط حالات الاستخدام للبرنامج

كما رسم مخطط الأصناف Class Diagram، الذي يعبر عن تركيب النظام المرئي، كما هو مبين في الشكل (5)، وقد استخدم برنامج StarUML-5.0 في عملية الرسم.

(3) DrawNetwork: تتضمن الأوامر المستخدمة في رسم عناصر الشبكة الكهربائية.

(4) Simulation: تتضمن هذه القائمة الأوامر المستخدمة في محاكاة شبكة القدرة الكهربائية، كانقطاع خط، أو تغيير توليد، أو انقطاع الخط الأكثر خطورة في الشبكة، أو المحاكاة العامة للخطوط جميعها، أو الحل الأمثل بتغيير التوليد، أو بتغيير التوليد وتقنين الأحمال، أو الحل الأمثل لحالة انقطاع الخطوط، أو الحل الأمثل لأدنى هبوط توتر، مع إظهار الكلفة الاقتصادية لكل خيار.

(5) Monograph: تتضمن هذه القائمة الأوامر المستخدمة في دراسة أثر تغير بعض محددات شبكة القدرة الكهربائية، كتغير هبوط التوتر أو عامل الاستطاعة على الحل الأمثل بتغيير التوليد، أو بتغيير التوليد وتقنين الأحمال.

(6) Parameters: تتضمن هذه القائمة نتائج وحسابات محددات الشبكة المختلفة، كالمصفوفة B، والمصفوفة X، ومصفوفة عوامل التحسس لتغير التوليد، ومصفوفة عوامل التحسس لانقطاع خط، وإيجاد جريان الاستطاعة في خطوط الشبكة جميعها، مع نسبة التحميل، والخطوط المرهقة.

كما يوجد العديد من الخيارات الأخرى كإجراء الحسابات بالقيم الواحدة، أو المطلقة.

الاختبارات الحاسوبية Simulation Test:

باستخدام البرنامج المنجز، نفذت اختبارات حاسوبية عدة على نظم قدرة قياسية، نعرض فيما يأتي بعض نتائج المحاكاة على شبكتي قدرة مختلفتين.

الاختبارات على نظام 5-Bus bar System:

يبين الشكل (7) نظام قدرة 5-Bus bar System مرسوماً باستخدام البرنامج المنجز. نفترض أن توتر

2- يستطيع فريق العمل أن يعمل على الدورة الحياتية كلها (تحليل، وتصميم، وتنفيذ، واختبار) بدلاً من صرف وقت طويل على نشاط واحد.

3- الحصول على ملاحظات وتقييم المستخدم والمقيم مبكراً بصورة منتظمة، ورصد الصعوبات المحتملة قبل التماذي بعيداً في عمليات التطوير.

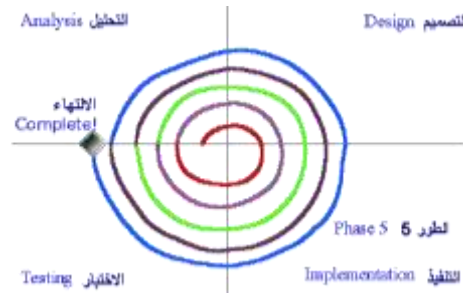
4- التصدي لنقاط المخاطرة مقدماً، وبالأخص التكرارات ذات المجازفة العالية التي يمكن تطويرها أولاً.

5- اكتشاف مدى حجم العمل وتعقيده مبكراً.

6- الإصدار المنتظم للبرنامج يعزز من الثقة.

7- يمكن تقييم الوضع الحالي للمشروع بتقدير نسبة الإنجاز بدقة أكبر.

يبين الشكل (6) النموذج اللولبي المستخدم في البحث [17]:



الشكل (6) النموذج اللولبي

قوائم البرنامج Program Menu:

يتضمن برنامج المحاكاة المنجز مجموعة من القوائم لتنفيذ العمليات المطلوبة كلها، نستعرض بإيجاز بعض هذه القوائم:

(1) Network: تتضمن خيارات عدة لإنشاء شبكة

جديدة بشكل رسومي، أو الإدخال عبر جداول.

(2) Edit: تمكننا من تغيير معمارية الشبكة كحذف

قضيبي تجميع، أو خط نقل.

(1) إيجاد المصفوفات وبعض العوامل: بحساب المصفوفة B، ثم المصفوفة X، وحساب عوامل تحسس تغير التوليد، نحصل على الجداول (3) و(4) و(5) و(6) المبينة.

الجدول (3) مصفوفة B لنظام 5-Bus bar

	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0
2	0	51	-16	0	-25
3	0	-16	36	0	-20
4	0	0	0	32.5000	-12.5000
5	0	-25	-20	-12.5000	57.5000

الجدول (4) مصفوفة X لنظام 5-Bus bar

	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0
2	0	0.0615	0.0551	0.0193	0.0501
3	0	0.0551	0.0847	0.0224	0.0583
4	0	0.0193	0.0224	0.0404	0.0250
5	0	0.0501	0.0583	0.0250	0.0649

الجدول (5) عوامل تحسس تغير التوليد لنظام 5-Bus bar

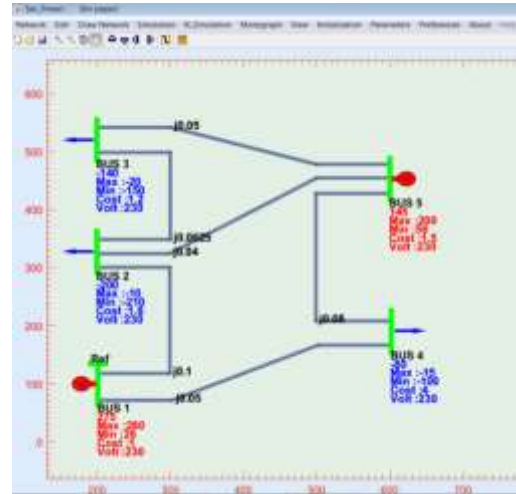
	BUS (BUS 1)	BUS (BUS 2)	BUS (BUS 3)	BUS (BUS 4)	BUS (BUS 5)
Line (BUS 1)→(BUS 2)	0	-0.6147	-0.5515	-0.1927	-0.5009
Line (BUS 1)→(BUS 4)	0	-0.3853	-0.4485	-0.8073	-0.4991
Line (BUS 2)→(BUS 3)	0	0.1011	-0.4725	-0.0505	-0.1314
Line (BUS 3)→(BUS 5)	0	0.2843	-0.0790	-0.1421	-0.3696
Line (BUS 3)→(BUS 4)	0	0.1011	0.5275	-0.0505	-0.1314
Line (BUS 4)→(BUS 5)	0	-0.3853	-0.4485	0.1927	-0.4991

الجدول (6) عوامل تحسس انقطاع الخطوط

	Line (BUS 1)→(BUS 2)	Line (BUS 1)→(BUS 4)	Line (BUS 2)→(BUS 3)	Line (BUS 3)→(BUS 4)	Line (BUS 3)→(BUS 5)	Line (BUS 4)→(BUS 5)
Line (BUS 1)→(BUS 2)	1.0000	-0.1481	-0.2265	-0.1481	0.0000	0.0000
Line (BUS 1)→(BUS 4)	0.0000	1.0000	0.1481	0.3265	0.1481	-1.0000
Line (BUS 2)→(BUS 3)	-0.2623	0.2623	1.0000	0.6715	-0.0808	0.2623
Line (BUS 3)→(BUS 4)	-0.2327	0.2327	0.8016	1.0000	0.8016	0.2327
Line (BUS 3)→(BUS 5)	-0.2623	0.2623	-0.0808	0.6715	1.0000	0.2623
Line (BUS 4)→(BUS 5)	0.0000	-0.0000	0.1481	0.3265	0.1481	1.0000

(2) دراسة جريان الاستطاعة: بفرض أن محددات تشغيل الشبكة المدروسة كانت اقتصادية، وحدث تغير جديد بالتوليد أو التحميل، فإن دراسة جريان الاستطاعة تبين أن خط النقل الأول أصبح محملاً بشكل زائد بنسبة %7.5505 فوق حد الاستقرار الساكن، كما هو مبين في الجدول (7)، ومن ثمّ فالتشغيل الاقتصادي السابق لا يلي شروط عمل شبكة القدرة الكهربائية.

الأساس 230 kV، واستطاعة الأساس 100 MVA، والتردد 50 Hz، وهبوط التوتر النسبي 7%، وعامل الاستطاعة 0.85، والقضيب المرجعي هو 1 BUS. كما أنّ بيانات الشبكة معطاة بالجدولين (1) و(2).



الشكل (7) نظام 5-Bus bar System باستخدام البرنامج المنجز

الجدول (1) بيانات التوليد والأحمال

Bus	P Gen [pu]	P Load [pu]	Pmax [pu]	Pmin [pu]	Cost [pu]
1	2.75		2.80	0.26	1.0
2		-2.00	-0.10	-2.10	1.6
3		-1.40	-0.20	-1.50	1.2
4		-0.80	-0.15	-1.00	4.0
5	1.45		2.00	0.56	1.5

الجدول (2) بيانات خطوط

Line	Bus to Bus	Impedance [pu]	S _{th} [pu]
1	1 to 2	j 0.1000	3.0515
2	1 to 4	j 0.0500	3.0515
3	2 to 3	j 0.0625	3.0515
4	2 to 5	j 0.0400	3.0515
5	3 to 5	j 0.0500	3.0515
6	4 to 5	j 0.0800	3.0515

الجدول (9) الحل الأمثل بتغيير التوليد وتقنين الأحمال لنظام 5-Bus bar

Line (Bus 1--Bus 2)	Power Flow	Stat. Limit	SB	Percent Loaded	Overloaded	New Power Flow
Line (Bus 1--Bus 2)	142.9154	132.8821	305.1500	107.5505	107.5505	132.8821
Line (Bus 1--Bus 4)	132.0846	265.7842	305.1500	49.6999	0	129.7845
Line (Bus 2--Bus 3)	30.9206	212.6114	305.1500	14.5470	0	32.5785
Line (Bus 2--Bus 5)	-88.0133	332.2053	305.1500	28.8426	0	-83.3730
Line (Bus 3--Bus 5)	-109.0714	265.7842	305.1500	41.0407	0	-107.4215
Line (Bus 4--Bus 5)	52.0846	166.1026	305.1500	31.3569	0	45.7945
Old Value	275	-200	-140	-80	145	
New Value	254.8715	165.6285	-140.0000	-80.0000	145.0000	

3) دراسة انقطاع الخطوط: بدراسة أثر انقطاع الخطوط بفرض قيم التوليد الأخيرة، نجد أن الخط الأخطر هو الخط الثاني، إذ يسبب انقطاعه تحميلاً زائداً على الخط الأول بمقدار نحو 92% زيادة على الحد المسموح. كما أن انقطاع أي خط يسبب تحميلاً زائداً على الشبكة، ما عدا الخط الثالث فإن انقطاعه لا يسبب أي تحميل زائد. كما أن أقل الخطوط خطورة هو الخط الأول إذ يسبب انقطاعه تحميلاً زائداً على الخط السادس نحو 5% فقط زيادة على الحد المسموح.

بمحاكاة انقطاع الخطوط جميعها بشكل مفرد نجد أن البرنامج يعطي في حالة تغيير التوليد وتقنين الأحمال حلاً أمثلياً لهذه الشبكة دوماً.

كما تم إيجاد الحل الأمثل لحالة انقطاع أحد الخطوط من مجموعة خطوط مختارة، إذ لا يحدث تحميل زائد بانقطاع أي خط من المجموعة المختارة، وفيما يأتي بعض النتائج في الجدول (10).

الجدول (10) الكلفة التقريبية للحل الأمثل من أجل انقطاع الخطوط لنظام 5-Bus bar

مجموعة الخطوط المختارة	الكلفة التقريبية	مجموعة الخطوط المختارة	الكلفة التقريبية
{1, 6}	84	{2, 3}	244
{1, 2, 3, 4, 5, 6}	244	{2, 4}	244
		{2, 5}	244
			18

الجدول (7) جريان الاستطاعة لنظام 5-Bus bar

Line (Bus 1--Bus 2)	Power Flow	Stat. Limit	SB	Percent Loaded	Overloaded
Line (Bus 1--Bus 2)	142.9154	132.8821	305.1500	107.5505	7.5505
Line (Bus 1--Bus 4)	132.0846	265.7842	305.1500	49.6999	0
Line (Bus 2--Bus 3)	30.9206	212.6114	305.1500	14.5470	0
Line (Bus 2--Bus 5)	-88.0133	332.2053	305.1500	28.8426	0
Line (Bus 3--Bus 5)	-109.0714	265.7842	305.1500	41.0407	0
Line (Bus 4--Bus 5)	52.0846	166.1026	305.1500	31.3569	0

باختيار أمر إيجاد الحل الأمثل بتغيير التوليد فقط، نحصل على النتائج المبينة في الجدول (8)، مع كلفة اقتصادية تساوي $Cost = 40.057$ unit. إذ نستنتج أنه بتخفيض التوليد على قضيب التجميع الأول بمقدار 20.0285 MVA، وزيادة قيمة التوليد على قضيب التجميع الخامس بالمقدار نفسه، نحصل على جريان استطاعة وفق الشروط المطلوبة، وهو الحل الأقل كلفة، إذ يكون جريان الاستطاعة على الخط الأول في حده الأعظمي.

الجدول (8) الحل الأمثل بتغيير التوليد فقط لنظام 5-Bus bar

Line (Bus 1--Bus 2)	Power Flow	Stat. Limit	SB	Percent Loaded	Overloaded	New Power Flow
Line (Bus 1--Bus 2)	142.9154	132.8821	305.1500	107.5505	107.5505	132.8821
Line (Bus 1--Bus 4)	132.0846	265.7842	305.1500	49.6999	0	132.0846
Line (Bus 2--Bus 3)	30.9206	212.6114	305.1500	14.5470	0	28.3909
Line (Bus 2--Bus 5)	-88.0133	332.2053	305.1500	28.8426	0	-85.4148
Line (Bus 3--Bus 5)	-109.0714	265.7842	305.1500	41.0407	0	-111.7031
Line (Bus 4--Bus 5)	52.0846	166.1026	305.1500	31.3569	0	42.0094
Old Value	275	145				
New Value	254.8715	165.6285				

أما عند الضرورة الملحة فيمكن فصل بعض الأحمال وفق أولويات محددة باختيار أمر إيجاد الحل الأمثل بتغيير التوليد وتقنين الأحمال، لنحصل على النتائج المبينة في الجدول (9)، مع كلفة اقتصادية تساوي $Cost = 32.6467$ unit. إذ يمكن الاستنتاج أنه بتغيير التوليد وتقنين الأحمال نحصل على جريان استطاعة وفق الشروط المطلوبة، وبكلفة أقل من حالة تغيير التوليد فقط، ففضاء البحث عن الحل في حالة تغيير التوليد فقط، هو جزء من فضاء البحث في حالة تغيير التوليد وتقنين الأحمال.

كما يبيّن الجدول (12) أرقام خطوط الشبكة المدروسة.
الجدول (12) أرقام خطوط الشبكة المدروسة

رقم الخط	اسم الخط
.1	Hama to Al_Thawra
.2	Al_Thawra to Aleppo D
.3	Al_Thawra to Maskaneh II
.4	Al_Thawra to Raqqa
.5	Al_Thawra to Ferouzeh
.6	Hama to Mehrdeh
.7	Banias to Tartous
.8	Banias to Latakia
.9	Qatteneh to Qaboun II
.10	Qatteneh to Hama
.11	Qatteneh to Tartous
.12	Qatteneh to Ferouzeh
.13	Swedieh to Hassakeh
.14	Adra to Tishreen
.15	Midan II to Shmeskin
.16	Midan II to Qaboun II
.17	Midan II to Adra II
.18	Irbed to Shmeskin
.19	Qaboun I to Qaboun II
.20	Qaboun II to Adra II
.21	Hama to Aleppo D
.22	Hama to Ferouzeh
.23	Hama to Sehr
.24	Tartous to Lebanon
.25	Idlep to Latakia
.26	Idlep to Aleppo D
.27	Aleppo D to Aleppo F
.28	Aleppo F to Aleppo B
.29	Aleppo F to Maskaneh II
.30	Maskaneh I to Maskaneh II
.31	Raqqqa to Deirzor
.32	Raqqqa to Hassakeh
.33	Deirzor to Hassakeh
.34	Adra II to Ferouzeh

(1) دراسة جريان الاستطاعة: بفرض الشبكة المعطاة اقتصادية، فإنّ دراسة جريان الاستطاعة تبيّن عدم وجود أي زيادة في التحميل على أي خط كما يُلاحظ أنّ خط النقل Mehrdeh to Hama وخط النقل Tishreen to Adra II هما أكثر الخطوط المحملة 80.78%، كما أنّ بعض الخطوط محملة تحميلاً طفيفاً

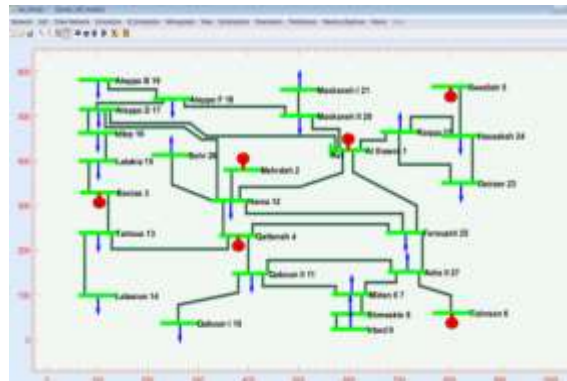
يمكن إيجاد الحل الأمثل لمشكلة انقطاع أي خط، وبكلفة نحو 244 unit بتغيير التوليد وتقنين الأحمال كما هو مبين في الجدول (11).

الجدول (11) القيم الجديدة للتوليد والأحمال لحل مشكلة انقطاع أي خط في نظام 5-Bus bar

	BUS 1 [GEN]	BUS 2 [Load]	BUS 3 [Load]	BUS 4 [Load]	BUS 5 [GEN]
Old Value	254.9000	-200	-140	-80	165.1000
Var Value	-122.0179	40.4483	34.1875	22.5171	24.8649
New Value	132.8821	-159.5517	-105.8125	-57.4829	189.9649

الاختبارات على جزء من الشبكة الكهربائية السورية 230 kV:

يبيّن الشكل (8) جزءاً من نظام الشبكة الكهربائية السورية 230kV، المدروس والمرسوم باستخدام البرنامج المنجز، إذ يتألف من 27 قضيب تجميع مع 34 خط نقل، بافتراض توتر الأساس kV 230، واستطاعة الأساس 100 MVA، والتردد 50 Hz، وهبوط التوتر النسبي 10%، والقضيب المرجعي هو Al_Thawra، وعامل الاستطاعة 0.85.



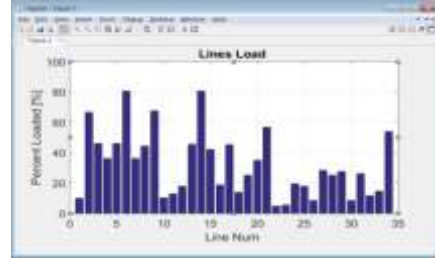
الشكل (8) جزء من الشبكة الكهربائية السورية 230 kV باستخدام البرنامج المنجز

النتائج Results

بدأ البحث بمقدمة تشرح مفهوم أمان نظام القدرة الكهربائية وأهميته، يلي ذلك النموذج الرياضي الذي بني استناداً إلى تقانتي جريان الحمولة الخطي وعوامل التحسس لأهم الأحداث التي يتعرض لها نظام القدرة، مثل انقطاع خط أو توليد. صممت خوارزمية الأحداث المحتملة لتقييم أمان أي نظام قدرة كهربائية من حيث جريان الاستطاعة الفعلية. استناداً إلى هذه الخوارزمية صمّم نظام برامجي مرئي باستخدام بيئة MATLAB يتيح للمستخدم الحوار السهل مع الحاسوب في أثناء التشغيل، وتبيّن من خلال المحاكاة أنّ البرنامج ذو كفاءة عالية، ويصلح لتقدير أمان الشبكة بدقة وسرعة. وفيما يأتي الاستنتاجات التي توصلنا إليها خلال البحث:

1. اقترح البرنامج الإجراءات التصحيحية لاستراتيجية تغيير التوليد، بهدف التخفيف ما أمكن من حالات التحميل الزائد للخطوط.
2. يقترح البرنامج الإجراءات التصحيحية لاستراتيجية تغيير التوليد وتقنين الأحمال، بهدف التخفيف (ما أمكن) من حالات التحميل الزائد للخطوط.
3. يمكن رسم شبكة القدرة بسهولة وإجراء الإمكانيات كلّها عبر برنامج مرئي ذي أداء عالٍ، وسهل التعلّم على المستخدمين، ومن ميزات أنه قابل للتعديل والتطوير.
4. قام البرنامج بشكل آلي بتمثيل الأحداث المحتملة للخطوط ولمحطات التوليد جميعها، بحيث يستنتج الخطوط المحملة تحميلاً زائداً مع إظهار نسبة الزيادة في التحميل، ما يعطي المشغل في مركز التنسيق صورة مسبقة عن وضع الشبكة في حالة الأعطال قبل حدوثها.
5. طوّر نموذج رياضي وخوارزمية يمكن من خلالها اقتراح استراتيجية تغيير التوليد الأكثر أماناً والأقل

كالخط Hama to Ferouzeh بنسبة 4.87% فقط، كما هو موضّح في الشكل (9).



الشكل (9) توزع جريان الاستطاعة على الخطوط للشبكة الكهربائية السورية المدروسة

(2) دراسة انقطاع الخطوط: بدراسة أثر انقطاع الخطوط في هذه الحالة، نجد أنّ الخط الأخطر هو الخط Tishreen to Adra II، إذ يسبّب انقطاعه تحميلاً زائداً على عدد كبير من الخطوط (سبعة عشر خطاً من الشبكة). كما يوجد 26 خطاً لا يسبّب انقطاعهم أي زيادة في التحميل، وتوجد ثمانية خطوط يسبب انقطاعهم زيادة في التحميل على بعض الخطوط. كما درس إيجاد الحل الأمثل لحالة انقطاع خط واحد من مجموعة خطوط مختارة، فحصلنا على الجدول (13)، إذ نلاحظ عدم وجود حل لبعض الحالات وفق محددات الشبكة الحالية.

الجدول (13) انقطاع خط من مجموعة خطوط مختارة

الخط	الكلفة التقريبية
{Mehrdeh to Hama, Midan II to Shmeskin, Aleppo F to Aleppo B}	لا يوجد حل
{Midan II to Shmeskin, Aleppo F to Aleppo B}	942
{Mehrdeh to Hama, Aleppo F to Aleppo B}	722.40
{Mehrdeh to Hama, Midan II to Shmeskin}	لا يوجد حل

المراجع References

1. K. SUNDARARAJU et al. Performance analysis and location identification of STATCOM on IEEE-14 bus system using power analysis. JATIT & LLS, 2014.
2. MORISON, K.; WANG, L.; KUNDUR, P. Power System Security Assessment. IEEE Power & Energy Magazine, Sept./Oct. 2004, 30-39.
3. حمزة، علي؛ الفقيه، نبيل. تصميم وتنفيذ نظام برمجي SECURITY I لتحليل أمان نظم القدرة الكهربائية باستخدام النماذج الخطية. مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية، المجلد 15، العدد الثاني، 1999، 93-120.
4. حمزة، علي؛ الفقيه، نبيل. نظام برمجي SECURITY II لتحليل الأحداث المحتملة وتصميم الإجراءات الوقائية لضمان تشغيل آمن لنظم القدرة الكهربائية. مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية، المجلد 17، العدد الأول، 2001، 87-107.
5. فقيه، نبيل. التنسيق الاقتصادي الخاضع لقيود أمان تأخذ بالحسبان إمكانيات إعادة جدولة التوليد. مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية، المجلد 31، العدد الثالث، 2014، 49-70.
6. جبوح، أسامة، أ. MATLAB لغة المهندسين. دار الأنس للنشر والتوزيع، (2005)، دمشق، سورية.
7. Ian, Sommerville. Software Engineering. 10th Edition, ISBN 978-0-13-394303-0, published by Pearson Education Limited, 2016.
8. T. E. DyLiacco. The Adaptive Reliability Control System. IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-86, No.5, May 1967, PP. 517-531.
9. T. E. DyLiacco. System Security: the Computer's Role. IEEE Spectrum, June 1978, PP. 43-50.
10. L. H. Fink and K. Carlsen. Operating under Stress and Strain. IEEE Spectrum, March 1978, PP. 48-53.
11. LamineMili. Taxonomy of the Characteristics of Power System Operating States. Virginia Tech Falls Church, VA 22043 Conference Paper. January, January 11th, 2011.
12. DyLiacco, Tomas. Modern control centers and computer networking. IEEE Computer Applications in Power. Volume: 7, Issue: 4, 1994, Pages:17-22
13. فقيه، نبيل. تطوير خوارزمية وبرنامج حاسوبي لتحليل جريان الانقطاع عن التشغيل الاقتصادي البحت، أو اقتراح استراتيجية تغيير التوليد وتقنين الأحمال الأكثر أماناً والأقل انحرافاً عن التشغيل الاقتصادي البحت.
6. تم التثبت من صحة البرنامج بتطبيقه على شبكات علمية اختبارية، كما استخدم لتحليل الأمان لجزء من الشبكة السورية لتوتر 230 kV.
7. يتيح النظام البرمجي للمشغل ترتيب أفضلية تشغيل وحدات التوليد انتقائياً، ووضع أولويات لتقنين الأحمال.
8. يمكن استثمار البرنامج في تحليل الأمان بشكل آلي أو انتقائي لأحداث محتملة، إذ يسمى الخطوط المحملة تحميلاً زائداً مع إظهار نسبة الزيادة في التحميل اظهاراً رسومياً وواضحاً، وهو قابل للتطبيق على أي نظام قدرة كهربائية، ويسهم في حل مشكلات حقيقية يعاني منها نظام القدرة ، ويعود بفوائد علمية واقتصادية.
9. يمكن إجراء العديد من الحسابات على الشبكة الكهربائية، كإيجاد المصفوفة B، والمصفوفة X، ومصفوفة التحسس لتغير التوليد، ومصفوفة التحسس لانقطاع خط، وإيجاد جريان الاستطاعة في خطوط الشبكة جميعها، مع نسبة التحميل، والخطوط المرهقة.

VSC-HVDC. مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية،

المجلد 30، العدد الأول، 2014، 191-209.

14. بيانات وزارة الكهرباء.

15. WOOD, A.; WOLLENBERG, B.; SHEBLE, B. Power Generation, Operation, and Control. 3th. Edition, John Wiley & Sons, 2013.

16. بيانات وزارة الكهرباء.

17. Boggs, W; M. Mastering UML with Rational Rose 2002. Addison-Wesley, 2002

18. B. Boehm. A Spiral Model for Software Development and Enhancement. IEEE Computer. 21:5, May 1988, 61-72.

Received	2018/06/05	إيداع البحث
Accepted for Publ.	2019/02/04	قبول البحث للنشر