

## تطوير خوارزمية وبرنامج Security3 لتحليل الأحداث المحتملة على نظام القدرة الكهربائية باستخدام مصفوفة ممانعات العقد $Z_{bus}$

الدكتور المهندس خالد زيدان<sup>1</sup>

### الملخص

يجب أن تكون أطر التشغيل في مركز التنسيق على معرفة مسبقة بالأحداث المحتملة على نظام القدرة الكهربائية والتي تنجم عن حدوث الأعطال التي تؤدي إلى فصل الخطوط أو عن خروج المولدات وانزياحها، وذلك ليكون قادراً على إجراء المناورات اللازمة في الوقت المناسب، ويتم ذلك من خلال دراسة الأمان وتحليل الأحداث المحتملة التي تساعد على التنبؤ بالتيارات والتوترات الجديدة المستقرة ومعرفة هل هناك زيادة في التيار أو خروج عن حدود التوتر وتزويد مشغلي النظام بها.

تصبح طرائق تحليل الأحداث المحتملة جذابة أكثر باستخدام مصفوفة ممانعات العقد  $Z_{bus}$  نظراً إلى ميزات وإمكانية استخدامها في دراسة العديد من مسائل نظم القدرة الكهربائية مثل حسابات الأعطال وتحليلها وحسابات الأمان فضلاً عن كونها طريقة قابلة للبرمجة.

قمنا من خلال هذا البحث بتصميم خوارزمية وتطوير برنامج Security3 لتحليل الأحداث المحتملة استناداً إلى مصفوفة ممانعات العقد  $Z_{bus}$  في تشكيل عوامل التوزيع، كما قمنا بتطبيق البرنامج على شبكة مرجعية وعلى جزء من الشبكة السورية.

الكلمات المفتاحية: تعويض compensation، أمان security، الأحداث المحتملة Contingencies، توزيع distribution تيار Current، حقن injection، إزاحة shift، توليد generation، انقطاع outage

<sup>1</sup> مدرس - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

#### 1- مقدمة:

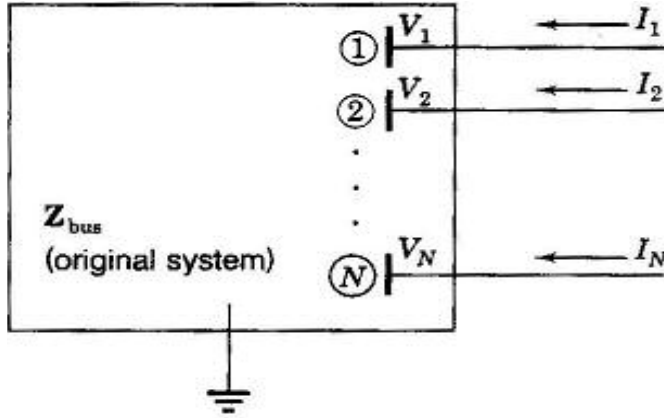
ينجم عن حالات الأعطال المختلفة التي يمكن أن يتعرض لها نظام القدرة الكهربائية فصل خط أو أكثر من خطوط النقل أو خروج مولد أو أكثر عن الشبكة أو عن كليهما، وينجم عن ذلك المزيد من التحميل الزائد على الخطوط الأخرى وتستمر هذه الحالة وتتصاعد بمزيد من الانقطاعات والخروج عن الخدمة حتى الوصول إلى حالة التعطيم الكامل للنظام. ولتجنب مثل هذه الأحداث وتشغيل نظام القدرة حتى في حالات الطوارئ يلزم إجراء تحليل شامل للحالات الطارئة المتوقعة، ودراسة جريان الحمولة لكل حالة من حالات فصل الخطوط وخروج المولدات، وإعادة ذلك من أجل كل خط وكل مولد في النظام المدروس، وهذا يتطلب وقتاً طويلاً في حين أن التصرف في أثناء الحالات الطارئة يجب أن يكون سريعاً. لذا لا بد من اللجوء إلى طرائق قادرة على إعطاء المعلومات بسرعة أكبر ولو بدقة أقل ضمن حدود منطقية مقبولة من بينها طريقة جريان الحمولة الخطي DC Power flow وطريقة عوامل التوزيع المستندة إلى مصفوفة ممانعات العقد  $Z_{bus}$  التي تغنينا عن تكرار حساب جريان الحمولة لكل حالة طارئة متوقعة، وعند الحاجة إلى قيم توترات العقد وجريانات الاستطاعة في الخطوط تجب العودة إلى الطرائق الدقيقة في حساب جريان الحمولة.

#### 2- إضافة عدة خطوط وإزالتها:

نستطيع تمثيل مسألة إزالة خط نقل قدرة من الخدمة إلى النظام قيد الدراسة بإضافة الجزء السالب من الممانعة التسلسلية لذلك الخط بين العقدتين المحددتين له، ولكي نقوم بشرح تأثيرات انقطاع بعض خطوط نقل القدرة وخروجها من الخدمة وانزياح التوليد على بقية أجزاء نظام القدرة الكهربائية، تم حساب عوامل التوزيع انطلاقاً من مصفوفة ممانعات العقد  $Z_{bus}$  للنظام واستخدامها لدراسة الحالات المحتملة.

عند تحليل الأحداث المحتملة لجزء من نظام القدرة علينا أن نمثل بقية أجزاء النظام بشبكة مكافئة، وعند إضافة خطوط أو إزالتها من النظام الموجود، فإنه ليس من

الضروري دائماً إعادة بناء  $Z_{bus}$  من جديد، ولاسيماً إذا كان الشيء الوحيد المهم هو دراسة تأثير التغيرات الحاصلة في توترات العقد الموجودة وفي جريانات التيار، ومن الشائع افتراض حقن تيارات تعويض Compensating currents في النظام لدراسة تلك التأثيرات. سنأخذ بالحسبان إضافة خطين ممانعتيهما  $Z_b$  و  $Z_a$  إلى نظام القدرة المبين في الشكل (1) الذي مصفوفة ممانعات العقد  $Z_{bus}$  له معروفة، ولنفترض أن الممانعات  $Z_b$  و  $Z_a$  ستضاف بين العقدتين  $m-n$  والعقدتين  $p-q$  إلى النظام على التوالي، وأن توترات عقد نظام القدرة الأساسي (دون  $Z_b$  و  $Z_a$ ) هي  $V_1, V_2, \dots, V_N$  والنتيجة عن حقن التيارات  $I_1, I_2, \dots, I_N$  المعلومة، وأن عمليات الحقن هذه ثابتة بالقيمة ولذلك لا تتأثر بإضافة  $Z_b$  و  $Z_a$ . [4]



الشكل (1) نظام القدرة الكهربائية الأساسي

تعطى معادلات ممانعات العقد للنظام الأساسي عندئذ بالمعادلة المصفوفية (1):

$$V = \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_m \\ V_n \\ V_p \\ V_q \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} = \begin{matrix} 1 & \dots & m & n & p & q & \dots & N \\ \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1m} & Z_{1n} & Z_{1p} & Z_{1q} & \dots & Z_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{m1} & \dots & Z_{mm} & Z_{mn} & Z_{mp} & Z_{mq} & \dots & Z_{mN} \\ Z_{n1} & \dots & Z_{nm} & Z_{nn} & Z_{np} & Z_{nq} & \dots & Z_{nN} \\ Z_{p1} & \dots & Z_{pm} & Z_{pn} & Z_{pp} & Z_{pq} & \dots & Z_{pN} \\ Z_{q1} & \dots & Z_{qm} & Z_{qn} & Z_{qp} & Z_{qq} & \dots & Z_{qN} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N1} & \dots & Z_{Nm} & Z_{Nn} & Z_{Np} & Z_{Nq} & \dots & Z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_m \\ I_n \\ I_p \\ I_q \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} \quad (1)$$

لتكن  $V' = [V'_1, V'_2, \dots, V'_N]$  مصفوفة شعاع توترات العقد، التي تطبق بعد إضافة

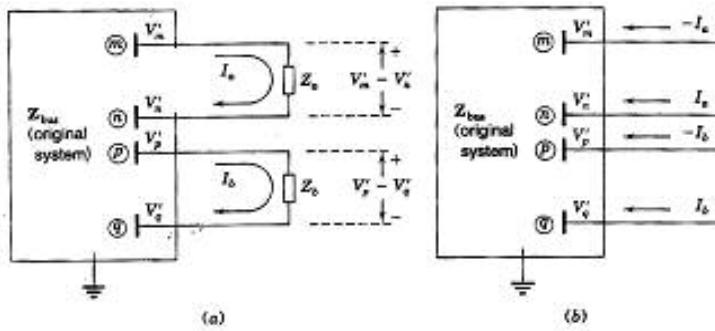
الممانعتين  $Z_a$  و  $Z_b$  فان تغير التوتر على العقدة K يعطى عندئذ بالمعادلة :

$$\Delta V_K = V'_K - V_K \quad (2)$$

ترتبط تيارات الفروع المضافة  $I_a$  و  $I_b$  وممانعاتها  $Z_a$  و  $Z_b$  بتوترات العقد الجديدة من خلال المعادلتين الآتيتين:

$$Z_a I_a = V'_m - V'_n \quad Z_b I_b = V'_p - V'_q \quad (3)$$

يبين الشكل (2) تيارات الفروع الجديدة التي تسري من العقدة m إلى العقدة n ومن العقدة p إلى العقدة q.



الشكل (2) تيارات الفروع الجديدة

يمكننا إعادة كتابة المعادلتين (3) على شكل مصفوفة شعاعية كما يأتي:

$$\begin{bmatrix} Z_a & 0 \\ 0 & Z_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} = a \begin{bmatrix} 0 & \dots & 1 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & -1 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V'_1 \\ \vdots \\ V'_m \\ V'_n \\ V'_p \\ V'_q \\ \vdots \\ V'_N \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$= \text{Ac.V}$$

إذ:

**Ac**: مصفوفة تأثير دخول الفرعين الجديدين إلى عقد النظام.

**I<sub>a</sub>** و **I<sub>b</sub>**: تيارات الفروع الجديدة

تؤثر تيارات الفروع الجديدة كمجموعتين من التيارات المحقونة، (**I<sub>a</sub>**) على العقدة **m** و **I<sub>b</sub>** على العقدة **n**، (**-I<sub>b</sub>**) على العقدة **p** و **I<sub>a</sub>** على العقدة **q** بالتأثير نفسه في توترات العقد لنظام القدرة حيث تجمع التيارات المكافئة المحقونة هذه مع التيارات الفعلية المحقونة في النظام الأساسي مسببة توترات العقد الجديدة  $V'_1, V'_2, \dots, V'_N$ ، وذلك كما هو مبين في الشكل (2-b). تماماً كما يحدث إذا أضيفت الممانعات  $Z_a$  و  $Z_b$  فعلاً إلى الشبكة، حيث تعوض التيارات **I<sub>a</sub>** و **I<sub>b</sub>** عن تعديل  $Z_{bus}$  لنظام القدرة الأساسي لكي يتضمن  $Z_a$  و  $Z_b$ ، وانطلاقاً من ذلك تسمى تيارات التعويض Compensating Currents، ونعبر عنها بالمصفوفة الشعاعية الآتية:

$$\mathbf{I}_{\text{comp}} = \begin{matrix} \textcircled{1} \\ \textcircled{m} \\ \textcircled{n} \\ \textcircled{p} \\ \textcircled{q} \\ \textcircled{N} \end{matrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -I_a \\ I_a \\ -I_b \\ I_b \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{matrix} \textcircled{1} \\ \textcircled{m} \\ \textcircled{n} \\ \textcircled{p} \\ \textcircled{q} \\ \textcircled{N} \end{matrix} \begin{matrix} a & b \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ -1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} = -\mathbf{A}_c^T \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} \quad (5)$$

يمكن أن تحسب توترات العقد الجديدة  $V'_1, V'_2, \dots, V'_N$  بضرب مصفوفة ممانعات العقد لنظام القدرة الأساسي  $Z_{bus}$  بشعاع تيارات التعويض  $I_{comp}$  وإضافة  $Z_{bus} I_{comp}$  إلى شعاع توترات العقد الأساسية  $V$  وفق المعادلة:

$$V' = V + Z_{bus} \cdot I_{comp} = V - Z_{bus} \cdot A_c^T \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} \quad (6)$$

التي يتبين منها أن تغيرات التوتر على عقد النظام الأساسي بسبب إضافة ممانعات الفروع  $Z_a$  و  $Z_b$  بين العقد  $m$ - $n$  و  $p$ - $q$  على التوالي تعطى بالعلاقة:

$$\Delta V = V' - V = -Z_{bus} \cdot A_c^T \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} \quad (7)$$

إذ إن:

$I_a$  و  $I_b$  تيارات التعويض.

### 3- تحليل الأحداث المحتملة: Contingencies Analysis

عند إزالة خط نقل أو محول من الخدمة نقول: إنه قد حصل انقطاع Outage الذي قد يحدث بشكل مخطط له مسبقاً من أجل أعمال الصيانة المبرمجة أو ينتج عن أسباب قاهرة بسبب ظروف المناخ أو الأعطال أو حالات محتملة أخرى، حيث تزال التغذية عن الخط أو المحول ويعزل عن الشبكة من خلال فصل القواطع الآلية المناسبة.<sup>[4]</sup> من المهم لكل من مشغل النظام ومخططه أن يكونا قادرين على تقييم كيفية تغير جريان الحمولة في الخطوط وتغير توترات العقد في الحالة الجديدة وإزالة تيارات الخطوط الزائدة ومعالجة التوترات العالية أو المنخفضة غير المقبولة، لأنها تجعل النظام أكثر عرضة لمتابعة الخروج من الخدمة.

يحلل العدد الكبير للانقطاعات المحتملة الذي يقدر غالباً بالمئات من خلال تحليل الأحداث المحتملة ولا نحتاج إلى دقة كبيرة في ذلك، لأن الاهتمام الأساسي ينصب على التحقق من توافر الأمان أو عدمه في الحالة المستقرة بعد أي انقطاع، وتستخدم

استناداً إلى ذلك طرائق تقريبية لدراسة جريان الحملولة لاختبار تأثير انقطاع الخطوط والمحولات في توترات العقد وفي جريان الحملولة في خطوط الشبكة لأنها تؤمن حلاً سريعاً لحالات الاختبار العديدة.

سنشرح في هذا البحث طريقة جديدة تعتمد على مصفوفة ممانعات العقد  $Z_{bus}$  وفيها تحول الأحمال ومداخل المولدات للنظام كافةً إلى منابع تيار مكافئة والتي نعدّها ثابتة. نفترض أن فروع الشبكة لنظام القدرة ممثلة بممانعات تسلسلية آخذين بالحسبان أنه إذا حذفنا سعات الخطوط والعناصر التفرعية الأخرى كلّها مع الحيادي فإنه يصبح معزولاً وعندها يجب اختيار عقده أخرى كمرجع لمصفوفة  $Z_{bus}$  للنظام، كما نأخذ بالاعتبار قبل البدء بدراسة الأحداث المحتملة أن جريان التيار في كل خط من النظام سوف يتغير عند حقن تيار إضافي على أي عقدة من عقده.

تعطى تغيرات التوتر الناتجة عن التيار الإضافي  $\Delta I_m$  المحقون في العقدة  $m$  بالمعادلة المصفوفية الآتية:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_i \\ \Delta V_j \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V'_1 - V_1 \\ \vdots \\ V'_i - V_i \\ V'_j - V_j \\ \vdots \\ V'_n - V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \Delta I_m \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Column} \\ \text{of} \\ Z_{bus} \end{bmatrix} \Delta I_m \quad (8)$$

يمكن أن نكتب تغيرات التوتر على العقدتين  $i$  و  $j$  بالمعادلتين الآتيتين:

$$\Delta V_i = Z_{im} \Delta I_m \quad \Delta V_j = Z_{jm} \Delta I_m \quad (9)$$

وإذا كانت للخط الذي يصل  $i$  و  $j$  ممانعة  $Z_c$  فإن التغير في تيار الخط من العقدة  $i$  إلى العقدة  $j$  يعطى بالمعادلة:

$$\Delta I_{ij} = \frac{\Delta V_i - \Delta V_j}{Z_c} = \frac{Z_{im} - Z_{jm}}{Z_c} \Delta I_m \quad (10)$$

والتي نعرّف منها عامل توزيع تيار الحقن (Current injection distribution factor)  $K_{ij,m}$  كما يأتي:

$$K_{ij,m} = \frac{\Delta I_{ij}}{\Delta I_m} = \frac{Z_{im} - Z_{jm}}{Z_c} \quad (11)$$

بهذا فإنه كلما تغير التيار المحقون في العقدة m بمقدار  $\Delta I_m$ ، فإن التيار الذي يسري في الخط i-j يتغير بمقدار:

$$\Delta I_{ij} = K_{ij,m} \Delta I_m \quad (12)$$

في الحالة الطبيعية للنظام إذا كان التيار في خط معين زائداً، فإنه من الممكن إزالة زيادة الحمولة هذه بتخفيض التيار المحقون في النظام عند عقدة ما من عقده وزيادة حقن التيار بشكل موافق على عقدة أخرى، وعلى فرض أن التيار المحقون على العقدة P قد تغير بمقدار  $\Delta I_p$  في حين تغير التيار المحقون على العقدة q بمقدار  $\Delta I_q$ ، وباستخدام مبدأ التراكم فإن تغير التيار من العقدة p إلى العقدة q يسبب تغير التيار في الخط i-j وفق المعادلة الآتية:

$$\Delta I_{ij} = K_{ij,p} \Delta I_p + K_{ij,q} \Delta I_q \quad (13)$$

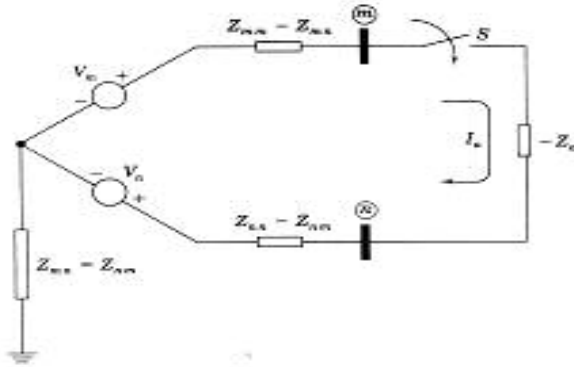
بسبب ذلك فإن عامل توزيع حقن التيار يسمى أيضاً عامل توزيع إزاحة التيار current-shift distribution factor وتسمى عوامل توزيع إزاحة التيار غالباً بعوامل توزيع إزاحة التوليد generation shift distribution factor .



## 4- النموذج الرياضي لمسألة دراسة الأمان وتحليل الأحداث المحتملة باستخدام

:  $Z_{bus}$ 

كما ذكرنا سابقاً فإن إزالة خط أو محول من الشبكة واقع بين العقدتين  $m$  و  $n$  وذات ممانعة تسلسلية  $Z_a$  تتم بإضافة ممانعة سالبة  $-Z_a$  بين عقد ثيفنن المكافئة والمبينة في الشكل (3) [5]



الشكل (3) دائرة ثيفنن لنظام القدرة

بإغلاق المفتاح  $S$  نصل الممانعة  $-Z_a$  بين العقدتين  $m$  و  $n$  ويسري عندها تيار الحلقة كما هو مبين في الشكل (3)، وباعتبار أن  $Z_{mn} = Z_{nm}$  فإننا نستطيع أن نكتب :

$$I_a = \frac{V_m - V_n}{(Z_{mm} + Z_{nn} - 2Z_{mn}) - Z_a} = \frac{V_m - V_n}{Z_{th,mn} - Z_a} \quad (14)$$

إذ:

$V_m$  و  $V_n$  : توترات ما قبل الانقطاع.

$Z_{th,mn} = Z_{mm} + Z_{nn} - 2Z_{mn}$  : ممانعة ثيفنن بين العقدتين  $m$  و  $n$  قبل

الانقطاع.

يسبب تيار الحلقة Ia تأثير تيارى التعويض نفسه  $\Delta I_m = -I_a$  (على العقدة m) و  $\Delta I_n = I_a$  (على العقدة n) على توترات الشبكة قبل الانقطاع ونعبر عن تغير التيار الناتج  $\Delta I_{ij}$  من العقدة i إلى العقدة j بالمعادلة الآتية:

$$\Delta I_{ij} = K_{ij,m} \Delta I_m + K_{ij,n} \Delta I_n = \frac{[(Z_{in} - Z_{im}) - (Z_{jn} - Z_{jm})]}{Z_c} I_a \quad (15)$$

باستبدال Ia من المعادلة (14) نحصل على معادلة تغير التيار :

$$\Delta I_{ij} = \frac{[(Z_{in} - Z_{im}) - (Z_{jn} - Z_{jm})]}{Z_c (Z_{th,mn} - Z_a)} V_m - V_n \quad (16)$$

يسبب فرق التوتر  $V_m - V_n$  بين العقدتين m و n في الحالة الطبيعية مرور تيار  $I_{mn}$  في الخط m-n يعطى بالمعادلة:

$$I_{mn} = \frac{V_m - V_n}{Z_a} \quad (17)$$

ومن المعادلتين (16) و (17) نجد أن تغير التيار في الخط j-i نتيجة انقطاع الخط m-n يعطى بالعلاقة :

$$\Delta I_{ij} = \frac{Z_a}{Z_c} \left[ \frac{(Z_{in} - Z_{im}) - (Z_{jn} - Z_{jm})}{Z_{th,mn} - Z_a} \right] I_{mn} \quad (18)$$

وبالتعبير عن هذا التغير بالتيار على أنه جزء من التيار  $I_{mn}$  نحصل على:

$$\frac{\Delta I_{ij}}{I_{mn}} = -\frac{Z_a}{Z_c} \left[ \frac{(Z_{im} - Z_{in}) - (Z_{jm} - Z_{jn})}{Z_{th,mn} - Z_a} \right] = L_{ij,mn} \quad (19)$$

إذ  $L_{ij,mn}$ : عامل توزيع انقطاع الخط Line outage distribution factor وهناك عامل توزيع مماثل يمكن أن يعرف من أجل التغيير في تيار أي خط آخر من الشبكة. على سبيل المثال، فإن عامل توزيع فصل الخط  $L_{pq,mn}$  يعبر عن التغيير في تيار الخط p-q ذات الممانعة  $Z_b$  بسبب انقطاع الخط m-n ذات الممانعة  $Z_a$  وهو:

$$L_{pq,mn} = \frac{\Delta I_{pq}}{I_{mn}} = -\frac{Z_a}{Z_b} \left[ \frac{(Z_{pm} - Z_{pn}) - (Z_{qm} - Z_{qn})}{Z_{th,mn} - Z_a} \right] \quad (20)$$

تتضمن عوامل التوزيع  $L_{pq,mn}$  و  $L_{ij,mn}$  حدوداً في البسط والمقام يمكن أن تحسب مسبقاً من ممانعات الخط وعناصر  $Z_{bus}$  لحالة النظام الطبيعية، وتستخدم الجداول لتقييم تأثير أي انقطاع إفرادي في جريان التيار في الخطوط المتبقية حيث تعطى التيارات الجديدة في الخطوط والنتيجة عن انقطاع الخط m-n بالمعادلات الآتية:

$$\begin{aligned} I'_{ij} &= I_{ij} + \Delta I_{ij} = I_{ij} + L_{ij,mn} I_{mn} \\ I'_{pq} &= I_{pq} + \Delta I_{pq} = I_{pq} + L_{pq,mn} I_{mn} \end{aligned} \quad (21)$$

تعرف المعادلات (21) الزيادة في تيارات الخطوط والنتيجة عن انقطاع الخط m-n.

إذ:  $I_{mn}$  تيار الخط m-n قبل الانقطاع. [4]

##### 5- خوارزمية تحليل الأحداث المحتملة Contingency analysis algorithm :

استناداً إلى النماذج الرياضية التي سبق ذكرها قمنا بإنجاز خوارزمية لدراسة أمان نظم القدرة الكهربائية وتحليل الأحداث المحتملة اعتماداً على مصفوفة ممانعات العقد  $Z_{bus}$ . يبين الشكل (4) المخطط الانسيابي لخوارزمية تحليل الأحداث المحتملة ودراسة

أمان نظم القدرة الكهربائية باستخدام مصفوفة ممانعات العقد  $Z_{bus}$ ، وهي تتألف من الوحدات الأساسية الآتية: [2]

**وحدة الدخول:** وتشمل معطيات الدخول للشبكة ومعطيات العقد والخطوط (مفاعلاتها وهل هي بسيطة أو مضاعفة)، ومعطيات المحولات والمولدات وطريقة توصيلها وطريقة تأريضها فضلاً عن معطيات أخرى مثل استطاعة الأساس.

**وحدة تشكيل مصفوفة ممانعات العقد  $Z_{bus}$ :** يتم من خلالها تشكيل مصفوفة ممانعات

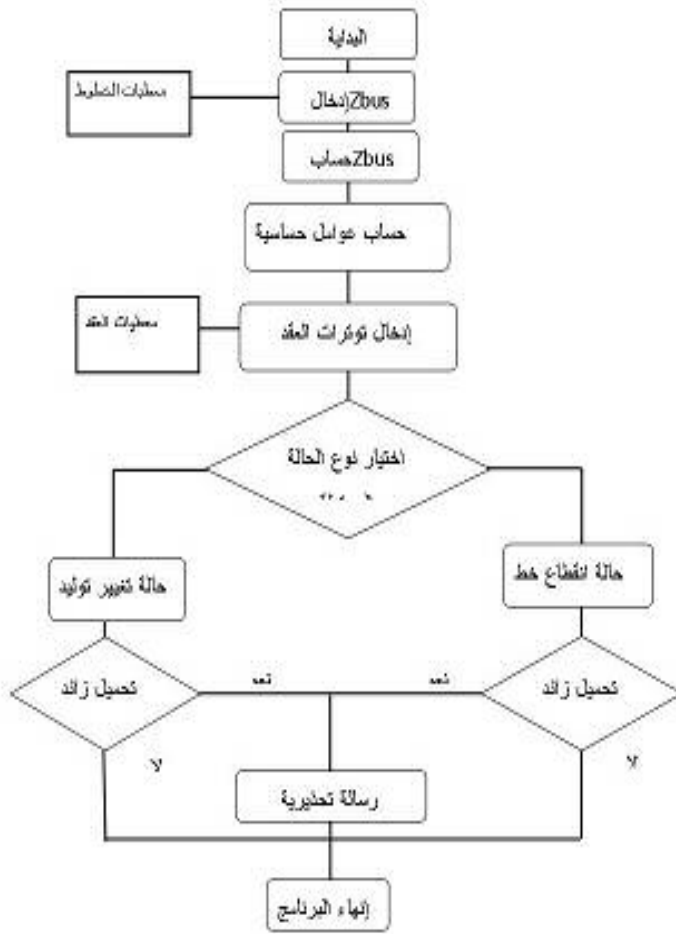
العقد التناظرية الموجبة  $Z_{bus}^+$ .

**وحدة حساب عوامل الحساسية:** وذلك استناداً إلى المعادلتين 19 و 20 السابقتين

**وحدة إدخال توترات العقد:** من معطيات الشبكة

**وحدة اختيار نوع الحالة المحتملة:** هل هي انقطاع خط أو تغيير توليد

**وحدة الخرج:** لبيان هل فيما إذا كان هناك تحميل زائد واعطاء رسالة تحذيرية أو إنهاء البرنامج.



الشكل(4) خوارزمية لدراسة أمان نظام القدرة وتحليل الأحداث المحتملة باستخدام  $Z_{bus}$

6- برنامج Security3 لدراسة أمان نظام القدرة الكهربائية وتحليل الأحداث المحتملة: [2]

قمنا بإنجاز وتطوير برنامج أسميناه Security 3، وذلك من خلال ترجمة الخوارزمية المبنية على النموذج الرياضي إلى برنامج مكون من عدد من الوحدات اللازمة. يبين الشكل رقم (5) الواجهة الرئيسية للبرنامج

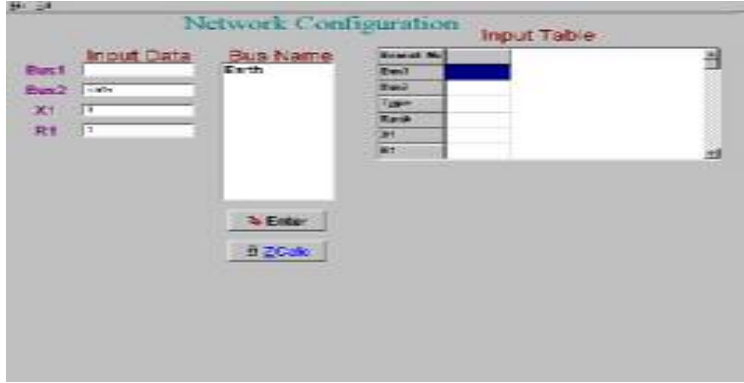


الشكل (5) الواجهة الرئيسية للبرنامج

التي تتضمن الخيارات الآتية:

- Z-BUS:** برنامج لحساب مصفوفة ممانعات العقد لنظام القدرة الكهربائية.
- CONTINGENCY:** برنامج حساب الأحداث المحتملة والتنبؤ بالتيارات في فروع الشبكة عند حدوث انقطاع على أحد خطوط الشبكة أو تعرض إحدى مولداتها للخلل.
- POWER WORLD:** برنامج يمكن الاستفادة منه في تمثيل جريان الحمولة وتوزيع التيارات في فروع الشبكة، تخطيطياً قمنا بربطه ببرنامجنا Security3 من خلال .Link
- EXIT:** للخروج من البرنامج.

عند اختيار Z-Bus ننتقل إلى واجهة إدخال ممانعات العقد لنظام القدرة الكهربائية كما في الشكل رقم (6) [1]



الشكل (6) الواجهة التنفيذية لبرنامج حساب مصفوفة ممانعات العقد

ندخل قيم ممانعات الفروع المراد إدخالها بعد تحديد كل فرع بالعقدتين المحدتين له (Bus1, Bus2)، حيث ندخل قيمة المفاعلة الموجبة (X1) Positive Reactance والمقاومة الموجبة (R1) Positive Resistance ثم نضغط (Enter)، وهكذا حتى ندخل معطيات الخطوط كلها، وهناك خيار آخر وهو أن ندخل معطيات أنظمة قدرة محفوظة سابقاً عن طريق القائمة (File) ثم من (Open) نختار الملف الخاص بالنظام المراد دراسته.

بالضغط على (ZCalc) يحسب البرنامج المنجز مصفوفة ممانعات العقد  $Z_{bus}$  للنظام الذي تم اختياره وبالضغط على (Return) نعود للصفحة الرئيسية. عند اختيار (CONTINGENCY) تظهر لنا النافذة الرئيسية لاختيار طريقة حساب الأحداث المحتملة وعند الضغط على (Calculating Type) تظهر نافذة الحوار المبنية في الشكل رقم (7) التي يختار المستخدم من خلالها نوع الحساب هل هو بالتيار أو باستخدام عوامل التوزيع [2]



الشكل (7) خيارات طريقة حساب الأحداث المحتملة

نختار (Distribution Factors Calculating) فنظهر لنا أيقونة (Contingency Type) التي تتضمن خيارات الأحداث المحتملة المحددة، وهي إمّا حالة انقطاع خط أو حالة انزياح في التوليد، كما هو مبين في الشكل رقم (8)



الشكل (8) خيارات الأحداث المحتملة

عند اختيار (Generation Shift) يلزم إجراء حسابات عوامل الحساسية لتغير التوليد، وعند اختيار (Line Outage) يقوم البرنامج بإجراء حسابات عوامل الحساسية لانقطاع الخط بعد إدخال البيانات، كما هو مبين في الشكل رقم (9).



الشكل (9) إدخال البيانات اللازمة لحساب عوامل الحساسية لانقطاع خط

حيث ندخل فيها رقم الخط المقطوع محدداً بعقدتيه، ثم الخط المراد دراسة تأثير الانقطاع منه، ثم نضغط (Calc) فتظهر لنا قيمة عامل الحساسية المحسوبة من قبل البرنامج لهذه الحالة كما في الشكل (10).

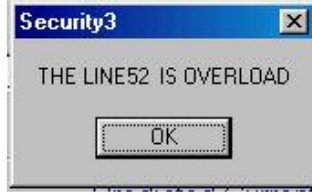


الشكل (10) قيمة عامل الحساسية المحسوبة من قبل البرنامج Security3

ننتقل إلى حساب التيارات للحالة المحتملة المدروسة ولدراسة الأمان حيث نختار Current Calculating كما هو مبين في الشكل (7) السابق. ونقوم بإدخال قيم توترات العقد أو نختار من قائمة (File) ملفاً مخزناً سابقاً، ونختار نوعية الحالة المحتملة كما هو مبين في الشكل (11).

الشكل (11) واجهة إدخال المعلومات اللازمة لحساب التيار المطلوب التنبؤ به

ندخل معطيات الخط المقطوع المحدد بعقدتيه والخط المراد دراسته في واجهة التخاطب السابقة شكل(11)، ثم نضغط على (Calc) لإتمام الحساب فتظهر نتائج الحساب لتبين قيمة التيار قبل الانقطاع وبعده، ثم يحسب البرنامج داخلياً إن كان هناك تحميل زائد أم لا ويظهر لنا رسالة، بذلك كما هو مبين في الشكل (12).



الشكل (12) نتائج حساب البرنامج للحالة المحتملة ورسالة إنذار عن وجود تحميل زائد

للعودة إلى النافذة الرئيسية نضغط على مفتاح (Return).<sup>[2]</sup>

7- التطبيق العملي:

1-7 تطبيق البرنامج Security3 على شبكة مرجعية ومقارنة النتائج بالحل بالطريقة

اليديوية:

يبين الشكل (13) نظام قدرة كهربائية مرجعياً مكوناً من خمسة قضبان تجميع، وستة خطوط نقل قدرة. أحمال P\_Q وقيم التوليد ومفاعلات الخطوط مبينة على الشكل. توترات العقد معطاة في الجدول (1) وفيه تمثل الحالة (a) جريان الحمولة للحالة الأساسية للنظام والمطلوب:

7- التنبؤ بتيار الخط 3-5 عند فصل الخط 2-5 في ظروف العمل المعطاة.

2- حساب القيمة المحتملة للتيار الناتج في الخط 5-4 عند حدوث انزياح في التوليد

من العقدة رقم 5 إلى العقدة رقم 1 مقدار 45MW. [4]

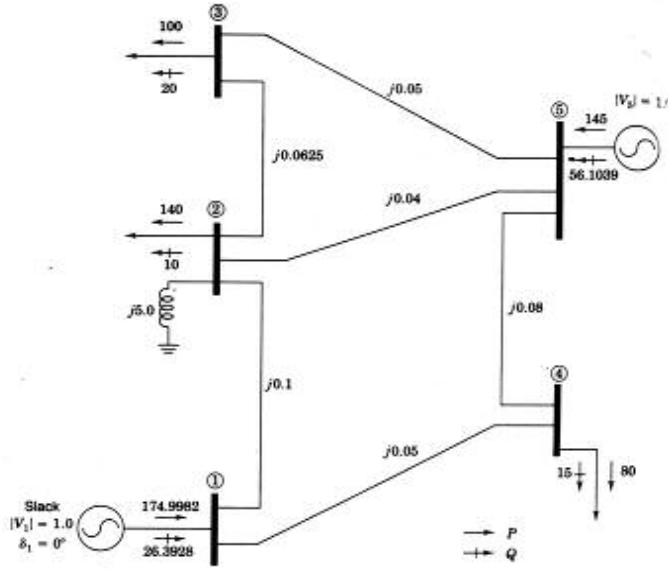
الجدول (1) توترات العقد الناتجة من حل جريان حمولة للنظام

رقم العقدة	a	b	c	d	e
1	1.000000+ j0.000000	1.000000+ j0.000000	1.000000+j0 .000000	1.000000+ j0.000000	1.000000+ j0.000000
2	0.986301- j0.083834	0.9668353- j0.108108	0.983733- j0.106285	0.966186- j9124878	0.970492- j0.095000
3	0.984789- j0.095108	0.977822- j0.088536	0.891780- j0.121225	0.970000- j0.116235	0.979301- j0.066882
4	0.993653- j0.045583	0.994430- j0.033446	0.992582- j0.056858	0.993489- j0.047561	0.990816- j0.04000
5	0.99498- j0.054795	0.999734- j0.023079	0.996444- j0.084253	0.998201- j0.059964	0.999984+ j0.005738

إذ:

a: حالة أساسية.

b-c-d-e: حالات متغيرة وفق ما يأتي:

**Case b:** line 5-2 out of service**Case c:** 45 MW shift from bus 5 to bus 1**Case d:** line 5-2 out of service plus case c change**Case e:** line 5-2 and 5-4 out of service

الشكل (13) نظام قدرة مرجعي مكون من خمس عقد

سوف نقوم بإنجاز الحسابات بالطريقة اليدوية، ثم باستخدام البرنامج المنجز Security3 ومقارنة النتائج.

### 1-1-7: الحساب بالطريقة اليدوية

لحساب مصفوفة ممانعات العقد لنظام القدرة بالطريقة اليدوية نقوم بترتيب ممانعات عناصر نظام القدرة وإضافة فروع الشبكة فرعاً تلو الآخر وتصنيف الفروع المضافة

ضمن أربعة أنواع كما هو متبع في طريقة تشكيل مصفوفة ممانعات العقد بطريقة  
 الخطوة - خطوة وإجراء الحسابات بالطريقة اليدوية فنحصل على مصفوفة ممانعات

العقد لنظام القدرة المبينة في الشكل (14): [4]

$$Z_1 = \begin{matrix} & \textcircled{1} & \textcircled{2} & \textcircled{3} & \textcircled{4} & \textcircled{5} \\ \textcircled{1} & \left[ \begin{array}{ccccc} j5.061466 & j5.000000 & j5.006317 & j5.042198 & j5.011371 \\ j5.000000 & j5.000000 & j5.000000 & j5.000000 & j5.000000 \\ j5.006317 & j5.000000 & j5.035850 & j5.009476 & j5.014529 \\ j5.042198 & j5.000000 & j5.009476 & j5.063298 & j5.017056 \\ j5.011371 & j5.000000 & j5.014529 & j5.017056 & j5.026153 \end{array} \right] \end{matrix}$$

الشكل (14) مصفوفة ممانعات العقد لنظام القدرة الكهربائية المرجعي محسوبة يدويا

أولا: تأثير انقطاع الخط 5-2

- حساب عامل توزيع الخط 5-3 عند انقطاع الخط 5-2 ( $L_{53,52}$ ):

نرمز  $Z_{5-3}$  للممانعة التسلسلية للخط (5-3) و  $Z_{5-2}$  للممانعة التسلسلية للخط (5-2) ومن المعادلة (20) وباستبدال قيم ممانعات العقد من الجدول رقم 3 نحصل على:

$$L_{53,52} = \frac{\Delta I_{53}}{I_{52}} = - \frac{z_{52}}{z_{53}} \left[ \frac{(Z_{55} - Z_{52}) - (Z_{35} - Z_{32})}{(Z_{55} + Z_{22} - 2Z_{52}) - z_{52}} \right]$$

بالاستبدال بالقيم والأرقام نحصل على:

$$L_{53,52} = - \frac{j0.04}{j0.05} \left[ \frac{(j5.026153 - j5.000000) - (j5.014529 - j5.000000)}{j0.026153} \right]$$

$$= 0.671533$$

ونستطيع أن نحسب من الحالة a عوامل توزيع الانقطاع على خطوط أخرى بطريقة  
 مماثلة

- حساب تيارات ما قبل الانقطاع في الخطوط 2-5 و 3-5 كما يأتي:

$$I_{52}^a = \frac{V_5^a - V_2^a}{z_{52}} = \frac{(0.998498 - j0.054795) - (0.986301 - j0.083834)}{j0.04}$$

$$= 0.725975 - j0.304925 \text{ per unit}$$

$$I_{53}^a = \frac{V_5^a - V_3^a}{z_{53}} = \frac{(0.998498 - j0.054795) - (0.984789 - j0.095108)}{j0.05}$$

$$= 0.806260 - j0.274180 \text{ per unit}$$

بالاستفادة من عامل التوزيع المحسوب فإن التغيير المحتمل في تيار الخط 3-5 هو:

$$\Delta I_{53} = L_{53,52} I_{52}^a = 0.671533(0.725975 - j0.304925)$$

$$= 0.487516 - j0.204767 \text{ per unit}$$

ومن ثم فإن التيار المحتمل مروره في الخط 3-5 بعد الانقطاع يساوي إلى:

$$I_{53}^b = I_{53}^a + \Delta I_{53} = (0.80626 - j0.274180) + (0.487516 - j0.204767)$$

$$= 1.293776 - j0.478947 = 1.380 \angle -20.31^\circ \text{ per unit}$$

بوجود الخط 2-5 خارج الخدمة وحالات التشغيل الأخرى كلها نفسها للحالة الأساسية a فإن حلاً جديداً لمسألة جريان الحمولة ac power-flow solution يعطي نتائج تغيير الحالة والمدرجة تحت الحالة b من الجدول (1).

- حساب التيار الموافق في الخط 3-5 للحالة b كما يأتي: يمكننا ذلك استناداً إلى نتائج الحسابات السابقة.

$$I_{53}^b = (Vb_5 - Vb_3) / Z_{53}$$

$$= (0.999734 - j0.023079) - (0.977822 - j0.088536) / j0.05$$

$$= 1.30914 - j0.438240 = 1.381 \text{ per unit}$$

ثانياً: تأثير انزياح التوليد من العقدة 5 إلى العقدة 1

- حساب القيمة المحتملة لمطال التيار الناتج في الخط 4-5 عند حدوث انزياح في

التوليد مقداره 45 MW من العقدة 5 إلى العقدة 1

لتسهيل المقارنة للنتائج نفترض أن التغيرات في استطاعة الدخل على العقد 5 و 1 بالميجاوات MW مساوية تماماً بالقيمة الواحدة للتغيرات الموافقة في التيارات المحقونة على هاتين العقدتين وهما:

$$\Delta I_1 = 0.45 + j 0.0 \text{ (p.u)}$$

$$\Delta I_5 = -0.45 + j0.0 \text{ (p.u)}$$

واستناداً إلى المعادلة (13) فإنَّ تغيير التيار في الخط 4-5 يتم حسابه كما يأتي :

$$\Delta I_{54} = K_{54,1} \Delta I_1 + K_{54,5} \Delta I_5$$

إذ:

$$K_{54,1} = \frac{Z_{51} - Z_{41}}{z_{54}} \quad \text{and} \quad K_{54,5} = \frac{Z_{55} - Z_{45}}{z_{54}}$$

باستبدال قيم الممانعات من مصفوفة ممانعات العقد  $Z_1$  المبينة في الشكل (14) نحصل

على عوامل توزيع تغيير التوليد على العقد 1 و 5:

$$K_{54,1} = \left( \frac{j5.011371 - j5.042198}{j0.08} \right) \quad K_{54,5} = \left( \frac{j5.026153 - j5.017056}{j0.08} \right)$$

$$= -0.38534 \quad = 0.11371$$

ومن ثَمَّ فإنَّ تغيير التيار المتنبأ به في الخط 4-5 هو:

$$\Delta I_{54} = -0.38534 \times (0.45 + j0.0) + 0.11371(-0.45 + j0.0)$$

$$= 0.225 + j0.0 \text{ p.u}$$

نحصل على القيمة المتنبأ بها للتيار  $I_{54}$  بإضافة هذا التغيير إلى تيار قبل الخروج  $I_{54a}$  المحسوب من حل الحالة الأساسية للجدول (1)

$$I_{45}^a = \frac{V_5^a - V_4^a}{Z_{54}} = \frac{(0.998498 - j0.054795) - (0.993653 - j0.045583)}{j0.08}$$

$$= -0.115150 - j0.060563 \text{ pu}$$

$$I_{54}^t = I_{45}^a + \Delta I_{45}^a = (0.005150 - j0.060563) + (-0.225 + j0.0)$$

$$= -0.340150 - j0.060563 = 0.345 \angle -170^\circ \text{ pu}$$

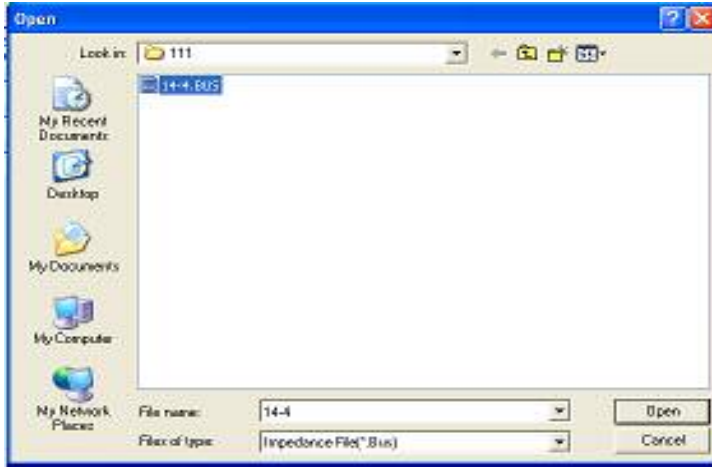
بالمحافظة على العقدة 1 على أنها عقدة مرجعية وتخفيض 45MW على العقدة 5 وهو التغيير الوحيد عن الحالة الأساسية، فإن حساب جريان الحمولة لتغيير الحالة يعطي النتائج المبينة في الجدول (1) تحت الحالة C التي نحسب منها القيمة الدقيقة للتيار  $I_{54}$ :  
 $I_{54c} = -0.342438 - j0.048275 = 0.346 \angle -172.0 \text{ pu}$

### 2-1-7: الحساب باستخدام البرنامج المنجز Security3

نطبق البرنامج Security 3 على نظام القدرة المرجعي المحسوب يدوياً لحالة خروج الخط 2-5 وذلك للتأكد من صحة نتائج حساب البرنامج المنجز.

#### - حساب مصفوفة ممانعات العقد لنظام القدرة باستخدام البرنامج Security3

بعد تشغيل البرنامج ندخل لنافذة  $Z_{bus}$  المبينة في الشكل (6) السابق ونقوم بإدخال قيم ممانعات عناصر نظام القدرة المرجعي شكل (13)، أو من خلال التعليلة (Open) من قائمة (File) واختيار ملف نظام القدرة المرجعي والمخزن سابقاً باسم 14-4-BUS كما هو مبين في الشكل (15)<sup>[2]</sup>



الشكل (15) اختيار ملف نظام القدرة قيد الدراسة

وبالضغط على مفتاح (Calc) لبرنامج حساب  $Z_{bus}$  المبين في الشكل (6) نحصل على مصفوفة ممانعات العقد  $Z_{bus}$  لنظام القدرة المرجعي والمبينة في الشكل (16).

Earth	1	2	3	4	5
1	0.0000+j5.0615	0.0000+j5.0000	0.0000+j5.0063	0.0000+j5.0422	0.0000+j5.0114
2	0.0000+j5.0000	0.0000+j5.0000	0.0000+j5.0000	0.0000+j5.0000	0.0000+j5.0000
3	0.0000+j5.0063	0.0000+j5.0000	0.0000+j5.0398	0.0000+j5.0095	0.0000+j5.0145
4	0.0000+j5.0422	0.0000+j5.0000	0.0000+j5.0095	0.0000+j5.0633	0.0000+j5.0171
5	0.0000+j5.0114	0.0000+j5.0000	0.0000+j5.0145	0.0000+j5.0171	0.0000+j5.0262

الشكل (16) مصفوفة ممانعات العقد لنظام القدرة المرجعي استناداً إلى Securty3

وهي مطابقة للمصفوفة المحسوبة يدويا لنظام القدرة الكهربائية المرجعي والمبينة في الشكل (14).

بالضغط على مفتاح (Return) نعود إلى الصفحة الرئيسية ونختار (Contingency)



- حساب توترات العقد:

ندخل قيم توترات العقد من خلال التعليمات (Open) من القائمة (File) ثم نختار الملف المطلوب ونقوم بادخاله كما في الشكل (17) فنحصل على قيم التوتر كما هو مبين في الجدول (2):



الشكل (17) إدخال قيم ملف التوتر لنظام القدرة

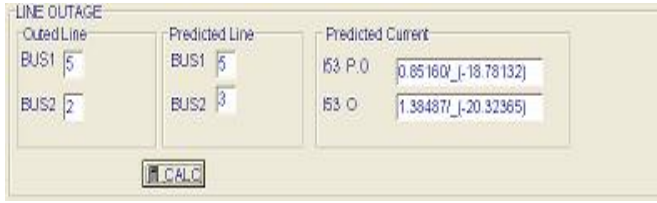
الجدول (2): توترات العقد استناداً إلى حسابات البرنامج Security3

VOLTAGE				
Bus No	1	2	3	4
Vre	1	0.98630	0.98478	0.99365
Vim	0	-0.08383	-0.09510	-0.0455

- حساب التيار في الخط 5-3 عند انقطاع الخط 5-2 :

ندخل أسماء العقد المحددة للخط المراد التنبؤ بتياره (5-3) وللخط الذي تعرض للانقطاع (5-2) ثم نضغط (Calc) فنحصل على قيمة التيار المحتمل في الفرع 5-3

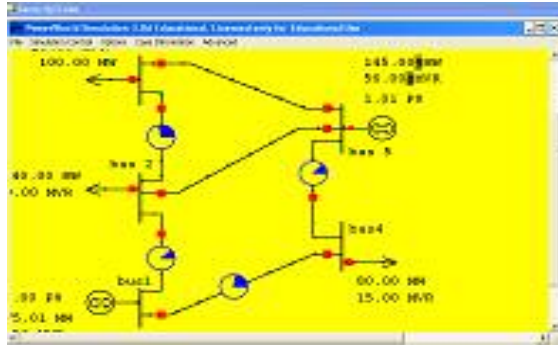
في أثناء انقطاع الخط 5-2 كما في الشكل(18). عند وجود تحميل زائد على الخط المحدد تظهر رسالة إنذار من قبل البرنامج بذلك



الشكل(18) نتائج حساب البرنامج Security3 للتيار المتوقع I53,52

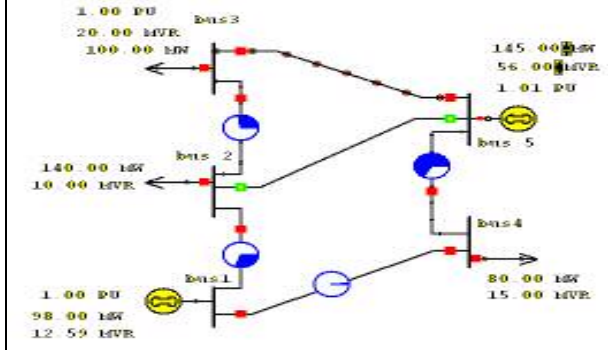
### 3-1-7: استخدام البرنامج Power World

بالضغط على أيقونة Power World في الواجهة الرئيسية لبرنامج Security3 ننقل إلى بيئة برنامج PW<sup>[6]</sup> من خلال وصلة ربط (link) مع برنامجنا Security3 قمنا ببرمجتها للاستفادة من هذا البرنامج في تمثيل جريان الحموله في أثناء حالات الانقطاع أو حدوث خلل في التوليد، حيث قمنا بتمثيل نظام القدرة الكهربائية للشبكة المرجعية بالاستفادة من مكتبة العناصر الجاهزة التي يوفرها برنامج PW ثم اختيار معطيات عناصر النظام بالضغط على كل عنصر بزر الماوس الأيمن لانتقاء القيمة المرغوب فيها، وقد قمنا بتمثيل الشبكة المرجعية لحالة انزياح التوليد من العقدة 5 إلى العقدة 1 حيث نستطيع تغيير استطاعة المولد من خلال الأسهم الموضوعه بجانبه وحصلنا على تمثيل برنامج Power World للشبكة المرجعية كما هو مبين في الشكل(19)<sup>[6]</sup>



الشكل(19) تمثيل الشبكة المرجعية باستخدام برنامج Secur3/Power World

نستطيع أيضا قطع أي خط من خطوط نظام القدرة من خلال القواطع الموجودة عند نهايته. يبين الشكل (20) تمثيلاً لشبكة المثال المرجعي المبينة في الشكل (19)، وفيها الخط 2-5 مقطوع والجريان في الخط 3-5 قد تغير بسبب هذا الانقطاع.



الشكل(20) تمثيل جريان خطوط نظام القدرة المرجعي عند انقطاع الخط 2-5

### 2-7 تطبيق البرنامج Security3 على الشبكة السورية 230-400 kv

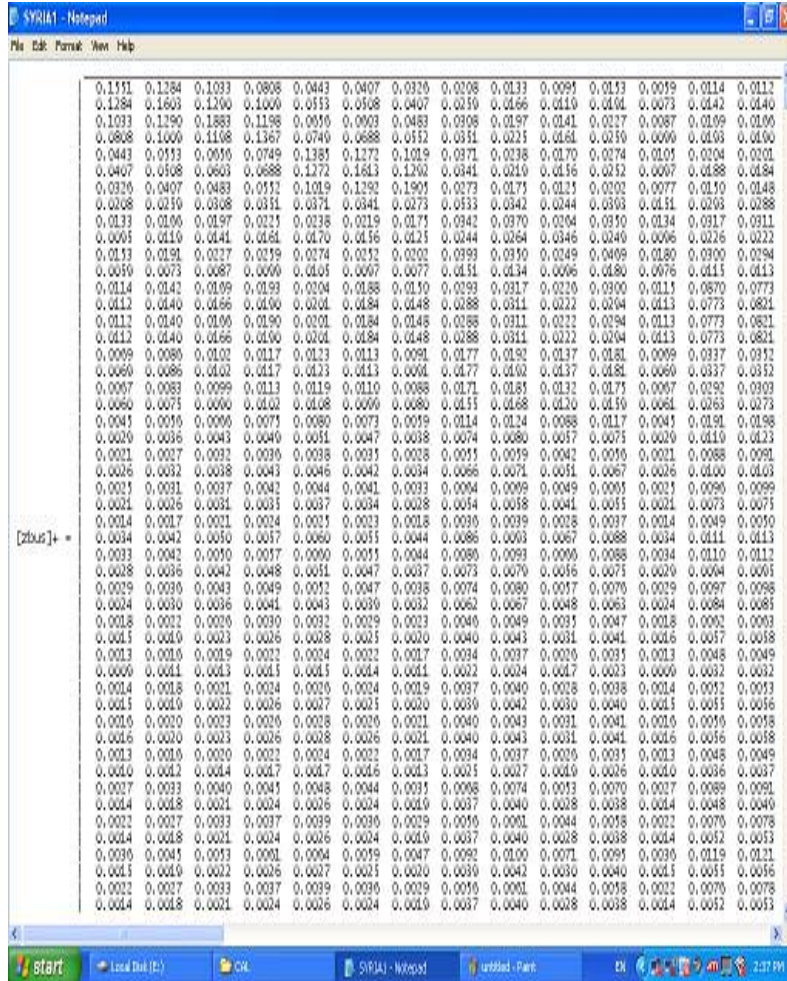
نحتاج من أجل تطبيق برنامج Security3 على الشبكة السورية 230-400KV الى تشكيل مصفوفة ممانعات العقد  $Z_{bus}$  بطريقة الخطوة -خطوة. يبين الشكل (21) جزءاً من ملف الدخل لعقد الشبكة السورية وخطوطها، حيث بلغ عدد عقدها 55 عقدة وعدد فروعها 97 فرعاً. [1]

Branch No	47	48	49	50
Bus1	47	48	49	50
Bus2	43	41	45	46
Type	Single Lim	Single Lim	Single Lim	Single Lim
Rank	0	0	0	0
X1	0.0988	0.0937	0.0012	0.0749

الشكل(21) ملف معطيات الدخل للشبكة السورية 230/400 kv

تطوير خوارزمية وبرنامج Security3 لتحليل الأحداث المحتملة على نظام القدرة الكهربائية باستخدام مصفوفة ممانعات العقد  $Z_{bus}$

عند إعطاء الأمر التنفيذي للبرنامج Zcalc نحصل على مصفوفة ممانعات العقد للشبكة السورية والمبينة في الشكل(22). واستناداً إلى هذه المصفوفة يمكننا إنجاز حسابات الأمان لأي خط من خطوط الشبكة بمجرد تحميل الملف SYRIA1.dat.



الشكل(22) مصفوفة ممانعات العقد  $Z_{bus}$  للشبكة السورية 230/400 kv استناداً إلى Security3

## 8- النتائج والتوصيات:

1- قمنا من خلال هذا البحث بتصميم خوارزمية وبرنامج Security3 لدراسة أمان نظام القدرة الكهربائية من خلال دراسة جريان التيار في فروع الشبكة في أثناء الأحداث المحتملة المتمثلة بانقطاع خط أو تغيير في التوليد واستناداً إلى مصفوفة ممانعات العقد  $Z_{bus}$ .

2- استناداً إلى الخوارزمية والبرنامج المنجز فإن ملف الدخل هو ممانعات الفروع وتوترات العقد الابتدائية والاستطاعة التي تستطيع أن تنقلها الفروع المختلفة، أما ملف الخرج فهو مصفوفة ممانعات العقد  $Z_{bus}$  وعوامل التوزيع للخطوط وتوترات العقد المختلفة، والتيارات الخطوط بعد حدوث الحالة المحتملة والتي تنتج إما عن انقطاع خط أو تغيير في التوليد.

3- لدى مقارنة النتائج بالنتائج المحسوبة بالطرائق الدقيقة فإن نسبة الخطأ مقبولة ويمكن الاعتماد عليها، ومن ثمّ يمكن استخدام النظام البرمجي المنجز Security3 لتقويم أمان أي نظام قدرة إذا توافرت معلومات الدخل المطلوبة.

4- يعطي هذا البرنامج صورة مسبقة عن وضع الشبكة في حالة الأعطال قبل حدوثها فعلاً.

5- النظام البرمجي المنجز قابل للتطوير وفق الاتجاهات الآتية:

- أ- تحليل الأمان لأحداث محتملة مركبة Analysis of Multiple Contingences
- ب- تطوير خوارزمية لحسابات تقدير الأمان بحيث تأخذ في الحسبان الجريان الردي.
- ت- تطوير خوارزمية لاقتراح الإجراءات التصحيحية لإستراتيجية التوليد بهدف التخفيف- ما أمكن - من حالات التحميل الزائد للخطوط في أثناء الحالات المحتملة.

### References

- [1] Ali Hamzzeh, Khaled Zaidan “An Expert system For Off-Line and On-Line Fault Diagnosis”, First International Conference ICTTA'04 IEEE, Damas.2004.
- [2] Ali Hamzzeh, Khaled Zaidan “Contingency Analysis and Power System Security”, Damascus University, 2004.
- [3] Hadi Saadat, “Power System Analysis”, WCB McGraw- Hill 1999.
- [4] Grainer John J.– Stevenson, JR William D. “Power System Analysis”, McGraw- Hill 1994.
- [5] Weedy B.M, “Electric Power System”, John Wiley& Sons, 1983.
- [6] Power World Corporation, “PW, Power World program package” South Wright St., Urbana, 2004

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق: 2008/12/30.