طريقة خطية لحساب الاستطاعة الردية للمولدات التزامنية المربوطة على الشبكة الكهربائية

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

الملخص

يتعرض هذا البحث إلى طريقة جديدة لتحديد الاستطاعة الردية المسموحة للمولدات التزامنية المربوطة إلى عقد التوليد في الشبكة الكهربائية، وذلك اعتماداً على الاستطاعة الفعلية والتوتر والتيار المسموح به لكل من الثابت والدائر بالإضافة إلى المعطيات الأخرى للمولد، ويقدم تحليلاً لمعادلات الثابت والدائر وللعوامل التي تؤدي دوراً في تحديد قيمتيهما كالقوة المحركة الكهربائية الداخلية ومميزات اللاحمل للآلة التزامنية ومدى تأثيرها في مركبات التيارالتي يتم على أساسها تعيين الحدود المسموحة لتغيّر الاستطاعة الردية [Q_{max} , Q_{min}]للمولدات في عملية تنظيم التوتر لعقد الشبكة الكهربائية. كما تم في سياق البحث وضع الألغوريتم اللازم لحساب الاستطاعة الردية المسموحة لكل من المولد ذي الدائر الأسطواني والمولد ذي الأقطاب البارزة عند قيم مختلفة للتوتر والاستطاعة الفعلية المستجرة.

يتميز الألغوريتم بالبساطة وسهولة البرمجة إذ إنه لا يعتمد على طرق التكرار المعروفة، كما أنه يتميز بالفعالية حيث تشير نتائج الحسابات التي أُجريت على مولدات وباستطاعات مختلفة مربوطة إلى قضبان تجميع الشبكة الكهربائية إلى أن استخدام قيم مجال الاستطاعة الردية [Q_{max} , Q_{min}] الناتجة عن هذه الطريقة ضمن معطيات الدخل لبرامج حسابات جريان الحمولة يحافظ على تقارب عمليات التكرار في مثل هذه البرامج.

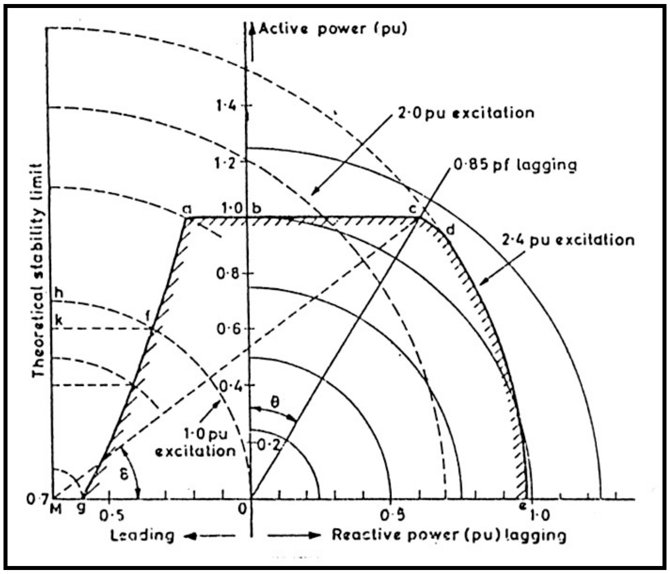
1 ـ مقدمة:

من المعروف أن عملية تثبيت التوتر في عقد الشبكة الكهربائية تقوم بها بشكل أساسي منظمات دارات التهييج للمولدات المتزامنة في محطات التوليد، وهذه العملية ممكنة ما دامت قيمة تيار الثابت والـدائر للمولدات تقع ضمن المجال المسموح به حيث تتعلق القيم العليا لهذا المجال بطريقة تبريد الملفات. أما القيم الدنيا فترتبط بالاستقرار وإمكانية انهياره في حال انخفاض قيمة تيار التهييج عن حد معين. عنـد حدوث زيادة في قيم التيارات يتم تخفيض مستوى التهييج، وذلك يؤدي إلى انخفاض التوتر ومـن ثـم مستوى الاستطاعة الردية المولدة في الشبكة والعكس بالعكس، إذ إن زيادة التهييج تؤدي إلـى زيـادة الاستطاعة الردية. من هنا فإنه في عملية تنظيم التوتر يمكن الاستعاضة عن الحدود المسموحة لتغيّـر تيارات الثابت والدائر بالحدود المسموحة لتغيّر الاستطاعة الردية [Q_{min} , Q_{max}].

وفي برامج جريان الحمولة (Load flow programs) يعبر عن تلك الحدود بقيم ثابتة في عقـد التوليد التي تمثل بالاستطاعة الفعلية P وطويلة التوتر U، أما الاستطاعة الردية لهذه العقـد فتفـرض قيماً ابتدائية لها ويجري تدقيقها بعد ذلك من خلال عمليات التكرار. إذا وصلت الاستطاعة الردية فـي عقدة ما إلى القيمة الحدية العليا Q_{max} أو الدنيا Q_{min} فإنه يتم إلغاء تثبيت طويلة التوتر في تلك العقدة، كذلك يجري تغيير شرط تقارب عمليات التكرار إذ إن عقدة التوليد تتحول عند ذلك إلى عقدة من نوع P-Q الأمر الذي يؤدي إلى تغيير تركيبة المعادلات اللاخطية لنظام القدرة الكهربائية[1,2].

تتوافر في الوقت الحاضر عدد من الطرق البيانية والتحليلية لحساب الاسـتطاعة الرديـة المسـموحة العظمى Q_{max} التي يمكن للمولد إعطاؤها عند قيمة معينة للاستطاعة الفعلية والتوتر دون حدوث زيادة في التحميل لكل من تيار الثابت والدائر مثل مخطط تشغيل المولد (Operating chart)، المبين في الشكل(1)، وتساوي الاستطاعة الردية الصغرى قيمة الاستطاعة الردية التي يمكن للمولد إعطاؤها في الشروط السابقة ولكن في حالة التهييج الناقص[3]:

$$Q_{min} = -Q_{max} = | Q_{max} |$$



الشكل 1. مخطط التشغيل للمولد التزامني

وجميع الطرق التحليلية تعتمد على إعطاء قيم ابتدائية للاستطاعة الردية للمولد التزامني، ومن ثم تدقيق هذه القيم بواسطة طرق التكرار(Iterative methods). إن استخدام تلك الطرق تفرضه العلاقة اللاخطية بين تيار الدائر والقوة المحركة الكهربائية، وهذا الأسلوب يحتاج إلى جهد حسابي كبير وخاصة في النظم الحديثة التي تحوي عدداً كبيراً من عقد التوليد.

في هذا البحث نعرض لطريقة بسيطة وسهلة البرمجة لحساب الاستطاعة الردية المسموحة للمولد؛ وذلك بالاعتماد على الاستطاعة الفعلية P والتوتر U والقيمة المسموحة لكل من تيار الثابت I_{sta} والدائر I_{ra} بالإضافة إلى قيم المحددات الأخرى للمولد.

2 ـ الأسس النظرية

2 ـ 1 حساب الاستطاعة الردية المسموحة للمولد ذي الدائر الأسطواني:

بأخذ شعاع التوتر كشعاع المرجع فإنه يمكن كتابة تيار الثابت (Stator current) بالشكل التالي:

$$I_{st} = I_1 - jI_2 \qquad (1)$$

حيث: I_1: المركبة الحقيقية لتيار الثابت

I_2: المركبة التخيلية لتيار الثابت

وذلـك كمـا هـو مبـين فـي المخطـط الشـعاعي للآلـة التزامنيـة ذات الـدائر الأسـطواني، شكل (2).

في الطريقة المقترحة لايتم تحديد الاستطاعة الردية المسموحة مباشرة، وإنما قيمة مركبة التيار الموافقة لها I_2 انطلاقاً من القيمة المسموحة لتيار الثابت والقيمة المسموحة لتيار الدائر.

في الحالة الأولى تحسب I_2 من العلاقة (1) على أن نستبدل التيار I_{st} بالقيمة المسموحة لتيار الثابت I_{sta} أي:

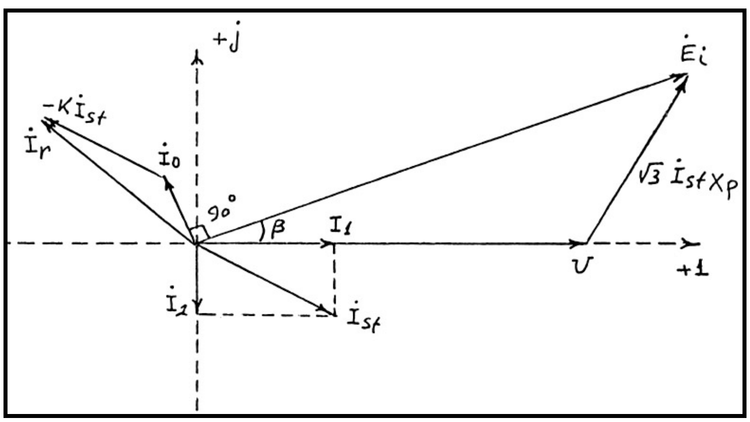
$$I_{2st} = \sqrt{I_{sta}^2 - I_1^2} \qquad (2)$$

$$I_1 = P/\sqrt{3}U \qquad (3)$$

حيث:

P : استطاعة الخرج الفعلية للآلة التزامنية

U : توتر خرج الآلة



الشكل 2. المخطط الشعاعي للمولد التزامني ذي الدائر الأسطواني

أما تحديد قيمة I_2 انطلاقاً من القيمة المسموحة لتيار الدائر فلا يخلو من بعض التعقيد. إن تيار الـ دائر وكما هو معلوم يعطى بالعلاقة[4]:

$$\dot{I}_r = \dot{I}_o - k.\dot{I}_{st} \tag{4}$$

حيث:

$\dot{I}_o$: تيار التهييج اللازم لتوليد القوة المحركة الكهربائية E_i

k: عامل يأخذ بالحسبان تأثير تيار الثابت في تيار الدائر

بفرض أن: $\overset{*}{I}_r = I_0 / I_{01}$

حيث:

I_{o1}: تيار التهييج الموافق للتوتر الاسمي في حالة اللاحمل

ومن ثم يمكن أن نكتب وبالكميات الواحدية:

$$\overset{*}{I}_r = f(E_i / U_n) \tag{5}$$

من ذلك نحصل على:

$$I_o = I_{o1}\, f(E_i / U_n) \tag{6}$$

ومن المخطط الشعاعي المبين بالشكل (2) لدينا:

$$\dot{I}_o = I_o e^{j(\beta+90)} = j I_o e^{j\beta} = jI_{o1} f(Ei / U_n) e^{j\beta} \tag{7}$$

ولتحديد β نستخدم العلاقة:

$$\dot{E}_i = U + j\sqrt{3} I_{st} X_p$$

$$\dot{E}_i = U + \sqrt{3} I_2 X_p + j\sqrt{3} I_1 X_p \tag{8}$$

حيث:

E_i: القوة المحركة الكهربائية الداخلية للمولد

X_p: مفاعلة بوتيير والتي تزيد عن مفاعلة التشتت بقليل نتيجة لزيادة التشـتت عنـد تحميـل المولد

من هنا:

$$e^{j\beta}=\dot{E}_i/E_i=(U+\sqrt{3}I_2X_p+j\sqrt{3}I_1X_p)/E_i \quad (9)$$

وتعود الصعوبة في تحديد I_2 انطلاقاً من القيمة المسموحة لتيار الدائر إلى العلاقة اللاخطية بين القـوة المحركة الكهربائية الداخلية E_i وتيار الدائر I_r. وللتغلب على هذه المشكلة تستخدم طريقـة التقريـب المتتالي ضمن مجال معين لمميزات اللاحمل في العلاقة (5)، وذلك للحصول على علاقـة رياضـية تحليلية ذات دقة مقبولة وحساسية ضعيفة تجاه الخطأ في تعيين (E_i / U_n) [4].

في المنطقة غير المشبعة تُستبدل مميزات الآلة بعلاقة خطية تمـر مـن النقطتـين $E_i = 0$ و $E_i = 1$ (بالكميات الواحدية) أي:

$$\overset{*}{I}_r = E_i / U_n$$

وفي المنطقة التي يؤثر فيها التشبع على أداء الآلة التزامنيه مـن $E_i = 1$ إلـى $E_i = 1.5$ تُسـتبدل المميزات بكثير حدود من الدرجة الثالثة:

$$\overset{*}{I}_r = a_3(E_i / U_n)^3 + a_2(E_i / U_n)^2 + a_1(E_i / U_n) + a_0 \quad (10)$$

حيث: $a_0 = 3.4$, $a_1 = -4.3$, $a_2 = 0$ $a_3 = 1.87$,

وتتـــراوح نســـبة الخطـــأ النـــاجم عـــن تطبيـــق هـــذه العلاقـــة فـــي مجـــال العمـــل $(Ei / Un = 1 \div 1.5)$ بين 2% و 3%.

بتعويض العلاقات (1) و(7) و(9) في (4) نحصل على:

$$\dot{I}_r=jI_{01}\overset{*}{I}r\,(U+\sqrt{3}I_2X_P+j\sqrt{3}I_1X_P)/E_i-KI_1+jKI_2 \quad (11)$$

من ذلك نجد:

$$I_r=\sqrt{I_1^2\left[(\sqrt{3}X_pI_{01}\overset{*}{I}r)/E_i+K\right]^2+\left[(I_{01}\overset{*}{I}r/E_i)(U+\sqrt{3}X_pI_2)+KI_2\right]^2}$$

(12)

وبتعويض العلاقة (10) في (12) وإجراء بعض العمليات الحسابية يصبح لدينا:

$$I_r = \sqrt{(A+BI_2)^2 + (C+DI_2)^2} \qquad (13)$$

حيث:

$$A = \sqrt{3} X_p I_1 I_{01} (1.87U^2/U_n^3 - 4.3/U_n + 3.4/U) + KI_1$$

$$B = 3 X_p^2 I_1 I_{o1} (3.78U / U_n^3 - 2.61 / U^2)$$

$$C = I_{o1} U (1.87U^2 / U_n^3 - 4.3 / U_n + 3.4 / U) \qquad (14)$$

$$D = \sqrt{3} I_{01} X_p (3.78U^2/U_n^3 - 2.61/U^2 + 1.165/U_n + K$$

وباستبدال قيمة I_r في العلاقة (13) ب I_{ra} فإننا نحصل على علاقة ل I_2 بدلالة القيمة المسموحة لتيار الدائر:

$$I_{2r} = \left[-(AB+CD) + \sqrt{(AB+CD)^2 - (B^2+D^2)(A^2+C^2-I_{ra}^2)} \right] / (B^2+D^2)$$

(15)

وبمقارنة قيمتي I_2 المحسوبتين وفقاً للعلاقتين (2) و (15) واختيار القيمة الدنيا كقيمة مسموحة $I_{2a} = \min(I_{2st}, I_{2r})$ فإننا نستطيع بسهولة حساب الاستطاعة الردية المسموحة للمولد:

$$Q_{max} = \sqrt{3}\, UI_{2a} \qquad (16)$$

$$Q_{min} = -Q_{max}$$

وبهذا نكون قد حصلنا على علاقات رياضية لحساب الاستطاعة الردية المسموحة بخطوة واحدة ودون الحاجة لاستخدام طرق التكرار.

2 ـ 2 حساب الاستطاعة الردية المسموحة للمولد ذي الأقطاب البارزة:

هنا أيضاً لن نقوم بحساب الاستطاعة الردية المسموحة مباشرة وإنما قيمة مركبة التيار I_2 انطلاقاً مـن القيمة المسموحة لكل من تيار الثابت والدائر.

لما كانت معطيات الدخل في هذه الحالة مماثلة لتلك التي في المولد الأسطواني من حيـث الاسـتطاعة والتـوتر وبأخـذ التـوتر كشـعاع مرجـع، وعلـى اعتبـار أن تيـار الثابـت $I_{st}= I_1 - jI_2$ فإنه يمكن حساب المركبة I_2 انطلاقاً من القيمة المسـموحة لتيـار الثابـت بواسـطة العلاقة(2).

أما بالنسبة لتيار الدائر فإنه يعطى بالعلاقة:

$$\dot{I}_r = I_o + k\, I_d \qquad (17)$$

وذلك استناداً إلى المخطط الشعاعي للآلة التزامنية ذات الأقطاب البارزة حيث:

I_d: مركبة تيار الثابت على المحور الطولي

بشكل مماثل للعلاقة (6) نستطيع أن نكتب:

$$\overset{*}{I}r = I_0/I_{01} = f(E_{id}/U_n) \qquad (18)$$

$$I_0 = I_{01}\, f(E_{id}/U_n) \qquad (19)$$

حيث:

E_{id}: شعاع القوة المحركة الكهربائية على المحور العرضي

وتحسب القيمـة I_r وفقـاً لميـزات اللاحمـل للآلـة التزامنيـة ضـمن المجـال الفعلـي لتغيـر (E_{id} / U_n) وبنسبة خطأ لاتتجاوز %3 ÷ 2 بواسطة العلاقة التقريبية التالية[5]:

$$\overset{*}{I}r = (2E_{id}/U_n) - 1 \qquad (20)$$

من المخطط الشعاعي للآلة ذات الأقطاب البارزة لدينا:

$$I_d = I_1 \sin\delta + I_2 \cos\delta \qquad (21)$$

حيث:

δ: زاوية الحمولة بين شعاع التوتر وشعاع القوة المحركة الكهربائية $\dot{E}_i$

$$tg\delta = \sqrt{3} I_1 X_q / (U + \sqrt{3} I_2 X_q) \qquad (22)$$

ومن ثم ومن المخطط الشعاعي نحصل على:

$$E_{id}=U\cos\delta+\sqrt{3}I_dX_p = \\ =\cos\delta(U+\sqrt{3}I_2X_p+3I_1^2X_qX_p/(U+\sqrt{3}I_2X_q)) \quad (23)$$

بتعويض العلاقة (19) في العلاقة (17)مع الأخذ بالحسبان العلاقـات (22)و (23) و باسـتبدال I_r بالتيار المسموح به I_{ra} نحصل على:

$$AI_2^2+BI_2+C=0 \quad (24)$$

حيث:

$$A = 6(I_{o1} / U_n)X_pX_q + \sqrt{3}\,kX_q$$

$$B = 2\sqrt{3}\,(I_{o1}U / U_n)(X_q+X_P)+kU- 0.985\sqrt{3}\,X_q(I_{o1}+I_{ra})$$

$$C = I_1^2\,X_q(6I_{o1} / U_n)X_p + \sqrt{3}\,k) - 0.268\sqrt{3}\,I_1X_q(I_{o1}+I_{ra}) - \\ - 0.985U(I_{o1}+I_{ra}) + I_{o1}U^2 / U_n$$

وبحل المعادلة (24) نحصل على قيمة المركبة I_2 انطلاقاً من القيمة المسموحة لتيار الدائر:

$$I_{2r} = (-B+\sqrt{B^2 - 4AC}\,) / 2A \quad (25)$$

بمقارنة العلاقتين (2) و (25)نحصل على القيمة المسموحة:

$$I_{2a} = \min(I_{2st}, I_{2r})$$

ومن ثم الاستطاعة الردية المسموحة للمولد ذي الأقطاب البارزة:

$$Q_{max} = \sqrt{3}\,UI_{2a} \quad (26)$$

$$Q_{min} = -Q_{max}$$

وبهذا نكون قد حصلنا على علاقات رياضية مقبولة لتحديد الاستطاعة الردية المسـموحة للمولـد ذي الدائر الأسطواني وذي الأقطاب البارزة دون الحاجة لاستخدام طرق التكرار.

3 ـ الدراسة الحاسوبية والنتائج الحسابية:

استناداً إلى الطريقة المقترحة تم إعداد برنامج على الحاسب لحساب الاسـتطاعة الرديـة المسـموحة للمولدات التزامنية المربوطة إلى قضبان التجميع في الشبكة الكهربائية عند قيم مختلفة للتوتر، المخطط الانسيابي لهذا البرنامج مبين بالشكل(3).

يتم أولاً قراءة بيانات الدخل من استطاعة اسمية وتوتر وغيرها من معطيات المولد وحساب مركبـات تيار الثابت I_1 , I_{2st}، الخطوات(1،3).

ثم يحدد نوع المولد سواء أكان ذا دائر أسطواني أم ذا أقطاب بارزة وحساب المركبة التخيليـة لتيـار الدائر I_{2r} وفقاً للمعادلة الخاصة بكل مولد، الخطوات(4،5).

يجري بعد ذلك المقارنة بين قيمتي المركبة التخيلية المحسوبتين انطلاقاً من القيمة المسموحة لكل مـن تيار الثابت وتيار الدائر واختيار القيمة الصغرى، من ثَم حساب الاستطاعة الردية المسـموحة للمولـد الموافقة لقيمة التيار تلك، الخطوات(6،7).

أما الخطوات (2،8،9) فهي عبارة عن حلقة لدراسة تغير الاستطاعة الردية المسموحة للمولد ضـمن مجال معين للتوتر والاستطاعة على أن يتم إقلاع البرنامج في هذه الحالة بشكل مستقل عـن برنـامج جريان الحمولة وتزويد الحاسب بقيم بداية المجال P_1,U_1 ونهاية المجال P_2,U_2. وأخيراً تتم طباعـة النتائج، الخطوة(10).

عنـد اسـتخدام البرنـامج بشـكل مسـتقل فـإن نتـائج الحسـابات تطبـع علـى شـكل جـدول $Q_{max}= f(P, U)$ يمكن استخدامه عند تحضير بيانات حسابات جريان الحمولة، ولزيـادة الوضـوح يمكن إعطاء النتائج بشكل منحنيات بيانية.

وفي حال ربط البرنامج مباشرة مع برنامج جريان الحمولة فإنه عوضاً عن الجدول يتم تعيـين قيمـة محددة للاستطاعة الردية المسموحة والموافقة لدارة مكافئة محددة لنظام القدرة الكهربائية مـن حيـث التوتر والاستطاعة الفعلية بالإضافة إلى المحددات الأخرى للنظام.

يتم تحديد القيمة المسموحة لكل من تيار الثابت والدائر بواسطة العلاقات التالية:

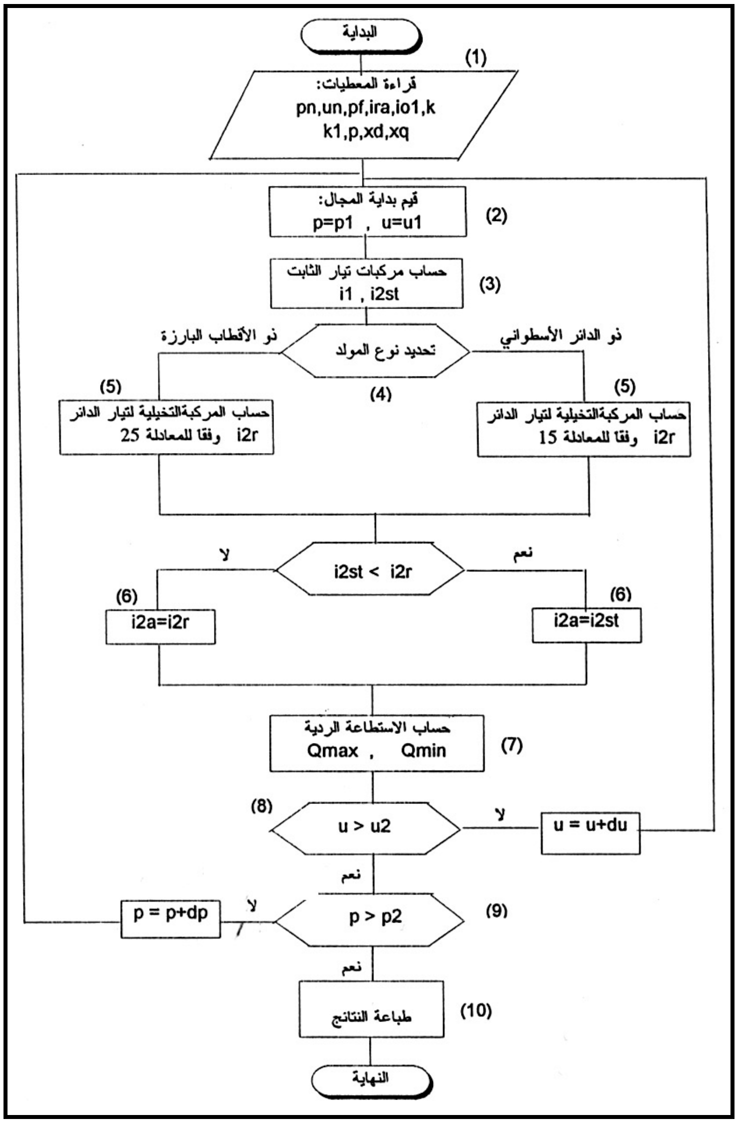
$$I_{sta} = k_{st}\, I_{stn}$$
$$I_{ra} = k_{ra}\, I_{rn}$$

حيث:

I_{stn}: تيارالثابت الاسمي

I_{rn}: تيار الدائر الاسمي

k_{st}, k_{ra} : عوامل تأخذ بالحسبان درجة التحميل لكل من ملفات الثابت والدائر.



الشكل 3. المخطط الإنسيابي لبرنامج حساب الاستطاعة الردية المسموحة للمولد

وقد استُخدم البرنامج المعد لدراسة تغير الاستطاعة الردية المسموحة لمولد متواقت ذي دائر أسطواني بالمواصفات التالية:

$$P_n = 300\ MW\ ,\ U_n = 20\ KV\ ,\ I_r = 3.05\ KA$$

$$\cos\varphi = 0.85\ ,\ k = 0.176\ ,\ X_d = 1.698\ P.U\ ,\ X_p = 0.21\ P.U$$

وذلك في مجال محـدد لتغيـرات التـوتر [90÷110%] ومجـال محـدد لتغيـرات الاسـتطاعة الفعلية[0÷100%] ونتائج الحسابات مبينة بالجدول(1).

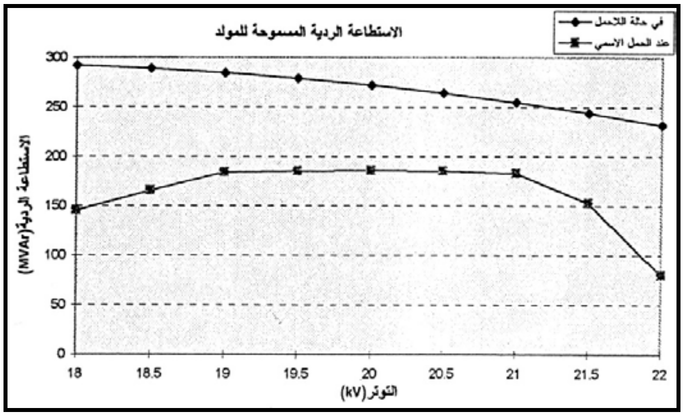
الجدول1. تغير الاستطاعة الردية المسموحة للمولد بتغير التوتر والاستطاعة الفعلية

Permissible limit of generator reactive power

P(MW) \ U(KV)	18.000	18.500	19.000	19.500	20.000	20.500	21.000	21.500	22.000
0	292.230	289.060	284.720	279.150	272.330	264.233	254.830	244.100	232.0
50	289.750	286.710	282.480	277.010	270.290	262.280	252.960	242.310	230.3
100	282.240	279.580	275.700	270.550	264.120	256.380	247.310	236.890	225.1
150	269.450	267.470	264.190	259.600	253.680	246.410	237.770	227.750	216.3
200	250.930	249.970	247.620	243.860	238.710	232.130	224.130	214.700	203.8
250	220.780	226.440	225.420	222.860	218.780	213.180	206.070	197.460	184.3
300	145.750	165.850	184.240	185.500	185.920	185.500	183.090	152.920	80.4

يلاحظ من هذا الجدول أن المولد في حالة اللاحمل يتحول إلى مولد للاستطاعة الردية، وبزيادة التوتر تتناقص الاستطاعة الردية المسموحة، شكل(4)، وذلك نتيجة لزيادة تحميل ملفات التهييج. وعند زيادة استطاعة خرج المولد ($0 < p < P_n$) فإن هذه الزيادة تتم على حساب الاستطاعة الرديـة المولـدة نتيجة لزيادة زاوية التحميل وتحسن عامل الاستطاعة[6].

وعند الوصول إلى الاستطاعة الفعلية الاسمية $P = P_n$ فإننا نلاحظ تغيراً في قيم الاسـتطاعة الرديـة المسموحة ويعود السبب في ذلك إلى أن معظم القيم في هذه الحالة (القيم المشار إليها ب * في الجدول الوارد في الشكل 4) تتحدد بعلاقة I_2 انطلاقاً من القيمة المسموحة لتيار الثابت.



التوتر kV	الاستطاعة الردية المسموحة للمولد(MVAr)	
	في حالة اللاحمل	عند الحمل الاسمي
18	292.23	145.75
18.5	289.06	165.85
19	284.72	184.24
19.5	279.15	185.5
20	272.33	185.92
20.5	264.233	185.5
21	254.83	183.09
21.5	244.1	152.92
22	232.02	80.41

الشكل 4. الاستطاعة الردية المسموحة للمولد التزامني ذي الدائر الأسطواني في حالة اللاحمل وعند الحمل الاسمي (300 MAV – 20 KV)

وتجدر الإشارة إلى أن الاستطاعة الفعلية عند معامل تحميل معين أُعتبرت ثابتة عند انحراف التـوتر بمقدار ±5% عن كل قيمة من قيم مجال الدراسة.

أماقيمة k_{st} فإنه يتم اختيارها وفقاً للجدول(2)، علماً أن فترات زيادة التحميل المسموحة وفقـاً للـنظم القياسية تتراوح بين 20 و 60 دقيقة. وتتعلق قيمة المعامل k_{st} لكل فترة بنوع وسيط التبريد المستخدم لملفات الثابت [7].

ومن ثَم بالنسبة للمولد ذي الدائر الأسطواني موضوع الدراسة وعند انخفاض التوتر إلى قيمة أقل مـن $0.9U_n$ فإن تيار الثابت يبقى ثابتاً ومساوياً إلى $1.05\ I_n$ مع العلم أن الانخفاض المفرط لتوتر المولـد

يؤثر سلباً في استقراره، وفي حال ارتفاع التوتر إلى قيمة أكبر من $1.1U_n$ فإن تيار الثابت كذلك يبقى ثابتاً ومساوياً إلى $0.8\ I_n$.

الجدول 2.

التوتر % من التوتر الاسمي	تيار الثابت المسموح به % من التيار الاسمي	
	المولد ذو الدائر الأسطواني	المولد ذو الأقطاب البارزة
90	105	-
95	105	105
100	100	100
105	95	95
106	92.5	92.5
107	90	90
108	86.5	87
109	83.5	84.5
110	80	82

وفي البرنامج المعد تُستخدم القيم المعطاة بالجدول (2) وقيم مقربة لها بشكل خطي في حال اختلاف قيم التوتر عن تلك المعطاة في الجدول.

أما بالنسبة لتيار الدائر فقد أعتبرت زيادة التحميل المسموحة 5%، ومن ثَمّ فإن $k_r = 1.05$.

كما تم إجراء دراسة مشابهة لحساب الاستطاعة الردية المسموحة للمولد في محطة توليد التيّم في الشبكة السورية وهو مولد ذي دائر أسطواني وبالمواصفات التالية:

$$S_n = 42\ MVA\ ,\ U_n = 10.5\ KV\ ,\ I_r = 175.6\ A$$

$$\cos\varphi = 0.8\ ,\ X_d = 2.22\ P.U\ ,\ X_p = 2.16\ P.U$$

نتائج الحسابات لحالتي اللاحمل وعند الحمل الاسمي مبينة في الجدول (3):

الجدول 3. تغيرالاستطاعة الردية المسموحة لمولد محطة توليد التّيم

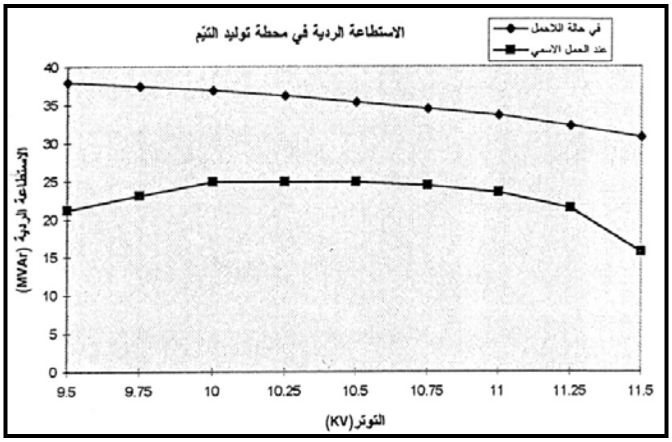
Permissible limit of Altayem generator reactive power

U(Kv) / P (Mw)	9.500	9.750	10.000	10.250	10.500	10.750	11.000	11.250	11.500
0	38.000	37.450	36.930	36.240	35.380	34.500	33.670	32.300	30.8
34	21.200	23.110	24.900	24.900	24.910	24.420	23.500	21.490	15.7

ويتضح من النتائج أن تغير الاستطاعة الردية المسموحة بتغير التوتر، شكل(5)، تماثل تلك التي للمولد السابق ولكن بنسبة أقل وبدرجة انحراف أقل نظراً لصغر الاستطاعة لهذا المولد.

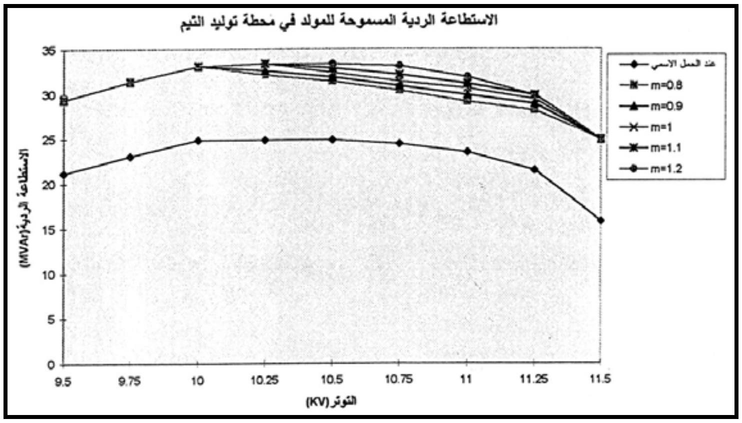
كذلك قمنا بإجراء سلسلة من الحسابات على مولد محطة توليد التّيم لتبيان أثر تغيرمفاعلة بوتيير في الاستطاعة الردية المسموحة للمولد، النتائج مبينة بالشكل (6)، ومنه نلاحظ أن تغير مفاعلة بوتيير بمقدار 40% في المجال $mX_p = (0.8 \div 1.2)\ X_p$ يرافقه تغير في الاستطاعة الردية المسموحة بنسبة لاتتجاوز 10% عند استطاعة فعلية $p = 0.833\ p_n$ وتوتر $U = (1.025 \div 1.05U_n)$ أما عند القيم الأخرى للتوتر فإن هذا التأثير يقل بصورة ملحوظة. عند الحمل الاسمي وبتغيير التوتر فإن الاستطاعة الردية تُحدد انطلاقاً من القيمة المسموحة لتيار الثابت (المنحني السفلي من الشكل 1) ومن ثَم لايُظهر تغير مفاعلة بوتيير في هذه الحالة أي أثر في نتائج الحسابات.

وبغية معرفة تأثير مجال الاستطاعة الردية المسموحة $[Q_{max} , Q_{min}]$ المحدد بواسطة الألغوريتم المقترح في تقارب عمليات التكرار لبرنامج جريان الحمولة قُمنا بإجراء دراسة لجريان الحمولة على الشبكة السورية 400 KV - 230 المبينة بالشكل (7)، وتتألف هذه الشبكة من 47 عقدة و 77 خطاً واستُخدم لهذه الغاية برنامج جريان الحمولةOPF (شركة كهرباء فرنسا EDF) شكل(8)، وهو عبارة عن جزء من مجموعة البرامج SEPLAN المخصصة لتطوير المنظومة الأوربية [8].



التوتر KV	ستطاعة الردية المسموحة للمولد(MVAr)	
	في حالة اللاحمل	عند الحمل الاسمي
9.5	38	21.2
9.75	37.45	23.11
10	36.93	24.9
10.25	36.24	24.9
10.5	35.38	24.91
10.75	34.5	24.42
11	33.67	23.5
11.25	32.3	21.49
11.5	30.81	15.7

الشكل 5. الاستطاعة الردية المسموحة في حالة اللاحمل وعند الحمل الاسمي للمولد ذي الدائر الأسطواني في محطة توليد التيّم (42 MVA – 10.5 KV)



الشكل 6. أثر تغيّر مفاعلة بوتيير Xp في الاستطاعة الردية المسموحة للمولد في محطة توليد التّيم

يقوم برنامج OPF بثلاث وظائف رئيسية:

- حسابات جريان الحمولة النظامي (Standard Power Flow IPF)
- حسابات جريان الحمولة المقيد (Constrained Power Flow CPF)
- حسابات جريان الحمولة الأمثل (Optimum Power Flow OPF)

ويتألف من ثلاث مراحل رئيسية:

- مرحلة معطيات الدخل: وفيها يتم قراءة واستعراض وتعيير معطيات الدخل المخزنة في قاعدة البيانات
- مرحلة الحساب: وفيها يتم تطبيق مختلف الألغوريتمات لحساب توترات عقد الشبكة
- مرحلة معطيات الخرج: يتم في هذه المرحلة إجراء بقية حسابات جريان الحمولـة وطباعـة النتائج.

بوصفها معطيات دخل للبرنامج استُخدمت البيانات المقدمة من وزارة الكهرباء والتي اشـتملت علـى استطاعات التوليد والأحمال وممانعات الخطوط وغيرها. في عقدة توليـد التـّيم تـم إدخـال مجـال الاستطاعة الردية المسموحة المحدد بواسطة الألغوريتم المقترح مع الأخذ بالحسبان الملاحظات التالية:

- ارتفاع قيمة التوتر في عقدة التّيم عن القيمة الاسمية
- أثر التيار الدائر في مجموعة المولدات المربوطة على التوازي
- عدم الدقة في ضبط تيار التهييج وما ينجم عن ذلك من تباين في إنتاج الاستطاعة الردية من المولدات
- أثر الضياعات الأخرى المختلفة

وبناءً على ذلك فقد أخذنا قيمة الاستطاعة الردية المسموحة 23 MVAr المقابلة لقيمة التوتر 11 K.V، شكل (5)، ولما كانت توجد ثلاث مولدات في محطة توليد التّيم فيكون مجال الاستطاعة الردية المسموحة $[Q_{max} , Q_{min}] = [69 , 0]$ على اعتبار أن إمكانية تشغيل المولدات بتهييج ناقص مستبعدة في تلك المحطة.

تم اختيار عقدة جندر كعقدة مرجع وأُخذت الدقة 0.005 كمقياس لتقارب عمليات التكرار وحُدد العدد الأعظمي لمرات التكرار ب 25 مرة. ونورد فيما يلي ملخصاً لنتائج الحسابات:

تم إنجاز حسابات جريان الحمولة بنجاح، وبلغ عدد مرات التكرار اللازمة 4 مرات، ويبين الجدول (4) ميزان الاستطاعة الفعلية والردية في الشبكة.

الجدول 4. ميزان الاستطاعة للشبكة السورية

POWER BALANCE	GEN	LOAD	LOSSES		
MW	2936.99	2856.00	80.99	2.8	% OF GEN
MVARs	1818.53	1907.40	-88.88	COS ш =	0.83

ويتضح من هذا الجدول أن نسبة الاستطاعة الفعلية الضائعة2.8% من الاستطاعة الفعلية الكلية المولدة، أما توترات العقد فقد بلغت أدنى قيمة للتوتر في محطة إدلب 184 KV وأعلى قيمة في محطة البعث 242.2 KV، وفي باقي العقد تراوحت القيم بين منخفضة مثل محطة حلب 188.6KV B، وحول القيمة الاسمية مثل محطة مسكنة220.7KVO، وقيم مرتفعة مثل محطة محردة 236KV، ومحطة فيروزة231.6KV.

بالنسبة لنتائج الخطوط فقد ظهرت زيادة تحميل مفرطة على خط اللاذقية - بانياس بنسبة 44.24% وعلى خط قابون2 - عدرا 2 وبنسبة 15.51%.

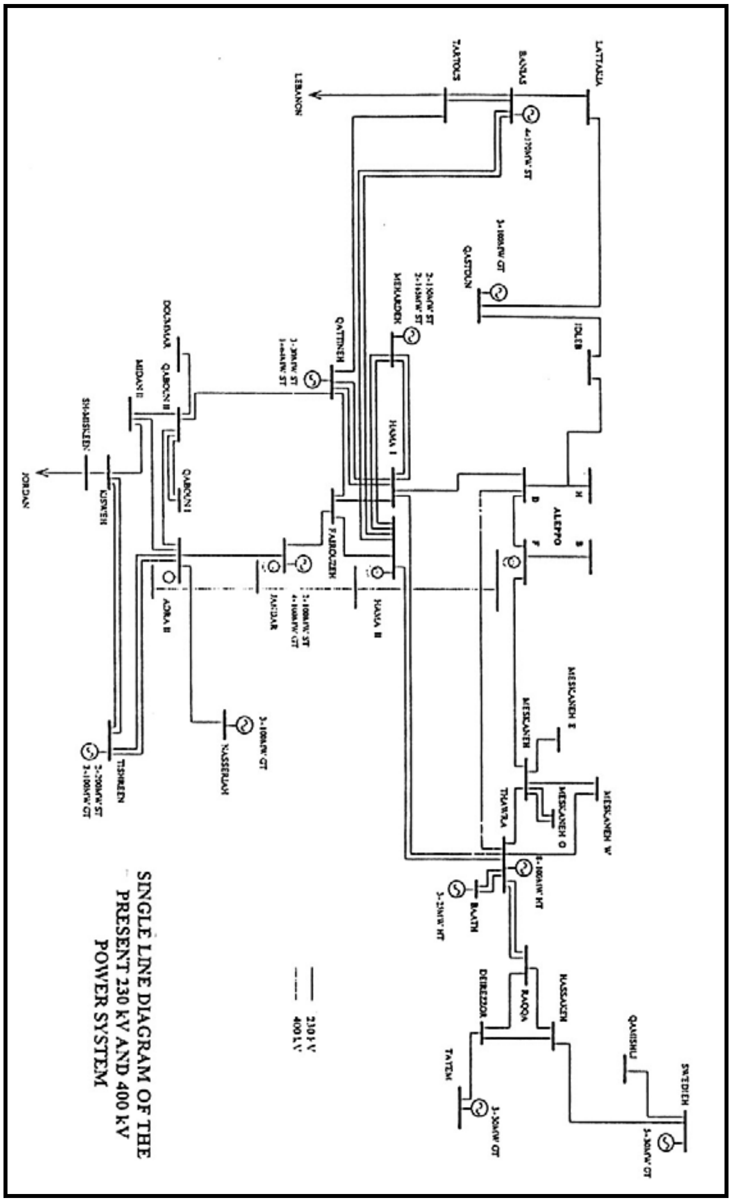
نلاحظ حدوث انخفاض ملحوظ في قيمة التوتر في محطات حلب (B, D, F, H) وإدلب، ويعود السبب في ذلك، إلى بعد هذه المحطات عن محطات التوليد وضعف عملية تعويض الاستطاعة الردية في تلك المحطات. وعلى العكس من ذلك نلاحظ أن هناك ارتفاعاً ملحوظاً للتوتر في محطات مثل محردة، فيروزة، الرقة، وذلك لقرب هذه المحطات من محطات التوليد حيث تقوم المولدات وعبر دارات التهييج بعملية تنظيم للتوتر من خلال التحكم بالاستطاعة الردية المحقونة.

أما سبب زيادة التحميل على خط اللاذقية – بانياس فيعود إلى زيادة الحمولة في محطة اللاذقية (211 MW) بالإضافة إلى استجرار محطة إدلب لمعظم حمولتها عبر تلك المحطة (حوالي 130 MW)، في حين لا تتجاوز الاستطاعة الاسمية لخط بانياس اللاذقية 255 MW.

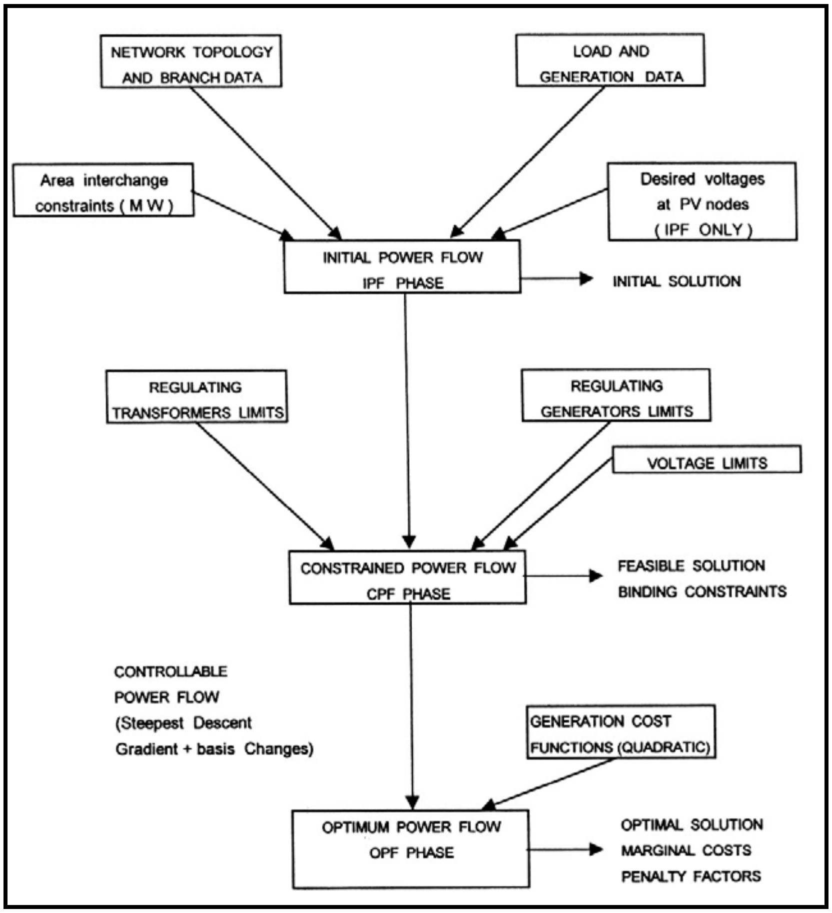
وهكذا نرى أن استخدام المجال المسموح به لتغير الاستطاعة الردية والمحدد بواسطة الألغوريتم المقترح يحافظ على تقارب عمليات التكرار لبرنامج جريان الحمولة، ومن ثَم الوصول إلى نتائج الحسابات ضمن عدد مقبول لهذه العمليات.

الاستنتاجات:

- يبين التحليل المقدم ضرورة تطوير طرق خطية لحساب الاستطاعة الردية المسموحة للمولدات التزامنية في عقد الشبكة الكهربائية، وذلك للتغلب على مشكلة الجهد الحسابي المطول والزمن اللازم لإنجاز مثل هذه الحسابات في برامج جريان الحمولة.
- قمنا في هذا البحث بوضع دراسة تحليلية لمعادلات الآلة التزامنية وصياغتها بطريقة جديدة سمحت لنا بحساب الاستطاعة الردية المسموحة لكل من المولد، ذي الدائر الأسطواني والمولد ذي الأقطاب البارزة، وذلك دون الحاجة لاستخدام طرق التكرار المعروفة مما يساهم في زيادة فعالية برمجيات حساب نظم القدرة الكهربائية.
- تبين الدراسة التجريبية والنتائج الحسابية ارتباط قيمة مجال الاستطاعة الردية المسموحة للمولد التزامني بالقيمة الآنية لكل من التوتر والاستطاعة الفعلية للمولد، وذلك كما هو مبين في الجداول والمنحنيات التجريبية الناتجة عن تطبيق هذه الطريقة.
- تدل نتائج الحسابات على أن استخدام مجال الاستطاعة الردية المسموحة الناتج عن الألغوريتم المقترح في معطيات الدخل لبرامج جريان الحمولة يحافظ على تقارب عمليات التكرار في مثل هذه البرامج.



الشكل 7. الشبكة السورية 230-400 KV



الشكل 8. المخطط الإنسيابي لبرنامج حساب جريان الحمولة OPF

المراجع

1- Zhang, S. & Irving, M. R., Enhanced Newton - Raphson algorithm for normal, controlled and optimal power flow solutions using column exchange techniques, IEE, England 1994.

2- Yamayee, Z. A.& Bala, J. L., Electromechanical Energy Devices and Power Systems, John Wiley & Sons, Inc. 1994.

3- Nagrath, I. J. & Kathari D. P., Modern Power System Analysis, M_G Graw - Hill, Inc. 1982.

4- Barkan, Y. D., Power System Automatization, Moscow; Energia, 1981.

5- Marckovitch, I. M., Power System , Moscow; Energia 1969.

6- Hindmarsh, J., Electrical Machines and their Applications, Pergamon Press , 1980.

7- Kurevitch, U. E., The Calculations of Power System Stability, Moscow; Energoatomzdat; 1990.

8- System - Europe , Optimum Power Flow, OPF Program, EDF, 1996.

· تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق: 1999/7/19.