



منشورات جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

نظم القدرة الكهربائية

جريان الحمولة والأعطال الكهربائية

الدكتور

حسان السويدان

أستاذ مساعد في قسم هندسة الطاقة الكهربائية

الدكتور

علي حمزة

أستاذ في قسم هندسة الطاقة الكهربائية

الطبعة الأولى: ١٤٣٥ هـ

جامعة دمشق

الطبعة الأولى: ١٤٣٥ هـ

تحت إشراف الأستاذ الدكتور

د. محمد عبد الحليم عبد الحليم

نظم القدرة الكهربائية

جريان الحمولة والأعطال الكهربائية



قسم هندسة الطاقة الكهربائية





منشورات جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

نظم القدرة الكهربائية

جريان الحمولة والأعطال الكهربائية

الدكتور

حسان السويدان

أستاذ مساعد في قسم هندسة الطاقة الكهربائية

الدكتور

علي حمزة

أستاذ في قسم هندسة الطاقة الكهربائية

—

جامعة دمشق

تجربة الباحثين المميزين -

والإبداع المميزين م





الفهرس

الصفحة	الموضوع
5	الفهرس
9	المقدمة
11	الفصل الأول : تحليل جريان القدرة
11	1-1 مقدمة
12	2-1 مصفوفة سماحيات العقد
17	3-1 حل المعادلات الجبرية غير الخطية
27	4-1 النموذج الرياضي لجريان الحمولة
29	5-1 حل مسألة جريان الحمولة بطريقة غاوص -زايديل
40	6-1 حساب الجريان الحمولة
52	7-1 تأثير المحولات المبدلة للوضعيات
54	8-1 حل مسألة جريان الحمولة بطريقة نيوتن - رافسون
69	9-1 الطريقة السريعة لحساب جريان الحمولة
74	10-1 مقارنة بين طرق حساب جريان الحمولة
77	تطبيقات باستخدام الحاسوب
123	الفصل الثاني
	تحليل الآلة التزامنية في الحالة العابرة
123	1-2 مقدمة
124	2-2 الظواهر العابرة
128	3-2 عوابر الآلة التزامنية
132	4-2 مركبات بارك

137	5-2 عطل متوازن
143	6-2 الأعطال غير المتوازنة
152	7-2 نماذج مبسطة للآلات التزامنية لتحليل الحالة العابرة
160	8-2 المركبة المستمرة لتيار الثابت
164	9-2 تأثير تيار الحمل
169	الفصل الثالث : تحليل العطل المتوازن (المتناظر) في منظومات القدرة الكهربائية
169	1-3 مقدمة
170	2-3 خوارزمية حساب العطل المتوازن الثلاثي الطور باستخدام نظرية ثفنين
179	3-3 مفهوم سعة القصر لباسبار (لقضيب التجميع) في منظومة القدرة
182	4-3 اختيار القواطع الآلية
192	5-3 خوارزمية تحليل العطل لمنظومة قدرة كبيرة باستخدام ماتريس ممانعات العقد
201	6-3 حسابات العطل المتوازن لشبكات التوتر المنخفض
211	7-3 استخدام تيارات العطل للتصميم الحراري والديناميكي لمنظومة القدرة الكهربائية
219	8-3 تطبيقات على الحاسوب
231	الفصل الرابع : المركبات المتناظرة
231	1-4 مقدمة
232	2-4 تحويل نظم التيارات والتوترات إلى نظام المركبات المتناظرة
239	3-4 الاستطاعة وفق نظرية المركبات المتناظرة

243	4-4 الممانعات التتابعية (الممانعات المتناظرة)
248	5-4 حساب توتر النقطة النجمية (توتر نقطة الحياد)
257	6-4 الممانعات التتابعية للآلات التزامنية
259	7-4 الممانعات والدارات التتابعية للمحولات
271	8-4 الممانعات التتابعية (المتناظرة) لخطوط النقل
272	9-4 تشكيل الدارات التتابعية لنظام القدرة الكهربائية
276	10-4 تطبيقات باستخدام الحاسوب
283	الفصل الخامس : الأعطال غير المتوازنة (غير المتناظرة)
283	1-5 مقدمة
284	2-5 الإطار العام للخوارزمية
286	3-5 عطل طور مع الأرض
290	4-5 عطر طورين (طور مع طور)
293	5-5 عطل طورين مع الأرض
305	6-5 الأعطال غير المتوازنة التسلسلية (أعطال انقطاع النواقل)
315	7-5 تطبيقات على الحاسوب
323	الفصل السادس : نظم التأريض
323	1-6 مقدمة
323	2-6 تأريض النظام (تأريض التشغيل)
352	3-6 التأريض الواقى (أرضي الحماية)
378	4-6 مؤشر اختيار نظام التأريض
380	5-6 البئر الأرضي (نظام القطب الأرضي)
383	6-6 تأثير المقاومة النوعية للتربة على مقاومة نظام التأريض

392	6-7 القياس العملي لمقاومة نظام التأريض
396	6-8 تصميم الناقل الأرضي في الأبنية السكنية والورشات الصناعية
396	6-9 القواطع الآلية التفاضلية
407	المصطلحات العلمية
431	المراجع

الفصل الأول

تحليل جريان القدرة

Power Flow Analysis

1-1 مقدمة:

سنناقش في هذا الفصل تحليل نظام القدرة الكهربائية خلال عمليات التشغيل الطبيعية، ونفرض أن النظام يعمل في ظروف تشغيل متوازنة ويمثل شبكة أحادية الطور.

وتحتوي هذه الشبكة مئات العقد والخطوط ممانعاتها معطاة بالكميات الواحدية منسوبة لاستطاعة أساس عام بـ MVA.

عموماً يمكن تشكيل معادلات الشبكة بأشكال مختلفة، إلا أن طريقة معادلات العقد هي الأكثر ملاءمة لتحليل معظم نظم القدرة والأكثر استخداماً. إن تشكيل معادلات الشبكة على شكل سمات العقد يعطي معادلات جبرية خطية عقدية بدلالة تيارات العقد، وعند معرفة تيارات العقد فإن جملة المعادلات الخطية هذه يمكن حلها للحصول على توترات العقد.

إلا أنه في نظام القدرة الكهربائية تكون الاستطاعات معروفة أكثر من التيارات وبالتالي تصبح المعادلات النهائية بدلالة الاستطاعات (والتي تعرف بمعادلات جريان الحمولة) غير خطية ولا يمكن حلها إلاً بواسطة طرق التكرار. وتشكل دراسات جريان الحمولة الهيكل الأساسي لتصميم وتحليل نظام القدرة الكهربائية، نظراً لأهميتها في عمليات التخطيط والتشغيل والجدولة الاقتصادية. وكذلك تبادل الاستطاعات بين الوحدات وبالإضافة إلى ذلك يعتبر تحليل جريان الحمولة الخطوة الأساسية في تحليل عمليات أخرى مثل الاستقرار العابر والدراسات الإحصائية.

وستعرف في هذا الفصل على مصفوفة السماحيات لمعادلات العقد، وكذلك على الطرق المعروفة لحل المعادلات الجبرية غير الخطية مثل طريقة غاوس-زايدل وطريقة نيوتن - رافسون والتي تستخدم على نطاق واسع في حل مسائل نظم القدرة الكهربائية.

1-2 مصفوفة سماحيات العقد Bus Admitance Matrex:

بغية الحصول على معادلات توترات العقد نعتبر نظام القدرة البسيط المبين بالشكل (1-1)، المقاومات مهملة والمفاعلات منسوبة إلى أساس عام بالـ MVA.

بما أن الحل وفقاً لطريقة العقد يستند إلى قانون كيرشوف للتيارات فإنه يتم قلب الممانعات إلى سماحيات أي:

الشكل (1-1) مخطط الممانعة لنظام بسيط /6/.

$$y_{ij} = \frac{1}{z_{ij}} = \frac{1}{r_{ij} + jx_{ij}}$$

في الشكل (1-2) تم إعادة رسم الدارة بدلالة السماحيات والتحويل إلى منابع تيار، وقد تم أخذ العقدة 0/ (والتي تمثل الأرض عادة) كمرجع. بتطبيق قانون كيرشوف للتيارات على العقد من 1 إلى 4 ينتج ما يلي:

$$I_1 = y_{10}V_1 + y_{12}(V_1-V_2)+y_{13}(V_1-V_3)$$

$$I_2 = y_{20}V_2 + y_{12}(V_2-V_1)+y_{23}(V_2-V_3)$$

$$0 = y_{23}(V_3 - V_2) + y_{13}(V_3 - V_1) + y_{34}(V_3 - V_4)$$

$$0 = y_{34} (V_4 - V_3)$$

وبإعادة ترتيب هذه المعادلات نحصل على :

$$I_1 = (y_{10} + y_{12} + y_{13}) V_1 - y_{12} V_2 - y_{13} V_3$$

$$I_2 = - y_{12} V_1 + (y_{20} + y_{12} + y_{23}) V_2 - y_{23} V_3$$

$$0 = - y_{13} V_1 - y_{23} V_2 + (y_{13} + y_{23} + y_{34}) V_3 - y_{34} V_4$$

$$0 = - y_{34} V_3 + y_{34} V_4$$

الشكل (1-2) مخطط السماحيات للنظام المبين بالشكل (1-1).

لنعرف السماحيات التالية:

$$Y_{11} = y_{10} + y_{12} + y_{13}$$

$$Y_{22} = y_{20} + y_{12} + y_{23}$$

$$Y_{33} = y_{13} + y_{23} + y_{34}$$

$$Y_{44} = y_{34}$$

$$Y_{12} = Y_{21} = - y_{12}$$

$$Y_{13} = Y_{31} = -y_{13}$$

$$Y_{23} = Y_{32} = -y_{23}$$

$$Y_{34} = Y_{43} = -y_{34}$$

وبالتالي تختصر معادلات العقد إلى :

$$I_1 = Y_{11} V_1 + Y_{12} V_2 + Y_{13} V_3 + Y_{14} V_4$$

$$I_2 = Y_{21} V_1 + Y_{22} V_2 + Y_{23} V_3 + Y_{24} V_4$$

$$I_3 = Y_{31} V_1 + Y_{32} V_2 + Y_{33} V_3 + Y_{34} V_4$$

$$I_4 = Y_{41} V_1 + Y_{42} V_2 + Y_{43} V_3 + Y_{44} V_4$$

وبما أنه لا يوجد اتصال بين العقدة 1 والعقد 4 في الشبكة السابقة فإن $Y_{14}=Y_{41}=0$

، وبالمثل $Y_{24} = Y_{42} = 0$.

وبتعميم العلاقات السابقة على نظام مكون من n عقدة فإننا نحصل على معادلات توترات العقد بالشكل:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1i} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2i} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \dots & Y_{ii} & \dots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{ni} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

أو :

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus}$$

حيث : I_{bus} شعاع التيار المحقونة في العقد (أي منابع التيارات الخارجية)، ويعد التيار موجباً في حال كان اتجاه جريانه باتجاه العقدة، وسالباً في حال جريانه مبتعداً عن العقدة.

V_{bus} شعاع توترات العقد مقاسة بالنسبة للعقدة المرجع .

Y_{bus} مصفوفة سماحيات العقد، وكل عنصر قطري لكل عقدة في هذه المصفوفة هو عبارة عن مجموع السماحيات المتصلة بهذه العقدة ويعرف بالسماحية الذاتية أي:

$$Y_{ii} = \sum_{j=0}^n y_{ij} \quad j \neq i \quad (1-3)$$

أما العناصر غير القطرية فيساوي كل منها إلى السماحية بين العقد مأخوذة بإشارة سالبة وتعرف بالسماحية المتبادلة بين العقدتين أي :

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij} \quad (1-4)$$

وعندما تكون تيارات العقد معروفة فإنه يمكن حل المعادلة (1-2) والحصول على التوترات لـ n عقدة.

$$V_{bus} = Y_{bus}^{-1} I_{bus} \quad (1-5)$$

ويعرف مقلوب مصفوفة السماحيات بمصفوفة ممانعات العقد Z_{bus} .

إن مصفوفة السماحيات هي مصفوفة متناظرة بالنسبة للقطر ولذلك يكفي تخزين القسم العلوي فقط من المصفوفة. في نظام القدرة الكهربائية تكون كل عقدة متصلة مع بعض العقد المجاورة ولذلك فإن الكثير من العناصر القطرية تكون مساوية للصفر، وللحصول على مقلوب هذه المصفوفة تطبق التقنية العددية المعروفة بالفصل المثلثي والتي تتميز بسرعة الحساب والتخزين وقلة أخطاء التدوير.

وهناك طريقة أخرى لتشكيل Z_{bus} اللازمة لإجراء حساب القصر وذلك بالحصول على هذه المصفوفة مباشرة بواسطة الخوارزم البناء المباشر للمصفوفة دون الحاجة إلى قلب المصفوفة.

استناداً إلى المعادلات (1-3) و (1-4) فإن مصفوفة السماحيات للشبكة المبينة بالشكل (1-2) تكون كما يلي:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} -j8.50 & j2.50 & j5.00 & 0 \\ j2.50 & -j8.75 & j5.00 & 0 \\ j5.00 & j5.00 & -j22.50 & j12.50 \\ 0 & 0 & j12.50 & -j12.50 \end{bmatrix}$$

ونبين فيما يلي برنامجاً بسيطاً لتشكيل مصفوفة سماحيات العقد، حيث يمثل Zdata دخل معطيات الخطوط ويحوي أربعة أعمدة. العمود الأول والثاني لأرقام عقد الخطوط، أما العمودان الباقيان فيحويان مقاومة ومفاعلة الخطوط بالكميات الواحدة.

يتم في هذا البرنامج مع بداية قلب ممانعات الخطوط إلى سماحيات، ثم يلي ذلك إيجاد العناصر غير القطرية ومن ثم تشكيل العناصر القطرية.

مثال (1-1):

إذا كانت القوى المحركة في الشكل (1-1) $E_1 = 1.1 \angle 0^\circ$ ، $E_2 = 1.0 \angle 0^\circ$ فالمطلوب استخدام البرنامج:

(Y = y_{bus} (zdata) للحصول على مصفوفة السماحيات، ثم إيجاد مصفوفة الممانعات عن طريق قلب المصفوفة وأوجد كذلك توترات العقد علماً أن منابع التيارات المكافئة هي :

$$I_1 = \frac{1.1}{j1.0} = -j1.1 \text{ pu} \quad I_2 = \frac{1.0}{j0.8} = -j1.25 \text{ pu}$$

الحل:

إن حل المعادلات $I_{bus} = Y_{bus} V_{bus}$ عن طريق قلب المصفوفة هي طريقة غير فعالة، وبدلاً من ذلك يمكن حل هذه المعادلات بطريقة الفصل المثلثي والحذف بطريقة غاوص وهذه الطريقة تتفوق على الطريقة السابقة سواءً من حيث الزمن اللازم للحل أو من حيث دقة الحل.

1-3 حل المعادلات الجبرية غير الخطية

Solution of Nonlinear Algebraic Equation:

إن أكثر الطرق العددية استخداماً لحل المعادلات الجبرية غير الخطية بطرق التقريب المتتالي هي طرق غاوص-زايدل ونيوتن-رافسون، وسيتم مناقشة هاتين الطريقتين على معادلة من الدرجة n ثم سنوسع ذلك لتشكيل n معادلة.

1-3-1 طريقة غاوص-زايدل Gauss- Seidel Method:

لشرح هذه الطريقة نعتبر المعادلة غير الخطية

$$f(x) = 0 \quad (1-6)$$

ويمكن إعادة ترتيب الدالة السابقة وكتابتها بالشكل:

$$x = g(x) \quad (1-7)$$

إذا كانت $x^{(k)}$ القيمة الأولية للمحول x فإن التكرار المتتالي يكون:

$$x^{(k-1)} = g(x^{(k)}) \quad (1-8)$$

ونحصل على الحل عندما يصل الفرق بين قيمتين لتوتر كل عقدة (أي الفرق بين القيمة الحالية والقيمة الحاصلة من خطوة التكرار السابقة) أصغر من قيمة صغيرة معروفة مسبقاً أي

$$|x^{(k-1)} - x^{(k)}| \leq \varepsilon \quad (1-9)$$

حيث تمثل ε الدقة المرغوبة

مثال (1-2):

استخدم طريقة غاوس - زايدل لإيجاد حل المعادلة التالية:

$$f(x) = x^3 - 6x^2 + 9x - 4 = 0$$

نعيد كتابة المعادلة بشكل مناسب لإجراء عملية التكرار

$$x = -\frac{1}{g}x^3 + \frac{6}{9}x^2 + \frac{4}{9} = g(x)$$

ويمكن رسم التابع $g(x)$ بدلالة x كما هو مبين بالشكل (1-3) .

نطبق الغوريتم غاوس - زايدل بعد أخذ قيمة ابتدائية

$$x^{(0)} = 2$$

من المعادلة (1-8) يكون التقريب الأول:

$$x^{(1)} = g(2) = -\frac{1}{g}(2)^3 + \frac{6}{9}(2)^2 + \frac{4}{9} = 2.2222$$

والتقريب الثاني :

$$x^{(2)} = g(2.2222) = -\frac{1}{9}(2.2222)^3 + \frac{6}{9}(2.2222)^2 + \frac{4}{9} = 2.5173$$

وتعطي خطوات التكرار المتتالي النتائج , 3.9568 , 3.7398 , 3.3376 , 2.8966 , 4.000 , 3.9988 وتعاد عمليات التكرار إلى أن تصبح قيمة المتحول ضمن الدقة المطلوبة.

الشكل (1-3) طريقة غاوص - زايدل بيانياً /7/.

ويتضح من المثال السابق أن طريق غاوص - زايدل تحتاج إلى عدد كبير من خطوات التكرار للوصول إلى الدقة المطلوبة، كما أنه ليس بالضرورة أن تصل هذه الطريقة إلى نقطة الحل. في هذا المثال تبعاً للقيمة الابتدائية تم الوصول إلى إحدى نقاط الحل على مسار Zig Zag، وفي الواقع لو كانت القيمة الابتدائية خارج المجال مثلاً $x^{(0)} = 6$ فإن عمليات التكرار ستتباعد ولن يكون هناك وصول إلى نقطة الحل.

في بعض الحالات يمكن استخدام عامل تسريع لتحسين نسبة التقارب. إذا رمزنا لعامل التسريع بـ α وبحيث $\alpha > 1$ فإن الغوريتم غاوص-زايدل يصبح:

$$x^{(k-1)} = x^{(k)} + \alpha[g(x^{(k)}) - x^{(k)}] \quad (1-10)$$

مثال (1-3):

أوجد حلول المعادلة الواردة في المثال (1-2) باستخدام طريقة غاوص زايدل مع عامل تسريع $\alpha = 1.25$.

الحل:

باستخدام المعادلة (1-10) وباعتبار القيمة الابتدائية $x^{(0)} = 2$ يكون التقريب الأول:

$$g(2) = -\frac{1}{9}(2)^3 + \frac{6}{9}(2)^2 + \frac{4}{9} = 2.2222$$

$$x^{(1)} = 2 + 1.25[2.2222 - 2] = 2.2778$$

ويكون التقريب الثاني

$$g(2.2778) = -\frac{1}{9}(2.2778)^3 + \frac{6}{9}(2.2778)^2 + \frac{4}{9} = 2.5902$$

$$x^{(2)} = 2.2778 + 1.25[2.5902 - 2.2778] = 2.6683$$

وتعطي عمليات التكرار المتتالي النتائج , 4.0084 , 3.7238 , 3.1831 , 3.0801
3.9978 , 400005.
ويبين الشكل (1-4) تأثير عامل التسريع.

الشكل (1-4) طريقة غاوس-زايدل باستخدام عامل التسريع.

ويجب الانتباه إلى عدم استخدام عامل تسريع كبير حيث أن الخطوة الكبيرة يمكن أن تؤدي إلى تجاوز نقطة الحل، وينتج عن ذلك زيادة عدد مرات التكرار أو حتى تباعد عملية التكرار.

نعم الآن الطريقة على نظام مكون من n معادلة بـ n متحول

$$f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_1$$

$$f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_2$$

.....

$$f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_n$$

(1-11)

نرتب جملة المعادلات السابقة بشكل مناسب

$$\begin{aligned}
x_1 &= c_1 + g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\
x_2 &= c_2 + g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\
&\dots\dots\dots \\
x_n &= c_n + g_n(x_1, x_2, \dots, x_n)
\end{aligned}
\tag{1-12}$$

و تبدأ عمليات التكرار بافتراض حل تقريبي لكل من المتحولات المستقلة $(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$.

وينتج عن المعادلات (1-12) حل تقريبي جديد $(x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_n^{(1)})$.
 الجدير بالذكر أنه في طريقة غاوس - زایدل فإن القيم الجديدة الناتجة لمتحولات المعادلات السابقة تستخدم مباشرة وفي نفس خطوة التكرار لحساب المعادلات التالية، وفي نهاية كل عملية تكرار يتم اختبار كل قيم المتحولات بالمقارنة مع القيم السابقة في خطوة التكرار السابقة.

إذا كانت كل تغيرات المتحولات ضمن الدقة المطلوبة نقول إن الحل قد تقارب وإلا فإنه يجب الاستمرار بإجراء عمليات التكرار.

ويمكن تسريع التقارب باستخدام عامل تسريع α مناسب وبالتالي يصبح التكرار المتتالي

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + \alpha(x_i^{(k+1)} - x_i^{(k)}) \tag{1-13}$$

2-3-1 طريقة نيوتن - رافسون : Newton-Raphson (NR) method

طريقة NR هي طريقة رياضية ناجعة لحل معادلات جبرية غير خطية بالتكرار. وهي طريقة تتقارب بسرعة وبشكل مؤكد في معظم الحالات. وهي الطريقة العملية لحل جريان الحمولة لنظم القدرة الكبيرة. سلبيتها الوحيدة هي حاجتها لحجم تخزين أكبر في ذاكرة الكمبيوتر، وحتى هذا يمكن التغلب عليه بإجراءات تخزين مكثفة

/ Compact storage scheme

ويمكن تسريع التقارب بشكل ملحوظ بإجراء عملية التكرار الأولي بواسطة طريقة غاوس-زايدل واستخدام القيم الناتجة للبدء بعمليات التكرار لطريقة NR وقبل تطبيق هذه الطريقة لحل مسألة جريان الحمولة، من المفيد إعطاء نبذة رياضية مختصرة عنها.

لنعتبر مجموعة من المعادلات الجبرية غير الخطية عددها n :

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1-14)$$

نفرض

القيم الابتدائية للمجهول $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$

و $\Delta x_1^{(0)}, \Delta x_2^{(0)}, \dots, \Delta x_n^{(0)}$ التصحيحات Corrections

التي إذا أضيفت إلى القيم الابتدائية، نحصل على الحل الفعلي، أي :

$$f_i(x_1^0 + \Delta x_1^0, x_2^0 + \Delta x_2^0, \dots, x_n^0 + \Delta x_n^0) \quad (1-15)$$

ننشر هذه المعادلات في سلسلة تايلور حول الفرض الابتدائي فنجد:

$$f_i(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) + \left[\left(\frac{\partial f_i}{\partial x_1} \right)^0 \Delta x_1^0, \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_2} \right)^0 \Delta x_2^0, \dots, \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_n} \right)^0 \Delta x_n^0 \right] \quad (1-16)$$

+ Higher Order Terms

حدود ذات درجة أعلى

حيث $\left(\frac{\partial f_i}{\partial x_1} \right)^0, \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_2} \right)^0, \dots, \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_n} \right)^0$ المشتقات الجزئية f_i بالنسبة لـ $x_1, x_2, \dots, x_n$ لأجل القيم $(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$.

وبإهمال الحدود ذات الدرجة الأعلى يمكن كتابة (1-16) بالشكل المتريسي

$$\begin{bmatrix} f_1^o \\ f_2^o \\ \vdots \\ f_n^o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^o & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)^o & \dots & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^o \\ \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)^o & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)^o & \dots & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right)^o \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)^o & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_2}\right)^o & \dots & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)^o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^o \\ \Delta x_2^o \\ \vdots \\ \Delta x_n^o \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1-17)$$

أو بالشكل المختصر :

$$f^o + A^o \Delta x^o \approx 0 \quad (1-18)$$

A^o يُعرَّفُ بالمتريس اليعقوبي Jacobian matrix ونحصل عليه باشتقاق f بالنسبة إلى x والتعويض بالقيم x^o .

ويمكن كتابة المعادلة (1-18) بالشكل:

$$f^o = [-A^o] \Delta x_0 \quad (1-19)$$

وهذه مجموعة معادلات خطية يمكن حلها بطريقة الحذف لغاوص للحصول على Δx^o . وتصبح قيم x الجديدة:

$$x^1 = x^o + \Delta x^o \quad (1-20)$$

أو بشكل عام، ولأجل خطوة التقريب $(K+1)$:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x^{(k)} \quad (1-21)$$

تستمر عمليات التقريب حتى تتحقق المعادلات (1-14) لدقة مرغوبة معينة، أي:

$$f_i(x^{(k)}) < \varepsilon \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1-22)$$

حيث ε قيمة تُحدد مسبقاً a specified value.

مثال (1-4) :

حل المعادلتين التاليتين بطريقة نيوتن-رافسون:

$$f_1(x_1, x_2) = 2x_1 + x_1x_2 - 1 = 0$$

$$f_2(x_1, x_2) = 2x_2 - x_1x_2 + 1 = 0$$

أي أحسب المجهولين x_1 و x_2 .

الحل:

نفرض $\varepsilon = 0.001$

(1) التكرار الأول: نفرض : $x_1^{(0)} = 0$; $x_2^{(0)} = 0$

نحسب $f^{(0)}$:

$$f^{(0)} = \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

نشكل الماتريس اليعقوبي

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 + x_2 & x_1 \\ -x_2 & 2 - x_1 \end{bmatrix}$$

- نحسب $[A]$ لأجل الفرض الأول:

$$[A^0] = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}$$

نوجد $\Delta x^{(0)}$ من المعادلة (1-12) ويمكن استخدام طريقة قلب الماتريس $[A^0]$ ، نظراً

لصغر أبعاده في هذا المثال:

$$\Delta x^{(0)} = -[A^0]^{-1}f^0 = -\begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix}$$

- نحسب x المحسنة :

$$x^{(1)} = x^{(0)} + \Delta x^{(0)} = \begin{bmatrix} 0.5 \\ -0.5 \end{bmatrix}$$

- نحسب f لقيم x المحسنة :

$$f^1 = \begin{bmatrix} -0.25 \\ 0.25 \end{bmatrix}$$

- إذا تحققت المتراجحات التالية معاً

$$|f_1| < \varepsilon \quad ; \quad |f_1^{(1)}| = +0.25 > 0.001$$

$$|f_2| < \varepsilon \quad ; \quad |f_2^{(2)}| = +0.25 > 0.001$$

ننهي عمليات التكرار، وإلا نتابع:

(2) التكرار الثاني:

$$[A^{(1)}] = \begin{bmatrix} 1.5 & 0.5 \\ 0.5 & 1.5 \end{bmatrix}$$

$$[A^{(1)}]^{-1} = \begin{bmatrix} 0.75 & -0.25 \\ -0.25 & 0.75 \end{bmatrix}$$

$$\Delta x^{(1)} = \begin{bmatrix} 0.75 & -0.25 \\ -0.25 & 0.75 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.25 \\ 0.25 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +0.25 \\ -0.25 \end{bmatrix}$$

$$x^{(2)} = x^{(1)} + \Delta x^{(1)} = \begin{bmatrix} 0.75 \\ -0.75 \end{bmatrix}$$

$$f^{(2)} = \begin{bmatrix} -0.0625 \\ +0.0625 \end{bmatrix}$$

وهكذا تستمر عمليات التكرار إلى أن نصل إلى الدقة المطلوبة.

ونستطيع أن نلخص العمليات السابقة بالمخطط الانسيابي في الشكل (1-5).



لا

$|f| < \varepsilon$ ؟

الشكل (1-5) المخطط الانسيابي لطريقة نيوتن - رافسون/6.

1-4 النموذج الرياضي لجريان الحمولة:

تشكل دراسة جريان الحمولة الجزء الأساسي من تحليل نظم القدرة الكهربائية، وهي ضرورية للتخطيط، والتوزيع الاقتصادي وكذلك التحكم بالنظام الحالي ولتخطيط توسعات النظام المستقبلي. وتشمل هذه الدراسة تعيين طويلة وزاوية التوتر في كل عقدة، وكذلك جريان الاستطاعة الحقيقية والردية في كل خط. وحل مسألة جريان الحمولة نفترض أن النظام يعمل في ظروف تشغيل متوازنة، ويمثل بدارة مكافئة لطور واحد. تتميز كل عقدة بأربعة متحولات وهي طويلة التوتر $|V|$ ، وزاوية الطور δ ، والاستطاعة الحقيقية، وكذلك الاستطاعة الردية Q .

باسبار المرجع (Slack bus):

ويعرف بباسبار أو عقدة المرجع ويكون فيه طويلة وزاوية التوتر معلومة (عادةً تفرض الزاوية صفراً)، بينما تكون الاستطاعة الفعالة والاستطاعة الردية غير معينة. وعادةً يوجد بباسبار واحد من هذا النوع في نظام قدرة ما، وسنشرح فيما يلي الحاجة لمثل هذا الباسبار في دراسة جريان الحمولة.

في دراسة جريان الحمولة لا يمكن تحديد الاستطاعات الفعالة والردية لجميع الباسبارات مسبقاً، وذلك لأن الجريان الصافي للاستطاعة غير معروف مسبقاً إذ أن ضياع الاستطاعة في النظام لا يعرف إلا بعد إنهاء الدراسة. وعليه فمن الضروري أن يكون هناك بباسبار (ولنسمه بباسبار المرجع) تكون فيه الاستطاعة العقدية غير محددة مسبقاً وبالتالي فإنه يؤمن العجز في الاستطاعة لكامل النظام.

ويختار عادةً باسبار مرجع الباسبار المتصل! بأكبر محطة توليد عاملة في النظام وذلك كي تكون التغيرات في الاستطاعة للباسبار المرجع أثناء عملية التقريب صغيرة بالنسبة لاستطاعة التوليد له، ويرقم عادة الباسبار المرجع بالرقم 1/.

باسبارات الحمولة (Load buses):

في هذه الباسبارات تكون الاستطاعة الفعالة والاستطاعة الردية معلومة، بينما تكون طويلة وزاوية توترات العقد غير معلومة وتدعى مثل هذه الباسبارات بالباسبارات نموذج P-Q.

الباسبارات المنظمة (regulated buses):

هذه الباسبارات هي باسبارات التوليد، وتعرف أيضاً بباسبارات التوتر المنظم. في هذا النوع من الباسبارات تكون الاستطاعة الفعالة وطويلة التوتر معلومة ويتم تحديد زاوية التوتر والاستطاعة لكل من هذه الباسبارات، بالإضافة إلى ذلك فإن حدود الاستطاعة الردية العظمى والدنيا لمثل هذه الباسبارات تكون معلومة. وتدعى هذه الباسبارات بالباسبارات نموذج P-V.

1-4-1 معادلات جريان الحمولة Power Flow Equation:

لنعتبر باسباراً نموذجياً لشبكة نظام قدرة كما هو مبين بالشكل (1-6)، حيث تمثل الخطوط بدارة π المكافئة بعد قلب الممانعات إلى سماحيات بالكميات الواحدية منسوبة لاستطاعة أساس عام بال MVA.

الشكل (1-6) باسبار نموذجي في نظام!قدرة كهربائي.

بتطبيق قانون كيرشوف للتيارات على هذا الباسبار نحصل على

$$I_i = y_{i0} V_i + y_{i1} (V_i - V_1) + y_{i2} (V_i - V_2) + \dots + y_{in} (V_i - V_n)$$

$$(1-23) = (y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in}) V_i - y_{i1} V_1 - y_{i2} V_2 - \dots - y_{in} V_n$$

أو

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq i \quad (1-24)$$

الاستطاعة الفعالة والاستطاعة الردية عند الباسبار i.

$$P_i = jQ_i = V_i I_i^* \quad (1-25)$$

أو

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (1-26)$$

بتعويض قيمة I_i في المعادلة (1-24) نحصل على:

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq i \quad (1-27)$$

ومن العلاقة السابقة نلاحظ أنه ينتج عن النموذج الرياضي لمسألة جريان الحمولة معادلات جبرية غير خطية ويجب حلها بطرق التكرار المتتالي.

1-5 حل مسألة جريان الحمولة بطريقة غاوس-زايدل

Gauss-Seidel Power Flow Solution:

في دراسة جريان الحمولة لابد من حل جملة المعادلات غير الخطية (1-27) وذلك لإيجاد المتحولين غير المعروفين في كل عقدة. وتأخذ هذه المعادلات في طريقة غاوس-زايدل الشكل التالي:

$$V_i^{(k+1)} = \frac{\frac{P_i - jQ_i}{V_i^{*(k)}} \sum y_{ij} V_j^{(k)}}{\sum y_{ij}} \quad j \neq i \quad (1-28)$$

حيث y_{ij} المبينة بأحرف صغيرة هي السماحية الطبيعية بالكميات الواحدة، P_i ، Q_i الاستطاعة الفعالة والردية بالكميات الواحدة. عند استخدام قانون كيرشوف للتيارات تم الافتراض أن التيار الداخل إلى العقدة i هو تيار موجب، بالتالي في الباسبارات التي تحقن فيها الاستطاعة الفعالة والردية مثل باسبارات المولدات فإن P_i ، Q_i تكون موجبة، بينما في باسبارات الحمولة حيث تجري كل من الاستطاعة الفعالة والردية بعيداً عن الباسبار فإن كل من P_i و Q_i تكون سالبة. من المعادلة (1-27) نحصل على P_i ، Q_i كما يلي:

$$P_i^{(k+1)} = \text{Re}\{V_i^{*(k)} [V_i^{(k)} \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j^{(k)}]\} \quad j \neq i \quad (1-29)$$

$$Q_i^{(k+1)} = -\text{Im}\{V_i^{*(k)} [V_i^{(k)} \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j^{(k)}]\} \quad j \neq i \quad (1-30)$$

ويعبر عادةً عن معادلات جريان الحملولة بدلالة عناصر مصفوفة السماحيات Y_{bus} ، حيث أن العناصر غير القطرية في هذه المصفوفة ممثلة بأحرف كبيرة $Y_{ij} = y_{ij}$ ، أما العناصر القطرية فهي $Y_{ii} = \sum y_{ij}$ وبالتالي تصبح المعادلة (1-28).

$$V_i^{(k+1)} = \frac{\frac{P_i - jQ_i}{V_i^{*(k)}} - \sum_{j \neq i} y_{ij} V_j^{(k)}}{Y_{ii}} \quad (1-31)$$

و

$$P_i^{(k+1)} = \text{Re}\{V_i^{*(k)}[V_i^{(k)} y_{ii} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n y_{ij} V_j^{(k)}]\} \quad j \neq i \quad (1-32)$$

$$Q_i^{(k+1)} = -I_m \{V_i^{*(k)}[V_i^{(k)} y_{ii} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n y_{ij} V_j^{(k)}]\} \quad j \neq i \quad (1-33)$$

وتشمل y_{ii} السماحية بين الخط والأرض، وكذلك أية سماحية ثابتة إلى الأرض. بما أن كلا مركبي التوتر معلومتان لعقدة المرجع فإنه يوجد (2n-1) معادلة يجب حلها بطرق التكرار المتتالي. وفي ظروف التشغيل المتوازنة فإن طويلة التوترات في العقد تكون بجوار القيمة الاسمية 1Pu أو قريبة من طويلة التوتر لعقدة المرجع. فمثلاً طويلة التوترات في باسبارات الأحمال تكون أقل نوعاً ما من طويلة توتر باسبار المرجع ويعتمد ذلك على مقدار طلب الاستطاعة الردية، بينما تكون التوترات في باسبارات المولدات أعلى.

أما فيما يتعلق بزاوية الطور فإن هذه الزاوية تكون في عقد الأحمال أقل من زاوية باسبار المرجع وذلك وفقاً لطلب الاستطاعة الفعالة، بينما تكون هذه الزاوية أعلى في باسبارات المولدات بدرجة تتعلق بمقدار جريان الاستطاعة الفعالة الداخلة إلى الباسبار.

وفي طريقة غاوص-زايدل تأخذ القيم الابتدائية للتوترات المجهولة $1+j0.0$ أما تقارب الحل فيرتبط بالواقع الفعلي للتشغيل .

تكون الاستطاعة الفعالة والردية في الباسبارات نموذج P-Q معروفة، لذلك تحل المعادلات (1-31) انطلاقاً من القيم الابتدائية لإيجاد المركبات الحقيقية والوهمية للتوترات.

أما في الباسبارات نموذج P-V تكون المعاليم وكما ذكرنا سابقاً P_i ، و $|V_i|$ ، لذلك تحل المعادلات (1-33) لإيجاد $Q_i^{(k+1)}$ ثم تستخدم (1-31) لإيجاد $V_i^{(k+1)}$ ، إلا أنه وبما أن $|V_i|$ معلومة فإنه يتم استبقاء القسم التخيلي فقط من $V_i^{(k+1)}$ وبعد ذلك يحسب القسم الحقيقي كما يلي:

$$(e_i^{(k+1)})^2 + (f_i^{(k+1)})^2 = |V_i|^2 \quad (1-34)$$

أو

$$e_i^{(k+1)} = \sqrt{|V_i|^2 - (f_i^{(k+1)})^2} \quad (1-35)$$

حيث: $e_i^{(k+1)}, f_i^{(k+1)}$ القسم الحقيقي والتخيلي للتوتر $V_i^{(k+1)}$ في التقريب المتتالي. يتم زيادة نسبة التقارب بتطبيق عامل التسارع على الحل التقريبي لكل عملية تكرار.

$$V_i^{(k+1)} = V_i^{(k)} + \alpha(V_i^{(k+1)} - V_i^{(k)}) \quad (1-36)$$

حيث α عامل التسريع وهو عدد حقيقي وتتعلق قيمته بالنظام ، وقد وُجد بالتجربة أن قيم هذا العامل المحصورة بين 1.3 و 1.7 تكون مفيدة في الأنظمة النموذجية. يتم استبدال القيم القديمة للتوترات على كل خطوة تكرار مباشرة بالقيم الجديدة المحسنة، وتستمر هذه العملية إلى أن تصبح كل التغيرات في مركبات القسم الحقيقي والتخيلي لتوترات العقد ضمن حدود الدقة المفروضة أي :

$$\begin{aligned} |e_i^{(K+1)} - e_i^{(K)}| &\leq \varepsilon \\ |f_i^{(K+1)} - f_i^{(K)}| &\leq \varepsilon \end{aligned} \quad (1-37)$$

وعادة تعطي الدقة $\varepsilon = 0.001$ نتائج مرضية.

بعد تقارب عملية التكرار والوصول إلى نقطة الحل يتم حساب الاستطاعة الحقيقية والردية لعقدة المرجع من المعادلات (1-32) و (1-33).

نسمي المعادلات (1-32) و (1-33) معادلات جريان الحمولة الستاتيكي Static Load Flow Equations واختصاراً SLFE. ويمكن أن نصنف المتحولات الواردة في هذه المعادلات إلى صنفين:

x = متحولات تابعة dependent (أو متحولات الحالة State) وهي المجاهيل وعددها $2n$
 y = متحولات مستقلة independent وهي المعاليم، وبعضها قابل للتحكم به والبعض الآخر يفرض ثابتاً Specified.

ويمكن كتابة معادلات الجريان بشكل متريبي ورياضي محض.

$$F(x, y) = 0$$

حيث

$$y = \begin{bmatrix} u \\ p \end{bmatrix}$$

u = متحولات التحكم ، p = متحولات محددة .

وحتى يكون لحلول SLFE أهمية عملية، فإن جميع متحولات التحكم ومتحولات الحالة يجب أن تأخذ قيماً تقع ضمن حدود معينة تقتضيها طبيعة نظام القدرة وظروف تشغيله:

(1) يجب أن تحقق قيمة التوتر المتراجعة:

$$|V_i|_{\min} \leq |V_i| \leq |V_i|_{\max}$$

وتجدر الإشارة إلى أن التجهيزات الكهربائية تصمم لتعمل تحت توتر ثابت ويسمح بتغير التوتر (5-10%) من القيمة الاسمية.

(2) يجب أن تكون الزاوية بين شعاعي التوتر لأي عقدتين أصغر من قيمة عظمى مسموحة وذلك لاعتبارات الاستقرار:

$$|\delta_i - \delta_k| \leq |\delta_i - \delta_k|_{\max}$$

(3) بسبب الحدود الفيزيائية لقدرة المنوبات على توليد استطاعة فعالة أو وريدية، فيجب تحقق المتراجحات:

$$P_{Gi,\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,\max}$$

$$Q_{Gi,\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi,\max}$$

وتبين الأشكال (1-7 a,b,c,d) مخططات الاستطاعة لمنوبات الثورة ومحددة وقطينة وبانياس، وتبين المنطقة المهيمنة المجال الذي يمكن للمنوبة أن تعمل في حدوده، وهذه المنطقة محددة بالنقاط A,B,C,D.

النقطة A : تعطي الاستطاعة الردية العظمى التي يستطيع المولد إنتاجها عندما يُحمل باستطاعته الفعالة الاسمية ويكون التهيج زائداً. هذه النقطة تتحدد بارتفاع درجة حرارة ملفات الدوار.

النقطة B : تعطي الاستطاعة الردية العظمى التي ينتجها المولد عندما يحمل بـ 30% (عنفه مائية) أو 50% (عنفه بخارية) من استطاعته الاسمية الفعالة الاسمية ويكون التهيج زائداً أيضاً. لا يجوز تحميل المنوبة أقل من 30% P_n أو 50% P_n لأن المردود يقل عندها إلى قيمة غير مقبولة. هذه النقطة محددة بارتفاع درجة حرارة ملفات الدوار أيضاً.

إن الاستطاعة الفعالة التي تقدمها المنوبة تحدد بشكل رئيسي باستطاعة العنفة أيضاً.

النقطة C: تحدد الاستطاعة الردية العظمى التي تستجرها المنوبة عندما تعمل بتهييج ناقص وتقدم استطاعة فعالة اسمية. وتحدد هذه النقطة بارتفاع درجة حرارة القسم الجبهي من الثابت.

النقطة D: تحدد الاستطاعة الردية العظمى التي تستجرها المنوبة عندما تعمل بتهييج ناقص وتقدم أدنى استطاعة فعالة مقبولة.

ملاحظة: إن منطقة التشغيل للمنوبة تتغير قليلاً عندما ينحرف توتر خرج المنوبة عن التوتر الاسمي.

ويلخص الجدول التالي قيم الاستطاعة الردية الحدية لهذه المنوبات الأربع:

	D	C	B	A	
الثورة	61	40	83	61.9	م ف آر
بانياس	54	25.5	138	127.5	
قطينة 64	24	9.6	52	48	
محرده	53	23	120	112/5	

(4) وأخيراً يجب أن تغطي الاستطاعة الإجمالية المولدة في النظام الاستطاعة الإجمالية المطلوبة من المستهلكين بالإضافة إلى الضياعات، أي :

$$\sum_i P_{Gi} = \sum_1 P_{Di} + P_L$$

$$\sum_i Q_{Gi} = \sum_1 Q_{Di} + Q_L$$





الشكل (a 1-7) مخطط الاستطاعة لمنوبة في محطة توليد الثورة.



الشكل (1-7b) مخطط الاستطاعة لمنوبة في محطة محردة.

الشكل (c 1-7) مخطط الاستطاعة لمنوبة في محطة قطينة.

الشكل (d 1-7) مخطط الاستطاعة لمنوبة في محطة بانياس.

1-6 حساب الجريان في الخطوط :Line Flows and Losses

بعد حساب توترات العقد من خلال عمليات التكرار يتم في المرحلة التالية حساب الجريان في الخطوط والضياعات. لنعتبر الخط الواصل بين العقدتين i و j في الشكل (1-8)، حيث تيار الخط I_{ij} مقاس عند الباسبار i ويعتبر موجباً في الاتجاه من i إلى j ويساوي:

$$I_{ij} = I_{\ell} + I_{i0} = y_{ij}(V_i - V_j) + y_{i0}V_i \quad (1-38)$$

الشكل (1-8) دائرة π المكافئة لخط النقل /8/.

وبشكل مشابه تيار الخط I_{ji} مقاس عند الباسبار j ويعتبر موجباً في الاتجاه من j إلى i ويساوي:

$$I_{ji} = -I_{\ell} + I_{i0} = y_{ji}(V_j - V_i) + y_{j0}V_j \quad (1-39)$$

وتكون الاستطاعة العقدية S_{ij} من الباسبار i إلى الباسبار j والاستطاعة العقدية S_{ji} من الباسبار j إلى الباسبار i :

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* \quad (1-40)$$

$$S_{ji} = V_j I_{ji}^* \quad (1-41)$$

ويكون ضياع الاستطاعة في الخط $i-j$ هو المجموع الجبري لجريان الاستطاعة المحدد من العلاقات (1-40) و (1-41) أي:

$$S_{L\ ij} = S_{ij} + S_{ji} \quad (1-42)$$

مثال (1-5):

يبين الشكل (1-9) مخطط الخط الواحد لنظام قدرة بسيط مكون من ثلاثة باسبارات، الباسبار 1 هو باسبار توليد، وقد تم ضبط طويلة التوتر في هذا الباسبار على القيمة 1.05 pu. استطاعة الأحمال على العقد 2, 3 هي الاستطاعات المبينة على المخطط، وممانعات الخطوط معطاة بال Per unit منسوبة لأساس 100 MVA والسماحيات التفرعية للخط مهمة.

الشكل (1-9) مخطط الخط الواحد للمثال (1-5) .

الممانعات بالكميات الواحدة منسوبة إلى أساس 100 MVA

- (a) باستخدام طريقة غاوص-زايدل المطلوب تحديد القيم الطورية للتوتر على
باسبارات الأحمال 2 و 3 (باسبارات P-Q) وبحيث تكون الدقة $\varepsilon = 0.0001$
(b) أوجد الاستطاعة الفعالة والردية لباسبار المرجع.
(c) احسب جريان الحمولة على الخطوط والضياعات، وارسم مخطط جريان الحمولة
مبيناً اتجاه الجريان.

الحل:

- (a) نحول ممانعات الخط إلى سماحيات:

$$y_{12} = \frac{1}{0.02 + j0.04} = 10 - j20$$

وبشكل مشابه $y_{13} = 10 - j30$ و $y_{23} = 16 - j32$ ، وهذه السماحيات مبنية على الشكل
(6-10). الاستطاعة العقدية على باسبارات الحمولة (P-Q) بالكميات الواحدة هي:

$$S_2 = -\frac{(256.6 + j110.2)}{100} = -2.566 - j1.102 \text{ pu}$$

$$S_3 = -\frac{(138.6 + j45.2)}{100} = -1.386 - j0.452 \text{ pu}$$

من المعادلة (1-28) وبأخذ الباسبار 1/ كعقدة مرجع (Slack bus) نبدأ بحساب
التوترات V_2, V_3 انطلاقاً من القيمة الابتدائية:

$$V_3^{(0)} = 1.0 + j0.0, \quad V_2^{(0)} = 1 + j0.0$$

كما يلي:

الشكل (1-10) مخطط الواحد للمثال (1-5) .

السماحيات بالكميات الواحدة نسبة لأساس 100 MVA

$$V_2^{(1)} = \frac{\frac{P_2 - jQ_2}{V_2^{*(0)}} + y_{21}V_1 + y_{23}V_3^{(0)}}{y_{12} + y_{23}}$$

$$= \frac{\frac{-2.566 + j1.102}{1.0 - j0} + (10 - j20)(1.05 + j0) + (16 - j32)(1.0 + j0)}{(26 - j52)}$$

$$= 0.9825 - j0.0310$$

و

$$V_3^{(1)} = \frac{\frac{P_3 - jQ_3}{V_3^{*(0)}} + y_{13}V_1 + y_{23}V_2^{(1)}}{y_{13} + y_{23}}$$

$$= \frac{\frac{-1.386 + j0.452}{1 - j0} + (10 - j30)(1.05 + j0) + (16 - j32)(0.9825 - j0.0310)}{(26 - j62)}$$

$$= 1.0011 - j0.0353$$

ومن أجل التكرار الثاني لدينا

$$V_2^{(2)} = \frac{\frac{-2.566 + j1.102}{0.9825 + j0.0310} + (10 - j20)(1.05 + j0) + (16 - j32)(1.001 - j0.0353)}{(26 - j52)}$$

$$= 0.9816 - j0.0520$$

و

$$V_3^{(2)} = \frac{\frac{-1.386 + j0.452}{1.0011 + j0.0353} + (10 - j30)(1.05 + j0) + (16 - j32)(0.9816 - j0.052)}{(26 - j62)}$$

$$= 1.0008 - j0.0459$$

وهكذا تستمر عمليات التكرار إلى أن نصل إلى الحل بدقة 5×10^{-5} بعد سبع عمليات تكرار :

$$\begin{aligned} V_2^{(3)} &= 0.9808 - j0.0578 , & V_3^{(3)} &= 1.0004 - j0.0488 \\ V_2^{(4)} &= 0.9803 - j0.0594 , & V_3^{(4)} &= 1.0002 - j0.0497 \\ V_2^{(5)} &= 0.9801 - j0.0598 , & V_3^{(5)} &= 1.0001 - j0.0499 \\ V_2^{(6)} &= 0.9801 - j0.0599 , & V_3^{(6)} &= 1.0000 - j0.0500 \\ V_2^{(7)} &= 0.9800 - j0.0600 , & V_3^{(7)} &= 1.0000 - j0.0500 \end{aligned}$$

وبالتالي الحل النهائي:

$$V_2 = 0.9800 - j0.0600 = 0.98183 \angle -3.5035^\circ \text{ pu}$$

$$V_3 = 1.0000 - j0.0500 = 1.00125 \angle -2.8624^\circ \text{ pu}$$

(b) بعد معرفة توترات كل العقد يمكن الحصول على استطاعة باسبار المرجع من المعادلة (1-27)

$$\begin{aligned} P_1 - jQ &= V_1^* [V_1(y_{12} + y_{13}) - (y_{12} V_2 + y_{13} V_3)] \\ &= 1.05 [105(20 - j50) - (10 - j20)(0.98 - j0.06) - (10 - j30)(1.0 - j0.05)] \\ &= 4.095 - j1.980 \end{aligned}$$

أي أن الاستطاعة الفعالة والردية لبا سبار المرجع

$$P_1 = 4.095 \text{ pu} = 409.5 \text{ MW}$$

$$Q_1 = 1.980 \text{ pu} = 189 \text{ Mvar}$$

(c) لحساب الجريان على الخطوط نبدأ بحساب التيارات حيث وبإهمال ساعات الخط يكون لدينا:

$$\begin{aligned} I_{12} &= y_{12}(V_1 - V_2) = (10 - j20) [(1.05 + j0) - (0.98 - j0.06)] \\ &= 1.9 - j0.8 \end{aligned}$$

$$I_{21} = -I_{12}$$

$$\begin{aligned} I_{13} &= y_{13}(V_1 - V_3) = (10 - j30) [(1.05 + j0) - (1.0 - j0.05)] \\ &= 2.0 - j1.0 \end{aligned}$$

$$I_{31} = -I_{13} = -2.0 + j1.0$$

$$\begin{aligned} I_{23} &= y_{23}(V_2 - V_3) = (16 - j32) [(0.98 - j0.06) - (1 - j0.05)] \\ &= -0.64 + j4.8 \end{aligned}$$

$$I_{32} = -I_{23} = 0.64 - j4.8$$

وبالتالي الاستطاعة على الخطوط

$$\begin{aligned} S_{12} &= V_1 I_{12}^* = (1.05 + j0.0) (1.9 + j0.8) = 1.995 + j0.84 \text{ pu} \\ &= 199.5 \text{ MW} + j 84.0 \text{ Mvar} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{21} &= V_2 I_{21}^* = (0.98 - j0.06) (-1.9 - j0.8) = -1.91 - j0.67 \text{ pu} \\ &= -191.0 \text{ MW} - j 67.0 \text{ Mvar} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{13} &= V_1 I_{13}^* = (1.05 + j0.0) (2.0 + j1.0) = 2.1 + j1.05 \text{ pu} \\ &= 210.0 \text{ MW} + j 105.0 \text{ Mvar} \end{aligned}$$

$$S_{31} = V_3 I_{31}^* = (1.0 - j0.05) (-2.0 - j1.0) = -2.05 - j0.90 \text{ pu}$$

$$= -205.0 \text{ MW} + j90.0 \text{ Mvar}$$

$$S_{23} = V_2 I_{23}^* = (0.98 - j0.06) (-0.656 + j0.48) = -0.656 - j0.432 \text{ pu}$$

$$= -65.6 \text{ MW} - j43.2 \text{ Mvar}$$

$$S_{32} = V_3 I_{32}^* = (1.0 - j0.05) (0.64 + j0.48) = 0.664 + j0.448 \text{ pu}$$

$$= 66.4 \text{ MW} + j44.8 \text{ Mvar}$$

وتكون ضياعات الخط

$$S_{L12} = S_{12} + S_{21} = 8.5 \text{ MW} + j17.0 \text{ Mvar}$$

$$S_{L13} = S_{13} + S_{31} = 5.0 \text{ MW} + j15.0 \text{ Mvar}$$

$$S_{L23} = S_{23} + S_{32} = 0.8 \text{ MW} + j1.60 \text{ Mvar}$$

ويبين الشكل (1-11) مخطط جريان الحمولة مبيناً عليه اتجاه جريان الاستطاعة الفعالة والردية، أما القيم المشار إليها ضمن أقواس فهي ضياعات الاستطاعة الفعالة والردية على الخط.

الشكل (1-11) مخطط جريان الاستطاعة للمثال (1-5).

الاستطاعة بـ MW و Mvar

مثال (1-6):

يبين الشكل (1-12) مخطط الخط الواحد لنظام قدرة بسيط مكون من ثلاث باسبارات، الباسبارات 1 و 3 هي باسبارات توليد، بينما الباسبار 2 هو باسبار حمولة. يتم تعيين طول التوتر على الباسبار 1 على القيمة 1.05 pu ، وتثبت طول التوتر في العقدة 3 على القيمة 1.04 pu مع استطاعة فعالة مولدة 200 MW. يتكون الحمل في الباسبار 2 من 400 MW و 250 Mvar، ممانعات الخطوط معطاة بال pu منسوبة لأساس 100 MVA، وسماحيات الخط التفرعية مهملة. المطلوب إنجاز جريان الحمولة بطريقة غاوص-زايدل بما في ذلك جريان الحمولة على الخطوط والضياعات.

الحل:

الشكل (1-12) مخطط الخط الواحد للمثال (1-6).

الممانعات منسوبة لأساس 100 MVA

تحول ممانعات الخطوط إلى سماحيات حيث نحصل على :

$$y_{12} = 10 - j20 , \quad y_{13} = 10 - j30 , \quad y_{23} = 16 - j32$$

استطاعات التوليد والأحمال بالكميات الواحدة:

$$S_2 = -\frac{(400 + j250)}{100} = -4.0 - j2.5 \text{ pu}$$

$$P_3 = \frac{200}{100} = 2.0 \text{ pu}$$

الباسبار 1 هو باسباب المرجع، من المعادلة (1-28) نحسب قيم التوترات V_2, V_3 انطلاقاً من القيم الابتدائية :

$$V_2^{(0)} = 1.0 + j0.0 , \quad V_3^{(0)} = 1.04 + j0.0$$

$$V_2^{(1)} = \frac{\frac{P_2 - jQ_2}{V_2^{*(0)}} + y_{12}V_1 + y_{23}V_3^{(0)}}{y_{12} + y_{23}}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\frac{-4.0 + j2.5}{1.0 - j0} + (10 - j20)(1.05 + j0) + (16 - j32)(1.04 + j0)}{(26 - j52)} \\ &= 0.97462 - j0.042307 \end{aligned}$$

ونلاحظ هنا أن الباسبار 3 هو باسبار منظم حيث فيه كل من طويلة التوتر والاستطاعة الفعالة هي قيم معلومة، ولأجل هذا النوع من الباسبارات نحسب أولاً الاستطاعة الردية من المعادلة (1-30).

$$\begin{aligned} Q_3^{(1)} &= -I_m \{ V_3^{*(0)} [V_3^{(0)} (y_{13} - y_{23}) - y_{13} V_1 - y_{23} V_2^{(1)}] \} \\ &= -I_m \{ (1.04 - j0) [1.04 + j0] (26 - j62) - (10 - j30) (1.05 + j0) - \\ &\quad (16 - j32) (0.97462 - j0.042307) \} \\ &= 1.16 \end{aligned}$$

وتستخدم القيمة $Q_3^{(1)}$ لحساب توتر الباسبار 3 كما يلي:

$$\begin{aligned} V_3^{(1)} &= \frac{\frac{P_3 - jQ_3}{V_3^{*(0)}} + y_{13} V_1 + y_{23} V_2^{(1)}}{y_{13} + y_{23}} \\ &= \frac{\frac{2.0 - j1.16}{1.04 - j0} + (10 - j30) (1.05 + j0) + (16 - j32) (0.9742 - j0.042307)}{(26 - j62)} \\ &= 1.03783 - j0.005170 \end{aligned}$$

وبما أن $|V_3|$ يبقى ثابتاً على القيمة 1.04 فإننا نستبقي فقط القسم التخيلي من $V_3^{(1)}$ ، أي $f_3^{(1)} = -0.005170$ ، أما القسم الحقيقي فنحصل عليه من العلاقة:

$$e_3^{(1)} = \sqrt{(1.04)^2 - (0.005170)^2} = 1.039987$$

وبالتالي:

$$V_3^{(1)} = 1.039987 - j0.005170$$

من أجل عملية التكرار الثانية يكون لدينا

$$V_2^{(2)} = \frac{\frac{P_2 - jQ_2}{V_2^{*(1)}} + y_{21} V_1 + y_{23} V_3^{(1)}}{y_{12} + y_{23}}$$

$$= \frac{-4.0 + j2.5}{0.97462 + j0.42307} + (10 - j20)(1.05) + (16 - j32)(1.039987 + j0.005170)$$

$$= \frac{(26 - j52)}{(26 - j52)}$$

$$= 0.971057 - j0.043432$$

$$Q_3^{(2)} = -I_m \{V_3^{*(1)} [V_3^{(1)} (y_{13} + y_{23}) - y_{13} V_1 - y_{23} V_2^{(1)}]$$

$$= -I_m \{(1.039987 + j0.005170)[(1.03987 - j0.005170)(26 - j62) - (10 - j30)(1.05 + j0) - (16 - j32)(0.971057 - j0.042432)]\}$$

$$= 1.38769$$

$$V_3^{(2)} = \frac{\frac{P_3 - jQ_3}{V_3^{*(1)}} + y_{13} V_1 + y_{23} V_2^{(2)}}{y_{13} + y_{23}}$$

$$= \frac{2.0 - j1.38796}{1.039987 + j0.00517} + (10 - j30)(1.05) + (16 - j32)(0.971057 - j0.042432)$$

$$= \frac{(26 - j62)}{(26 - j62)}$$

$$= 1.03908 - j0.00730$$

وبما أن $|V_3|$ يبقى ثابتاً على القيمة 1.04 pu فإننا نستبقي فقط الجزء التخيلي من $V_3^{(2)}$ ، أي $f_3^{(2)} = -0.00730$ ، أما القسم الحقيقي فيتم حسابه بالشكل:

$$e_3^{(2)} = \sqrt{(1.04)^2 - (0.00730)^2} = 1.039974$$

وبالتالي

$$V_3^{(2)} = 1.039974 - j0.00730$$

ونستمر بعمليات التكرار إلى أن تتقارب إلى نقطة الحل بدقة 5×10^{-5} بعد سبع عمليات تكرار.

$$V_2^{(3)} = 0.97073 - j0.04479, Q_3^{(3)} = 1.42904, V_3^{(3)} = 1.03996 - j0.00833$$

$$V_2^{(4)} = 0.97065 - j0.04533, Q_3^{(4)} = 1.44833, V_3^{(4)} = 1.03996 - j0.00873$$

$$V_2^{(5)} = 0.97062 - j0.04555, Q_3^{(5)} = 1.45621, V_3^{(5)} = 1.03996 - j0.00893$$

$$V_2^{(6)} = 0.97061 - j0.04565, Q_3^{(6)} = 1.45947, V_3^{(6)} = 1.03996 - j0.00900$$

$$V_2^{(7)} = 0.97061 - j0.04569, Q_3^{(7)} = 1.46082, V_3^{(7)} = 1.03996 - j0.00903$$

ويكون الحل النهائي

$$V_2 = 0.97168 \angle -2.6948^\circ \text{ pu}$$

$$S_3 = 2.0 + j1.4617 \text{ pu}$$

$$V_3 = 1.04 \angle -0.498^\circ \text{ pu}$$

$$S_1 = 2.1842 + j1.4085 \text{ pu}$$

ويحسب جريان الحمولة على الخطوط والضيعات كما ورد سابقاً في المثال (1-5) وبالتالي نحصل على النتائج التالية مقدرة بالـ MW و Mvar.

$$S_{12} = 179.36 + j118.34$$

$$S_{21} = -170.97 - j101.947$$

$$S_{L12} = 8.39 + j16.79$$

$$S_{13} = 39.07 + j22.118$$

$$S_{31} = -38.88 - j21.569$$

$$S_{L13} = 0.18 + j0.548$$

$$S_{23} = -229.03 - j148.05$$

$$S_{32} = 238.88 + j167.746$$

$$S_{L23} = 9.85 + j19.69$$

ويبين الشكل (1-13) مخطط جريان الحمولة مبيناً عليه اتجاه جريان الاستطاعة الفعالة والردية، أما القيم المشار إليها ضمن أقواس فهي ضياعات الاستطاعة الفعالة والردية على الخط.

الشكل (1-13) مخطط جريان الحمولة للمثال (1-8).

الاستطاعة بالـ MW و Mvar

7-1 تأثير المحولات المبدلة للوضعيات Tap Changing Transformers:

رأينا سابقاً أن جريان الاستطاعة الفعالة على طول الخط يتحدد بفرق الزاوية لتوترات النهايتين، أما جريان الاستطاعة الردية فيتحدد بصورة رئيسية بفرق طويلة توترات النهايتين.

ومن المعلوم أنه يمكن التحكم بالاستطاعة الفعالة والردية عن طريق المحولات المبدلة للوضعيات (المعدلة للتوتر) وكذلك عن طريق محولات التنظيم. في المحول المبدل للوضعيات وعندما تكون نسبة التحويل عند القيمة الاسمية فإن المحول يمثل سماحية تسلسلية y_t بالكميات الواحدية، أما عندما تكون نسبة التحويل مختلفة عن القيمة الاسمية فإن سماحية المحول بالكميات الواحدية تكون مختلفة في كلا طرفي المحول ولا بد في هذه الحالة من تعديل السماحية لإدخال تأثير اختلاف نسبة التحويل عن القيمة الاسمية.

لنعتبر المحول ذا سماحية y_t على التسلسل مع محول مثالي نسبة تحويله تختلف عن القيمة الاسمية وتساوي $1:a$ كما هو مبين بالشكل (1-14). السماحية y_t بالكميات الواحدية توافق نسبة تحويل الملفات الاسمية بينما a هي الوضعية بالكميات الواحدية التي تختلف عن الوضعية الطبيعية والتي تسمح بتعديل التوتر بمقدار صغير وعادة ما يكون $\pm 10\%$ ، وفي حالة المحولات المعدلة للطور يكون a رقماً عقدياً.

لنفرض وجود باسبار وهمي x بين نسبة التحويل والسماحية للمحول، وبما أن الاستطاعة العقدية في كلٍ من جهتي المحول هي نفسها فإنه ينتج عن ذلك أن تغير التوتر يتم من خلال إزاحة موجبة لزاوية الطور وتغير التيار يتم من خلال إزاحة سالبة لزاوية الطور. لذلك ومن أجل الاتجاه المفروض للتيارات يكون لدينا:

$$V_x = \frac{1}{a} V_j \quad (1-43)$$

$$I_i = -a^* I_j \quad (1-44)$$

ويعطى التيار I_i بالعلاقة:

$$I_i = y_t (V_i - V_x)$$

الشكل (1-14) محول بنسبة تحويل 1:a

بتعويض V_x نحصل على:

$$I_i = y_t V_i - \frac{y_t}{a} V_j \quad (1-45)$$

كذلك لدينا من المعادلة (1-44):

$$I_j = -\frac{1}{a^*} I_i$$

وبتعويض I_i من المعادلة (1-45) يكون لدينا

$$I_i = -\frac{y_t}{a^*} V_i + \frac{y_t}{|a|^2} V_j \quad (1-46)$$

وبكتابة (1-45) و (1-46) على شكل مصفوفة ينتج لدينا

$$\begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_t & -\frac{y_t}{a} \\ -\frac{y_t}{a^*} & \frac{y_t}{|a|^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} \quad (1-47)$$

وتمثل دائرة π في الشكل (1-15) مصفوفة السماحيات الواردة في المعادلة (1-47) للحالة عندما يكون a عدداً حقيقياً، وفي هذه الدائرة يمثل الجانب اليساري الجانب

الذي لا يوجد فيه تبديل للتفرعات بينما يمثل الجانب اليميني الجانب الذي يوجد فيه تبديل للتفرعات.

الشكل (1-15) الدارة المكافئة للمحول المبدل للوضعيات.

8-1 حل مسألة جريان الحمولة بطريقة نيوتن- رافسون (NR)

Newton-Raphson Power Flow Solution (NR):

نفرض أن جميع القضبان من نوع PQ. لأجل أي باسبار PQ يجب أن يحقق

حل جريان الحمولة المعادلات التالية:

$$f_{ip}(|V|, \delta) = P_i(\text{specified}) - P_i = 0 \quad (1-48)$$

$$f_{iq}(|V|, \delta) = Q_i(\text{specified}) - Q_i = 0 \quad (1-49)$$

حيث

$$P_i = V_i \sum_{k=1}^n V_k Y_{ik} \cos(\theta_{ik} + \delta_{ki})$$

أو

$$P_i = V_i \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \cos \delta_{ik} + B_{ik} \sin \delta_{ik}) \quad (1-50)$$

$$Q_i = -V_i \sum_{k=1}^n V_k Y_{ik} \sin(\theta_{ik} + \delta_{ik})$$

أو

$$Q_i = V_i \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \sin \delta_{ik} - B_{ik} \cos \delta_{ik}) \quad (1-51)$$

حيث:

$$\delta_{ki} = \delta_k - \delta_i, \quad Y_{ik} = G_{ik} + jB_{ik}$$

لأجل قيم مفترضة لـ δ_i ، نحسب $|V_i|$ من $f^{(0)}$

$$f_{iP} = P_i (\text{specified}) - P_i (\text{calculated}) = \Delta P_i \quad (1-52)$$

$$f_{iQ} = Q_i (\text{specified}) - Q_i (\text{calculated}) = \Delta Q_i \quad (1-53)$$

حيث Δx^0 هنا تقابل :

$$\Delta |V_i|, \quad \Delta \delta_i$$

ويمكن كتابة المعادلة (1-20) لهذه الحالة كما يلي:

$$(1-54)$$

حيث:

$$\begin{aligned} H_{im} &= \frac{\partial P_i}{\partial \delta_m} \\ N_{im} &= \frac{\partial P_i}{\partial |V_m|} \\ J_{im} &= \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_m} \\ L_{im} &= \frac{\partial Q_i}{\partial |V_m|} \end{aligned} \quad (1-55)$$

ونلاحظ أن كل عنصر يعقوبي يربط بين f_i (أي ΔP_i ، ΔQ_i) و Δx_m (أي $\Delta \delta_m$) ، $\Delta |V_m|$ هو متريس 2×2 حيث i و m من نوع PQ .
 - نظراً لأن P_1 ، Q_1 للباسبار المرجع (ذي الرقم 1) غير معينة، و $|V_1|$ ، δ_1 محددة، فليس لهذا الباسبار معادلات من نوع (1-48) و (1-49). لذلك لا يدخل الباسبار المرجع في المتريس العنقوبي.

- لنعتبر الآن وجود قضبان من نوع P-V
 إذا كان القضيب i من نوع P-V، فإن Q_i له تكون غير معينة وبالتالي لا وجود لمعادلة مقابلة لـ (1-49) لذلك تصبح العناصر العنقوبية للقضيب i صفراً واحداً كما يلي:

(1-56)

إذا كان القضيب m أيضاً م نوع $P-V$ ، تصبح $|V_m|$ محددة أي $\Delta|V_m|=0$ ونكتب:

(1-57)

وأخيراً إذا كان القضيب i من نوع $P-Q$

و إذا كان القضيب m من نوع $P-V$

نكتب

(1-58)

- من المناسب للحل العددي أن نستخدم التوتر المنسوب :

بدلاً من $\Delta|V_m|$ ، وتصبح العناصر اليعقوبية:

$$\begin{aligned} N_{im} &= \frac{\partial P_i}{\partial |V_m|} |V_m| \\ L_{im} &= \frac{\partial Q_i}{\partial |V_m|} |V_m| \end{aligned} \quad (1-59)$$

ويمكن اشتقاق العلاقات التي تعطي العناصر اليعقوبية (المنسوبة) ونلخصها فيما يلي:

$$\begin{aligned} \text{cose } 1 \quad m \neq i \\ H_{im} = L_{im} = a_m f_i - b_m e_i \\ N_{im} = -J_{im} = a_m e_i + b_m f_i \end{aligned} \quad (1-60)$$

حيث

$$\begin{aligned} Y_{im} &= G_{im} + jB_{im} \\ V_i &= e_i + jf_i \\ (a_m + jb_m) &= (G_{im} + jB_{im})(e_m + jf_m) \\ a_m &= G_{im}e_m - B_{im}f_m \\ b_m &= G_{im}f_m + B_{im}e_m \end{aligned}$$

case 2 $m = i$

$$\begin{aligned} H_{ii} &= -Q_i - B_{ii} |V_i|^2 \\ N_{ii} &= P_i + G_{ii} |V_i|^2 \\ J_{ii} &= P_i - G_{ii} |V_i|^2 \\ L_{ii} &= Q_i - B_{ii} |V_i|^2 \end{aligned} \quad (1-61)$$

وتجدر هنا الإشارة إلى أنه عندما لا يوجد ارتباط بين القضيتين i و m فإن:

$$Y_{im} = 0 (G_{im} = B_{im} = 0)$$

وعليه

$$\begin{aligned} H_{im} &= H_{mi} = 0 \\ N_{im} &= N_{mi} = 0 \\ J_{im} &= J_{mi} = 0 \\ L_{im} &= L_{mi} = 0 \end{aligned} \quad (1-62)$$

وينتج أن الماتريس اليعقوبي هو Sparse مثل $[Y_{bus}]$ ، أي أنه يحوي عناصر يعقوبية معدومة . ويمكن أن نلخص المعادلة الماتريسية اليعقوبية كما يلي:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [H] & [N] \\ [J] & [L] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \frac{\Delta |V|}{V} \end{bmatrix} \quad (1-63)$$

فمثلاً إذا كانت باسبارات PV مرقمة من 2 إلى n_1 و باسبارات PQ مرقمة من n_1+1 إلى n تكون المعادلة اليعقوبية:

$$(1-64)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_{n_1+1} \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{2,2} & H_{2,3} & \dots & H_{2,n} & N_{2,n_1+1} & \dots & N_{2,n} \\ H_{3,2} & H_{3,3} & \dots & H_{3,n} & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & & \\ H_{n,2} & \dots & & H_{n,n} & N_{n_1,n_1+1} & \dots & N_{n,n} \\ J_{n_1+1,2} & \dots & & J_{n_1+1,n} & L_{n_1+1,n_1+1} & \dots & L_{n_1+1,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & & \vdots \\ J_{n,2} & \dots & & J_{n,n} & L_{n,n_1+1} & \dots & L_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \frac{\Delta |V_{n_1+1}|}{V_{n_1+1}} \\ \vdots \\ \frac{\Delta |V_n|}{V_n} \end{bmatrix}$$

مثال (1-7) :

أوجد المعادلة المترسية اليعقوبية لشبكة مؤلفة من خمسة باسبارات كما المبينة في الشكل (1-16)

الشكل (1-16) شبكة بخمسة باسبارات.

الحل:

$$P - V \quad 2 \dots n_1 = 3$$

$$P - Q \quad 4 \dots n = 5$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta P_5 \\ \Delta P_4 \\ \Delta P_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{22} & H_{23} & H_{24} & H_{25} & N_{24} & N_{25} \\ H_{32} & H_{33} & H_{35} & H_{35} & N_{34} & N_{35} \\ H_{42} & H_{43} & H_{44} & H_{45} & N_{44} & N_{45} \\ H_{52} & H_{54} & H_{54} & H_{55} & N_{54} & N_{55} \\ J_{42} & J_{43} & J_{44} & J_{45} & L_{44} & L_{45} \\ J_{52} & J_{53} & J_{54} & J_{55} & L_{54} & L_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \Delta \delta_4 \\ \Delta \delta_5 \\ \Delta V_4 / V_4 \\ \Delta V_5 / V_5 \end{bmatrix}$$

الألغوريتم:

الخطوات الأساسية لحل جريان الحمولة بواسطة NR هي:

(1) افرض قيما ل: $|V|$ ، δ لقضبان P-Q

δ لقضبان P-V

ننصح باعتبار رقم $|V| = 1 \text{ pu}$ إذا لم تكن هناك معلومات أخرى متوفرة.

للباسبار المرجع نثبت رقم $|V|$ و δ (عادة $\delta=0$)

(2) احسب:

ΔP_i لقضبان P-V و P-Q

ΔQ_i لجميع قضبان P-Q

من المعادلات (1-48) و (1-49) إذا كانت جميع القيم (ΔP_i ، ΔQ_i) تحقق الدقة المفروضة أوقف التكرار، ثم احسب P_1 و Q_1 واطبع الحلول بما فيها الجريان في الخطوط.

(3) إذا لم تتحقق الدقة المفروضة أحسب عناصر المتريس اليعقوبي وفق المعادلات (1-60) و (1-61).

(4) حل المعادلات (1-63) وأوجد التصحيحات لقيم التوتر والزوايا ($\Delta\delta$, ΔV).

(5) احسب القيم المحسنة لقيم التوترات والزوايا لجميع التصحيحات إلى القيم القديمة وارجع إلى الخطوة 2.

ملاحظات هامة:

- 1- في نهاية كل خطوة تقرب، نقوم بحساب Q_G لقضبان P-V وإذا كانت قيمتها خارج الحدود (Q_{Gmin} , Q_{Gmax}) تُفرض القيمة مساوية للحد الأقرب، ويُعامل الباسبار (أو الباسبارات) P-V على أنه P-Q لخطوة التقريب التالية. وفي حساب تالٍ إذا كانت Q_G ضمن الحدود نعيد الباسبار إلى نوعه الأصلي (أي P-V).
- 2- إذا فُرضت حدود لتوتر القضبان P-Q، وتبين من الحساب أن التوتر يتجاوز الحدود، نجعل القضيب من نوع P-Q لأجل خطوة التقريب التالية. أما لأجل خطوة التقريب الحالية فنضع قيمة التوتر مساوية لحد التوتر الأقرب.

مثال (1-8):

اعتبر النظام ثلاثي الباسبارات المبين في الشكل (17 - 1) كل خط له ممانعة تسلسلية $0.02 + j0.08 \text{ pu}$ وسماحية تفرعية كلية $j0.02 \text{ pu}$. المعطيات مبينة بالجدول التالي:

Bus	Real load demand P_D	Reactive load demand Q_D	Real power Generation P_G	Reactive power generation Q_G	Voltage specification
1	2.0	1.0	Unspecified	Unspecified	$V_1 = 1.04 + j0$ (slack bus)
2	0.0	0.0	0.5	1.0	Unspecified (P_Q bus)
3	1.5	0.6	0.0	$Q_{G3} = ?$	$ V_3 = 1.04$

					PV bus
--	--	--	--	--	--------

ويوجد منبع ردي قابل للتحكم للباس 3 وإمكانياته: $0 \leq Q_{G3} \leq 1.5 \text{ pu}$

الشكل (1-17) نظام قدرة مكون من ثلاث باسبارات للمثال (1-10).

أنجز جريان الحمولة بطريقة NR وإذا علمت أن $\varepsilon = 0.01$.

الحل:

نوجد Y_{bus} للنظام علماً أن تمثيل الخط بدارة π :

للخط:

$$y_{series} = \frac{1}{0.02 + j0.08} = 2.941 - j11.764 = 12.13 \angle 104.04^\circ$$

العنصر غير القطري من متريس سماحيات العقد هو:

$$\text{Each off-diagonal term} = -2.941 + j11.764$$

والعنصر القطري هو:

$$\begin{aligned}\text{Each self term} &= 2[(-2.941 - j11.764) + j0.01] \\ &= 5.882 - j23.508 = 24.23 \angle -75.95^\circ\end{aligned}$$

$$\therefore Y_{\text{BUS}} = \begin{bmatrix} 24.23 \angle -75.95^\circ & 12.13 \angle 104.04^\circ & 12.13 \angle 104.04^\circ \\ 12.13 \angle 104.04^\circ & 24.23 \angle -75.95^\circ & 12.13 \angle 104.04^\circ \\ 12.13 \angle 104.04^\circ & 12.13 \angle 104.04^\circ & 24.23 \angle -75.95^\circ \end{bmatrix}$$

الخطوة الأولى 1:

الشروط الابتدائية للمجاهيل:

$$V_2^0 = 1, \quad \delta_2^0 = 0$$

$$\delta_3^0 = 0$$

الخطوة الثانية: حساب

$$\Delta P_2, \Delta P_3, \Delta Q_2$$

من المعادلات (1-50) و (1-51) نحصل على :

$$\begin{aligned}P_2 &= |V_2| |V_1| |Y_{21}| \cos(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) + |V_2|^2 |Y_{22}| \cos \theta_{22} \\ &\quad + |V_2| |V_3| |Y_{23}| \cos(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P_3 &= |V_3| |V_1| |Y_{31}| \cos(\theta_{31} + \delta_1 - \delta_3) + |V_3|^2 |Y_{33}| \cos \theta_{33} \\ &\quad + |V_3| |V_2| |Y_{32}| \cos(\theta_{32} + \delta_2 - \delta_3)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Q_2 &= -|V_2| |V_1| |Y_{21}| \sin(\theta_{21} + \delta_1 - \delta_2) - |V_2|^2 |Y_{22}| \sin \theta_{22} \\ &\quad - |V_2| |V_3| |Y_{23}| \sin(\theta_{23} + \delta_3 - \delta_2)\end{aligned}$$

وبتعويض الشروط الابتدائية نجد:

$$P_2^0 = -0.23 \text{ pu}$$

$$P_3^0 = 0.12 \text{ pu}$$

$$Q_2^0 = -0.96 \text{ pu}$$

وعليه فالتوابع :

$$\begin{aligned}\Delta P_2^o &= P_2(\text{specified}) - P_2^o(\text{calculated}) \\ &= 0.5 - (-0.23) = 0.73\end{aligned}$$

$$\Delta P_3^o = -1.5 - (0.12) = -1.62$$

$$\Delta Q_2^o = 1 - (-0.96) = 1.96$$

ونلاحظ أن قيم التوابع جميعها لا تحقق الدقة المطلوبة.

الخطوة 3 والخطوة 4 والخطوة 5:

تغيرات التوابع في نهاية التكرار الأول تحسب كمايلي :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_3}{\partial |V_2|} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \Delta |V_2| \end{bmatrix}$$

تجري التفاضلات للعلاقات العائدة لـ P_2 ، P_3 ، Q_2 بدلالة δ_2 و δ_3 و $|V_2|$ ثم

نعوض في بداية التكرار ونحسب التصحيحات للمجاهيل:

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_2^1 \\ \Delta \delta_3^1 \\ \Delta |V_2|^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 24.47 & -12.23 & 5.64 \\ -12.23 & 24.95 & -3.05 \\ -6.11 & 3.05 & 22.54 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0.73 \\ -1.62 \\ 1.96 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.023 \\ -0.0654 \\ 0.089 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \delta_2^1 \\ \delta_3^1 \\ |V_2|^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_2^0 \\ \delta_3^0 \\ |V_2|^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^1 \\ \Delta \delta_3^1 \\ \Delta |V_2|^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.023 \\ -0.0654 \\ 0.089 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.023 \\ -0.0654 \\ 1.089 \end{bmatrix}$$

الآن نحسب باستخدام المعادلة (1-51) :

$$Q_3^1 = 0.4677$$

$$Q_{G3}^1 = Q_3^1 + Q_{D3} = 0.4677 + 0.6 = 1.0677$$

بمتابعة حل المسألة بواسطة الحاسب فنصل للدقة المطلوبة بثلاثة تكرارات.

والنتائج النهائية هي:

$$V_2 = 1.081 \angle -0.024 \text{ rad}$$

$$V_3 = 1.04 \angle -0.0655 \text{ rad}$$

$$Q_{G3} = -0.15 + 0.6 = 0.45 \text{ (within limits)}$$

$$S_1 = 1.031 + j(-0.791)$$

$$S_2 = 0.5 + j 1.00$$

$$S_3 = -1.5 - j 0.15$$

$$\text{Transmission loss} = 0.031 \text{ pu}$$

الجريان في الخطوط:

المتريس التالي يبين القسم الحقيقي لجريان الخطوط

$$\begin{bmatrix} 0.0 & 0.191312\text{E}00 & 0.839861\text{E}00 \\ -0.184229\text{E}00 & 0.00 & 0.684697\text{E}00 \\ -0.826213\text{E}00 & -0.673847\text{E}00 & 0.0 \end{bmatrix}$$

ويبين المتريس التالي القسم التخيلي (Q) لجريان الخطوط.

$$\begin{bmatrix} 0.0 & -0.599464E00 & -0.191782E00 \\ 0.605274E00 & 0.00 & 0.396045E00 \\ 0.224742E00 & -0.375165E00 & 0.0 \end{bmatrix}$$

يمكن حل المسألة بطريقة أقرب للحل بواسطة الكمبيوتر^(*).
الخطوة الثانية: من المعادلات (1-48) و (1-49) نحصل على:

$$P_2 = V_2[V_1(G_{21} \cos \delta_{21} + B_{21} \sin \delta_{21}) + V_2(G_{22} \cos \delta_{22} + B_{22} \sin \delta_{22}) + V_3(G_{23} \cos \delta_{23} + B_{23} \sin \delta_{23})]$$

$$P_3 = V_3[V_1(G_{31} \cos \delta_{31} + B_{31} \sin \delta_{31}) + V_2(G_{32} \cos \delta_{32} + B_{32} \sin \delta_{32}) + V_3(G_{33} \cos \delta_{33} + B_{33} \sin \delta_{33})]$$

$$Q_2 = V_2[V_1(G_{21} \sin \delta_{21} - B_{21} \cos \delta_{21}) + V_2(G_{22} \sin \delta_{22} - B_{22} \cos \delta_{22}) + V_3(G_{23} \sin \delta_{23} - B_{23} \cos \delta_{23})]$$

$$Q_3 = V_3[V_1(G_{31} \sin \delta_{31} - B_{31} \cos \delta_{31}) + V_2(G_{32} \sin \delta_{32} - B_{32} \cos \delta_{32}) + V_3(G_{33} \sin \delta_{33} - B_{33} \cos \delta_{33})]$$

بتعويض الشروط الابتدائية نجد:

$$P_2^0 = 1[1.04(-2.941) + 1(5.882) + 1.04(-2.941)] = -0.23528 \text{ pu}$$

$$P_3^0 = 1.04[1.04(-2.941) + (-2.941) + 1.04(5.882)] = 0.122 \text{ pu}$$

$$Q_2^0 = [1.04(-11.764) + (23.508) + 1.04(-11.764)] = -0.96 \text{ pu}$$

$$Q_3^0 = 1.04[1.04(-11.764) + (-11.764) + 1.04(23.508)] = 0.4678 \text{ pu}$$

نحسب الآن التوابع:

*- يُفضل إعادة ترقيم العقد بحيث يصبح رقم العقدة P-V هو 2 ورقم العقدة P-Q هو 3 لينسجم الحل مع النموذج الرياضي العام.

$$\begin{aligned}\Delta P_i^{(r)} &= P_{is} - P_i^{(r)} \\ \Delta Q_i^{(r)} &= Q_{is} - Q_i^{(r)} \\ \Delta P_2^0 &= 0.5 - (-0.23) = 0.73 > 0.01 \\ \Delta P_3^0 &= -1.5 - (0.12) = -1.62 > 0.01 \\ \Delta Q_2^0 &= 1 - (-0.96) = 1.96 > 0.01\end{aligned}$$

وبالمقارنة بين القيم المطلقة للتوابع والدقة (0.01) نلاحظ أن الدقة غير متحققة.

الخطوة 3 : المعادلة المتريسية هي:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{22} & H_{23} & N_{22} \\ H_{32} & H_{33} & N_{32} \\ J_{22} & J_{23} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \Delta V_2 / V_2 \end{bmatrix}$$

نحسب المتريسي الجزئي [H]: (*)

$$\begin{aligned}H_{22} &= -Q_2 - B_{22} V_2^2 = 0.93 + 23.508 - 1^2 = 24.468 \\ H_{33} &= -Q_3 - B_{33} V_3^2 = -0.4678 + 23.508 \times 1.04^2 = -24.958\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}H_{23} &= a_3 f_2 - b_3 e_2, \quad a_3 = G_{23} e_3 - B_{23} f_3 = -2.941 \times 1.04 = -3.0586 \\ b_3 &= G_{23} f_3 + B_{23} e_3 = 11.764 \\ H_{23} &= -11.764 \times 1.04 = -12.2346 \\ H_{32} &= -12.2346\end{aligned}$$

ثم نحسب [N]:

$$N_{22} = P_2 + G_{22} V_2^2$$

وهكذا نستمر بالحساب إلى أن نحصل على الدقة المطلوبة ويبين الشكل (1-18) المخطط الانسيابي لحساب جريان الحملولة بطريقة نيوتن - رافسون.

* $V_2 = e_2 + jf_2 = 1 + j0$
 $V_3 = e_3 + jf_3 = 1.04 + j0$



الشكل (1-18) المخطط الانسيابي لحساب جريان الحمولة بطريقة نيوتن - رافسون.

1-9 الطريقة السريعة لحساب جريان الحمولة:

Fast Decoupled Load Flow (FDLF)

تتميز خطوط شبكة النقل الكهربائية بقيمة عالية للنسبة X/R ، لذلك فإن تغيرات الاستطاعة الفعالة ΔP أقل حساسية لتغيرات طويلة التوتر، بالمقابل فإنها ذات حساسية أكبر لتغيرات زاوية الطور $\Delta \delta$. ولصورة مماثلة فإن الاستطاعة الردية أقل حساسية لتغيرات الزاوية وتتعلق بتغيرات طويلة التوتر. لهذا يمكن وضع عناصر المصفوفتين الجزئيتين $[N]$ و $[J]$ من مصفوفة يعقوبي مساوية للصفر أي:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [H] & 0 \\ 0 & [L] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \frac{\Delta |V|}{V} \end{bmatrix} \quad (1-65)$$

وبالتالي

$$[\Delta P] = [H][\Delta \delta] \quad (1-66)$$

$$[\Delta Q] = [L]\left[\frac{\Delta |V|}{V}\right] \quad (1-67)$$

ويمكن زيادة سرعة الخوارزمية طريقة نيوتن - رافسون لحساب جريان الحمولة دون أن يؤثر ذلك على دقة الحساب بشكل كبير وذلك باستخدام الطريقة السريعة لحساب جريان الحمولة التي طورها العالم B.Stott في عام 1974.

يستند الخوارزمية الطريقة السريعة (FDLF) Fast Decoupled Load Flow على الافتراض بأنه في حالة التشغيل الطبيعي للنظام يكون لدينا ما يلي:

$$\begin{aligned}\cos\delta_{ij} &\approx 1 \\ \sin\delta_{ij} &\approx 0 \\ G_{ij}\sin\delta_{ij} &\ll B_{ij}\end{aligned}\quad (1-68)$$

وأيضاً.

$$Q_i \ll B_{ii} |V_i|^2$$

وبوجود هذه الافتراضات فإنه يمكن تبسيط المصفوفات الجزئية [H] و [L] بصورة ملموسة بالشكل التالي:

$$H_{ij} = L_{ij} = -|V_i| |V_j| B_{ij} \quad i \neq j \quad (1-69)$$

و

$$H_{ii} = L_{ii} = -B_{ii} |V_i|^2 \quad i \neq j \quad (1-70)$$

المصفوفات [H] و [L] هي مصفوفات مربعة ذات أبعاد $(n_{PQ} + n_{PV})$ و n_{PQ} على التوالي ويمكن الآن كتابة المعادلات (1-66) و (1-67) بالشكل

$$[\Delta P] = [|V_i| |V_j| B'_{ij}] [\Delta \delta] \quad (1-71)$$

$$[\Delta Q] = [|V_i| |V_j| B''_{ij}] \left[\frac{\Delta |V|}{V} \right] \quad (1-72)$$

حيث B'_{ij} و B''_{ij} عناصر المصفوفة [-B].

ويمكن زيادة تبسيط الطريقة FDLF بأخذ الملاحظات التالية بالحسبان:

- 1- حذف عناصر الشبكة التي تؤثر غالباً على جريان الاستطاعة الردية من المصفوفة [B'] مثل المفاعلات التفرعية والوضعيات غير الاسمية لمبدل التفرعات.
 - 2- حذف إزاحة الطور من المصفوفة [B''] والناجمة عن تجهيزات إزاحة الطور.
 - 3- تقسيم كل من عناصر المعادلات (1-71) و (1-72) على $|V_i|$ ووضع $|V_j|=1pu$ في المعادلات.
 - 4- إهمال المقاومة التسلسلية عند حساب عناصر [B'] حيث عندها تصبح مصفوفة جريان الاستطاعة بالتيار المستمر DC.
- بإجراء التعديلات السابقة تصبح معادلات الطريقة FDLF كما يلي:

$$[\Delta P / |V|] = [B'] [\Delta \delta] \quad (1-73)$$

$$[\Delta Q / |V|] = [B''] [\Delta |V|] \quad (1-74)$$

كلتا المصفوفات [B'] و [B''] في المعادلات (1-73) و (1-74) حقيقية ولها نفس تركيبة [H] و [L] على التوالي.

وبما أنها تحوي فقط سماحيات فإنها تعتبر ثابتة ويلزمنا إجراء مقلوب لها فقط مرة واحدة، وعادة تكون في بداية الدراسة، وإذا لم يكن هناك تجهيزات إزاحة للطور فإن كل من [B'] و [B''] دائماً متناظرة وبالتالي بعد إنجاز مقلوب المصفوفة يتم تخزين الجزء العلوي منها فقط.

يتم حل المعادلات (1-73) و (1-74) دائماً باستخدام القيم الأحدث للتوترات، وبحيث تتضمن خطوة التكرار حل لـ $[\Delta \delta]$ لتحسين قيمة δ ، وحل الـ $[\Delta |V|]$ لتحسين قيمة $|V|$.

وفي نهاية كل عملية تكرار يتم التحقق من الوصول إلى الدقة المطلوبة كما يلي:

$$\max[\Delta P] \leq \varepsilon_p \quad , \quad \max[\Delta P] \leq \varepsilon_Q$$

حيث: ε_p ، ε_Q هو قيمة التسامح المفروض لكل من الاستطاعة الفعالة والردية، ويبين الشكل (1-19) المخطط الانسيابي لحساب جريان الحمولة بالطريقة السريعة.

الشكل (1-19) المخطط الانسيابي لحساب جريان الحملولة بالطريقة السريعة.

مثال (1-9):

لنعتبر نظام القدرة الكهربائي ثلاثي الفاسبارات المبين في المثال (1-8) والمطلوب حساب جريان الحملولة بإنجاز عملية تكرار واحدة بالطريقة السريعة. معادلات جريان الحملولة وفقاً لهذه الطريقة [انظر المعادلات (1-73) و (1-74)].

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta P_2^{(0)}}{|V_2^{(0)}|} \\ \frac{\Delta P_3^{(0)}}{|V_3^{(0)}|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B_{22} & -B_{23} \\ -B_{32} & -B_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(1)} \\ \Delta \delta_3^{(1)} \end{bmatrix}$$

و

$$\left[\frac{\Delta Q_2^{(0)}}{|V_2^{(0)}|} \right] = [-B_{22}] [\Delta |V^{(i)}|]$$

ومن ذلك ينتج

$$\begin{bmatrix} 0.73 \\ -1.62 \\ 1.04 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 23.508 & -11.764 \\ -11.764 & 23.508 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta^{(1)} \\ \Delta\delta^{(1)} \end{bmatrix}$$

وبحل هذه المعادلة نحصل على:

$$\Delta\delta_2^{(1)} = -0.003 \text{ rad}$$

$$\Delta\delta_3^{(1)} = -0.068 \text{ rad}$$

$$[2.125] = [23.508][\Delta | V_2']$$

$$\Delta | V_2' | = 0.09$$

$$| V_2' | = 1.09 \text{ pu}$$

ويمكننا الآن حساب Q_3 .

وتستخدم هذه القيم لحساب تباين استطاعة الباسبار لأجل عملية التكرار التالية، باستخدام القيم $[\Delta P/V]$ و $[\Delta Q/|V'|]$ فإن المعادلات السابقة تُحل بالتتالي عن طريق التعويض بالقيم الأحدث إلى أن يحدث التقارب إلى نقطة الحل ضمن الحدود الموضوعة.

10-1 مقارنة بين طرق حساب جريان الحمولة:

Comparison of Load Flow Methods:

سنقارن بين طريقتي غاوص-زايدل ونيوتن-رافسون عندما يستخدم في كلتا الطريقتين المصفوفة Y_{bus} كنموذج للشبكة. إن طريقة غاوص-زايدل تعمل بشكل جيد إذا تم برمجتها بشكل جيد مستخدمين الإحداثيات الديكارتية، بينما تتطلب طريقة نيوتن-رافسون ذواكر أكبر عند استخدام مثل هذه الإحداثيات، ولهذا فإنه يفضل بطريقة نيوتن-رافسون العمل بالإحداثيات القطبية.

تحتاج طريقة غاوص-زايدل لعدد أقل من العمليات الرياضية لإنجاز عملية التكرار، وذلك بسبب قلة العناصر في مصفوفة السماحيات وبساطة الطريقة في الوصول إلى الحل، وبالتالي فإن هذه الطريقة تتطلب زمناً أقل لكل عملية تكرار. بينما في طريقة نيوتن - رافسون فإننا نحتاج إلى حساب مصفوفة اليعقوبي في كل خطوة تكرار مما يزيد من عملية التكرار، وفي نظم القدرة النموذجية فإن زمن عملية التكرار بطريقة نيوتن رافسون يصل إلى سبعة أمثال هذا الزمن بطريقة غاوص زایدل. وعموماً فإن زمن عملية التكرار يزداد في كلتا الطريقتين بزيادة عدد قضبان التجميع للشبكة .

من ناحية أخرى فإن معدل التقارب بطريقة غاوص زایدل بطيء، ويتطلب عدداً أكبر من عمليات التكرار للوصول إلى نقطة الحل (مميزات خطية للتقارب) مقارنة مع هذا العدد بطريقة نيوتن- رافسون التي تتمتع بمميزات تقارب ثنائية الدرجة، ومن هذه الناحية فإن طريقة نيوتن-رافسون تعد أفضل الطرق.

بالإضافة إلى ذلك فإن عدد عمليات التكرار في طريقة غاوص-زايدل يزداد بازدياد عدد قضبان التجميع (الباسبارات) في الشبكة، بينما يبقى عدد عمليات التكرار في طريقة نيوتن -رافسون ثابتاً بغض النظر عن حجم النظام.

تحتاج طريقة نيوتن- رافسون في النظم الكبيرة من 3 إلى 5 عمليات تكرار للوصول إلى نقطة الحل المقبولة. وتتأثر عملية التقارب في عملية غاوص-زايدل باختيار باسبار المرجع ووجود مكثفات تسلسلية، في حين أن طريقة نيوتن-رافسون أقل حساسية لهذه العوامل التي تؤثر على عملية التقارب.

لهذا نجد أن طريقة نيوتن-رافسون لأجل نظم القدرة الكهربائية الكبيرة أسرع وذات دقة أعلى وأكثر وثوقية من طريقة غاوص-زايدل أو أية طريقة أخرى. وفي الواقع فإن هذه الطريقة صالحة لأجل أي حجم وأي نوع من المسائل. غير أن هذه

الطريقة أعقد من حيث البرمجة وتتطلب ذواكر كبيرة في الحاسب حتى في حال استخدام الطرق الحديثة في تخزين مصفوفة العنقوبي ومصفوفة السماحيات إلا أنه من ناحية أخرى يمكن زيادة سرعة هذه الطريقة باستخدام تقنية إعادة ترقيم الباسبارات. إن الميزة الرئيسية لطريقة غاوص-زايدل هي سهولة البرمجة وفعالية استخدام الذواكر، لكن استخدامها يقتصر على النظم الصغيرة الحجم نظراً لأنها في النظم الكبيرة قد لا تقترب إلى نقطة الحل. وكذلك بسبب الزمن الطويل اللازم للحساب في مثل هذه الأنظمة/

لهذا فإن طريقة نيوتن-رافسون ملائمة أكثر من طريقة غاوص-زايدل باستثناء الحالة التي يتم فيها التعامل مع الأنظمة الصغيرة. فيما يتعلق بالطريقة السريعة FDLF فإنه يتم التقارب إلى نقطة الحل خلال 3 إلى 5 عمليات تكرار وهذه الطريقة ذات وثوقية أكبر من طريقة نيوتن-رافسون، ويعود السبب في ذلك إلى أن عناصر كل من $[B']$ و $[B'']$ ذات تقريب ثابت إلى المماس لكل من التوابع $\Delta P/V$ و $\Delta Q/V$ وهي غير حساسة تجاه التحدبات عند إيجاد التوابع. إذا كانت $\Delta P/V$ و $\Delta Q/V$ محسوبة بصورة فعالة فإن سرعة الطريقة FDLF تكون أكبر بخمس مرات من طريقة نيوتن-رافسون العادية، وتشكل متطلبات التخزين لهذه الطريقة ما نسبته 60% من متطلبات التخزين لطريقة نيوتن-رافسون العادية.

وتستطيع هذه الطريقة التعامل مع تغييرات الشبكة والنظام بسهولة وإن كان الوصول إلى الحل في هذه الحالة يتطلب عدداً أكبر من عمليات التكرار، لكن كل عملية تكرار تأخذ من أقل وبالتالي فإن الزمن الكلي للحساب يبقى منخفضاً. ويمكن استخدام الطريقة FDLF لدراسات الأمثلة وخاصة في الحالات التي نحتاج فيها إلى معلومات دقيقة عن الاستطاعة الفعالة والردية في دراسات جريان الحملولة المتكررة كما هو الحال في الدراسات الإحصائية وتقييم أمان الشبكة.

ملاحظة: عند إنجاز سلسلة من حسابات جريان الحمولة فإن القيم النهائية لتوترات قضبان التجميع في كل حالة تستخدم كقيم ابتدائية للحالة التالية، وهذا يقلل من عدد مرات التكرار وخاصة عندما تكون التغيرات قليلة في شروط عمل النظام.

تطبيقات باستخدام الحاسوب

11-1 خوارزمية (ألفوريتم) لحل مسألة جريان حمولة بطريقة غاوص زايديل:

نفرض بدايةً أن الشبكة تحوي عقد نموذج P-Q فقط غير عقدة المرجع. خطوات الحساب معطية فيما يلي:

1- المعطيات:

* توتر القضيب المرجع (V_1, δ)

* الاستطاعات الفعالة والردية لكل باسبار عند المرجع P_i, Q_i

* المسائرات التسلسلية والتفرعية لجميع الفروع أو المتريس الأولي ومتريس الارتباط للشبكة.

2- تشكيل Y_{BUS} : باستخدام قاعدة المسائرات الذاتية والمتبادلة.

3- الحساب المتكرر لتوترات العقد $(V_i, i = 2, 3, \dots, n)$: قبل البدء بعمليات

التقريب نفرض قيماً أولية لتوترات جميع العقد عدا العقدة المرجع، ونفرض عادة قيم متساوية $1+j0$ ويجب الملاحظة أن المعادلات المطلوب حلها هي $n-1$ معادلة عقدية لإيجاد التوترات العقدية $V_2, V_3, \dots, V_n$.

وإذا كان الحساب بالكميات العقدية غير ممكن (حين استخدام لغة البيزيك

مثلاً)، فيمكن تحويل المعادلات (1-74) إلى $2(n-1)$ معادلة ذات مجاهيل حقيقية $(e_i,$

f_i or $|V_i|, \delta_i$) حيث:

$$V_i = e_i + jf_i = |V_i| e^{j\delta_i} \quad (1-75)$$

ينصح بإجراء العمليات الرياضية التي لا تتغير خلال عمليات التقريب، الأمر الذي يقلل زمن الحساب بشكل ملحوظ. ولنعرّف:

$$A_i = \frac{P_i - jQ_i}{Y_{ii}} \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (1-76)$$

$$B_{ik} = \frac{Y_{ik}}{Y_{ii}} \quad i = 2, 3, \dots, n$$

$$k = 1, 2, \dots, n$$

$$k \neq i \quad (1-77)$$

الآن تصبح المعادلة (1-74) لأجل خطوة التقريب (r+1) :

$$V_i^{(r+1)} = \frac{A_i}{(V_i^{(r)})^*} - \sum_{k=1}^{i-1} B_{ik} V_k^{(r+1)} - \sum_{k=i+1}^n B_{ik} V_k^{(r)} \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (1-78)$$

وتستمر خطوات التقريب حتى يصبح التغير في قيمة التوتر $|\Delta V_i^{(k+1)}|$ بين تقريبين متتاليين أصغر من تسامح معين لأجل جميع توترات العقد:

$$|\Delta V_i^{(r+1)}| = |V_i^{(r+1)} - V_i^{(r)}| < \varepsilon, \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (1-79)$$

4- حساب استطاعة الباسبار المرجع:

بتعويض توترات العقد المحسوبة في الخطوة 3 في المعادلة (1-27) نحصل على

$$S_i^* = P_i - jQ_i$$

5- حساب الجريان في الخطوط:

لحساب الجريان في الخطوط يتم تمثيل الخط الواصل بين القضيبين i و k والمحولات (إن وجدت) بدارة π

تعديل الألوغريتم عندما تحوي الشبكة أيضاً باسبارات نموذج P-V:

لأجل قضبان التجميع P-V تكون المعاليم P, V والمجاهيل Q, δ في كل عملية تقريب للباسبارات P-V. ونستخدم لذلك المعادلات المبينة أدناه وحسب الخطوات التالية:

1- من المعادلة (1-27) نجد:

$$Q_i = -\text{Im}\{V_i^* \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_k\}$$

ونحصل على القيمة المصححة لـ Q_i من المعادلة أعلاه بتعويض القيم الأحدث updated للتوترات في الطرف الأيمن للمعادلة، أي :

$$Q_i^{(r+1)} = -\text{Im}\{(V_i^{(r)})^* \sum_{k=1}^{i-1} Y_{ik} V_k^{(r+1)} + (V_i^{(r)})^* \sum_{k=i}^n Y_{ik} V_k^{(r)}\} \quad (1-80)$$

2- نحصل على القيمة المصححة لـ δ_i من المعادلة (1-78) مباشرة بعد الخطوة الأولى:

حيث:

$$\begin{aligned} \delta_i^{(r+1)} &= \angle V_i^{(r+1)} \\ &= \text{Angle of} \left[\frac{A_i^{(r+1)}}{(V_i^{(r)})^*} \sum_{k=1}^{i-1} B_{ik} V_k^{(r+1)} - \sum_{k=i+1}^n B_{ik} V_k^{(r)} \right] \end{aligned} \quad (1-81)$$

حيث:

$$A_i^{(r+1)} = \frac{P_i - jQ_i^{(r+1)}}{Y_{ii}} \quad (1-82)$$

ويبقى الألوثرىم للباسات P-Q على حالة.

إن الحدود الفيزيائية لتوليد الاستطاعة الردية تمثل في الألوثرىم بمقارنة قيمة Q_i المحسوبة مع $Q_{\max}$ و $Q_{\min}$ ، فإذا كانت واقعة بينهما فنعمد القيمة المحسوبة وإلا نقفز للخطوة 3.

3- عندما $Q_i^{(r+1)} < Q_{i,\min}$ نضع $Q_i^{(r+1)} = Q_{i,\min}$

ونعامل الباس i كباس P-Q فنحسب $A_i^{(r+1)}$ و $V_i^{(r+1)}$ من المعادلات (1-82) و (1-78) على الترتيب.

أما عندما $Q_i^{(r+1)} > Q_{i,\max}$ فنضع $Q_i^{(r+1)} = Q_{i,\max}$

ونعامل الباسبار i كباسبار P-Q أيضاً، ونحسب $A_i^{(r+1)}$ و $V_i^{(r+1)}$ من المعادلات (1-82) و (1-78) على الترتيب.

ويبين الشكل (1-20) المخطط الاسنيابي لحل معادلات جريان الحمولة لشبكة ذات n باسبار: الباسبار 1 هو المرجع والباسبارات $2, 3, \dots, n$ نموذج P-V ، الباسات $n, \dots, m+1$ نموذج P-Q بطريقة غاوص -زايذل.

مثال (1-10):

يبين الشكل (1-21) مخطط الخط الواحد لنظام بسيط رباعي القضبان. ويعطي الجدول (1-1) ممانعات الخطوط، ونفترض أن المسابيرات التفرعية لكل القضبان مهمة. ويبين الجدول (1-2) بيانات القضبان والمطلوب:

آ- أوجد مصفوفة السماحيات Y_{bus} مفترضاً أن الخط المنقط غير موجود.

ب- ماهي التعديلات الواجب إجراؤها على Y_{bus} إذا كان الخط المنقط موجوداً

ج- حساب التوترات للباسبارات الثلاثة في نهاية التقريب الأول بطريقة غاوص-
زايدل. القيم الأولية للتوترات العقدية $1+j0$.



الشكل (1-20) المخطط الانسيابي لحل معادلات جريان الحمولة بطريقة غاوس-زايدل.
د- إذا كان قضيب التجميع 2 في النظام السابق من النموذج P-V وله المعطيات التالية:

$$P_2 = 0.5 \text{ pu} , |V_2| = 1.04 \text{ pu}$$

والقيم الأولية للتوترات المجهولة هي:

$$\delta_2 = 0^\circ , V_3 = 1 \angle 0^\circ , V_4 = 1 \angle 0^\circ$$

فالمطلوب حساب Q_2, δ_2, V_3, V_4 في نهاية التقريب الأول للحالتين.

$$0.2 \leq Q_2 \leq 1 \text{ pu} \quad (1)$$

$$0.25 \leq Q_2 \leq 1 \text{ pu} \quad (2)$$

الشكل (1-21) النظام العائد للمثال (1-10)

الجدول (1-1) معطيات الخطوط:

Line bus to bus	R, pu	X, pu
1-2	0.05	0.15
1-3	0.10	0.30
2-3	0.15	0.45
2-4	0.1	0.3
3-4	0.05	0.15

الجدول (1-2) بيانات العقد:

Bus	Pi, pu	Qi, pu	Vi, Pu	Remarks
1	-	-	1.04∠0°	Slack bus
2	0.5	-0.2	-	P-Q bus
3	-1.0	0.5	-	P-Q bus
4	0.3	-0.1	-	P-Q bus

الحل:

$$y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R + jX} = \frac{R - jX}{R^2 + X^2} = G + jB$$

ونلخص النتائج في الجدول التالي

Line	G, pu	B, pu
1-2	2.0	-0.6
1-3	1.0	-3.0
2-3	0.666	-2.0
2-4	1.0	-3.0
3-4	2.0	-6.0

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \quad (i)$$

$$= \begin{bmatrix} y_{13} & 0 & -y_{13} & 0 \\ 0 & y_{23} + y_{24} & -y_{23} & -y_{24} \\ -y_{13} & -y_{23} & y_{31} + y_{32} + y_{34} & -y_{34} \\ 0 & -y_{24} & -y_{34} & y_{43} + y_{42} \end{bmatrix} \quad (ii)$$

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} 1-j3 & 0 & -1+j3 & 0 \\ 0 & 1.666-j5 & -0.666+j2 & -1+j3 \\ -1+j3 & -0.666+j2 & 3.666-j11 & -2+j6 \\ 0 & -1+j3 & -2+j6 & 3-j9 \end{bmatrix} \quad (iii)$$

إذا أضفنا خطأً بين القضيبين 1 و 2 فتعدل العناصر التالية:

$$Y_{12,new} = Y_{12,old} - (2-j6) = Y_{21,new}$$

$$Y_{11,new} = Y_{11,old} + (2-j6)$$

$$Y_{22,new} = Y_{22,old} + (2-j6)$$

ويصبح الماتريس المعدل كما يلي:

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} 3-j9 & -2+j6 & -1+j3 & 0 \\ -2+j6 & 3.666-j11 & -0.666+j2 & -1+j3 \\ -1+j3 & -0.666+j2 & 3.66-j11 & -2+j6 \\ 0 & -1+j3 & -2+j6 & 3-j9 \end{bmatrix} \quad (v)$$

(ج)

$$\begin{aligned}
V_2' &= \frac{1}{Y_{22}} \left\{ \frac{P_2 - jQ_2}{(V_2^0)^*} - Y_{21}V_1 - Y_{23}V_3^0 - Y_{23}V_3^0 - Y_{24}V_4^0 \right\} \\
&= \frac{1}{Y_{22}} \left\{ \frac{0.5 + j0.2}{1 - j0} - 1.04(-2 + j6) - (-0.666 + j2) - (-1 + j3) \right\} \\
&= \frac{4.246 - j11.04}{3.666 - j11} = 1.016 + j0.046 \quad \text{pu}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
V_3^1 &= \frac{1}{Y_{33}} \left\{ \frac{P_3 - jQ_3}{(V_3^0)^*} - Y_{31}V_1 - Y_{32}V_2^1 - Y_{34}V_4^0 \right\} \\
&= \frac{1}{Y_{33}} \left\{ \frac{-1 - j0.5}{1 - j0} - 1.04(-1 + j3) \right. \\
&\quad \left. - (-0.666 + j2)(1.019 + j0.046) - (2 + j6) \right\} \\
&= \frac{2.81 - j11.627}{3.666 - j11} = 1.028 - j0.087 \quad \text{pu}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
V_4^1 &= \frac{1}{Y_{44}} \left\{ \frac{P_4 - jQ_4}{(V_4^0)^*} - Y_{41}V_1 - Y_{42}V_2^1 - Y_{43}V_3^1 \right\} \\
&= \frac{1}{Y_{44}} \left\{ \frac{0.3 + j0.1}{1 - j0} - (-1 + j3)(1.019 + j0.046) \right. \\
&\quad \left. - (-2 + j6)(1.028 + j0.087) \right\} \\
&= \frac{2.991 - j9.253}{3 - j9} = 1.025 - j0.0093 \quad \text{pu}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q_2^1 &= -I_m \{ (V_2^0)^* Y_{21}V_1 + (V_2^0)^* [Y_{22}V_2^0 + Y_{23}V_3^0 + Y_{24}V_4^0] \} \\
&= -I_m \{ 1.04(-2 + j6)1.04 + 1.04[(3.666 - j11)1.04 \\
&\quad + (-0.666 + j2) + (-1 + j3)] \} \\
&= -I_m \{ -0.0693 - j0.2079 \} = 0.2079 \quad \text{pu}
\end{aligned}$$

(1) باعتبار أن Q_2^1 ضمن الحدود فنعمد هذه القيمة ونتابع الحل:

$$\delta_2^1 = \angle \left\{ \frac{1}{Y_{22}} \left[\frac{P_2 - jQ_2^1}{(V_2^0)^*} - Y_{21}V_1 - Y_{21}V_3^0 - Y_{24}V_4^0 \right] \right\}$$

$$\begin{aligned}
&= \angle \left\{ \frac{1}{3.666 - j11} \left[\frac{0.5 - j0.2079}{(-2 + j6)(1.04 + j0)} - (-0.666 + j2)(1 + j0) - (-1 + j3)(1 + j0) \right] \right\} \\
&= \angle \left(\frac{4.2267 - j11.439}{3.66 - j11} \right) = \angle(1.0512 + j0.0339)
\end{aligned}$$

or $\delta_2^1 = 1.84658^\circ = 0.032 \text{ rad}$
 $\therefore V_2^1 = 1.04(\cos \delta_2^1 + j \sin \delta_2^1)$
 $= 1.04(0.99948 + j0.0322)$
 $= 1.3946 + j0.03351$

$$\begin{aligned}
V_3' &= \frac{1}{Y_{33}} \left\{ \frac{P_3 - jQ_3}{(V_3^0)^*} - Y_{31} V_1 - Y_{32} V_2^1 - Y_{34} V_4^0 \right\} \\
&= \frac{1}{3.666 - j11} \left[\frac{-1 - j0.5}{(1 - j0)} - (-1 + j3)1.04 \right. \\
&\quad \left. - (-0.66 + j2)(1.03946 + j0.03351) - (-2 + j6) \right] \\
&= \frac{2.7992 - j11.6766}{3.666 - j11} = 1.0317 - j0.08937 \text{ pu}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
V_4' &= \frac{1}{Y_{44}} \left\{ \frac{P_4 - jQ_4}{(V_4^0)^*} - Y_{41} V_1 - Y_{42} V_2^1 - Y_{43} V_3^0 \right\} \\
&= \frac{1}{3 - j9} \left[\frac{0.3 + j0.1}{1 - j0} - (-1 + j3)(1.394 + j0.0335) \right. \\
&\quad \left. - (-2 + j6)(1.0317 - j0.08937) \right] \\
&= \frac{2.9671 - j8.9962}{3 - j9} = 0.9985 - j0.0031 \text{ pu}
\end{aligned}$$

(2) في هذه الحالة تكون Q_2 المحسوبة أصغر من الحد الأدنى لذلك نضع $Q_2 = 0.25 \text{ pu}$ ويصبح الباسبار 2 من النموذج P-Q ، لذلك لا يجوز إبقاء $|V_2|$ ثابتاً على القيمة 1.04. نحسب التوتر في 2 كما يلي :

(القيمة الأولية الآن لـ V_2 هي: $V_2^0 = 1 + j0$):

$$V_2^1 = \frac{1}{Y_{22}} \left(\frac{P_2 - jQ_2}{(V_2^0)^*} - Y_{21}V_1 - Y_{23}V_2^0 - Y_{24}V_4^0 \right)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{3.666 - j11} \left[\frac{0.5 - j0.25}{1 - j0} - (-2 + j6)1.04 \right. \\ &\quad \left. - (-0.666 + j2) - (-1 + j3) \right] \\ &= \frac{4.246 - j11.49}{3.666 - j11} = 1.0559 + j0.0341 \text{ pu} \end{aligned}$$

$$V_3^1 = \frac{1}{Y_{33}} \left(\frac{P_3 - jQ_3}{(V_3^0)^*} - Y_{31}V_1 - Y_{32}V_2^1 - Y_{34}V_4^0 \right)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{3.666 - j11} \left[\frac{-1 - j0.5}{1 - j0} - (-1 + j3)1.04 \right. \\ &\quad \left. - (-0.666 + j2)(1.0559 + j0.0341) - (-2 + j6) \right] \\ &= \frac{2.8112 - j11.709}{3.666 - j11} = 1.0347 - j0.0893 \text{ pu} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_4^1 &= \frac{1}{Y_{44}} \left[\frac{P_4 - jQ_4}{(V_4^0)^*} - Y_{41}V_1 - Y_{42}V_2^1 - Y_{43}V_3^1 \right] \\ &= \frac{1}{3 - j9} \left[\frac{0.3 + j0.1}{1 - j0} - (-1 + j3)(1.0509 + j0.0341) \right. \\ &\quad \left. - (-2 + j6)(1.0347 - j0.0893) \right] \\ &= \frac{4.0630 - j9.4204}{3 - j9} = 1.0775 + j0.0923 \text{ pu} \end{aligned}$$

12-1 برامج جريان الحمولة Power Flow Programs:

قامت عدد من الهيئات العملية والمؤسسات الصناعية بتطوير برامج حاسوبية فعالة لحساب جريان الحمولة في نظم القدرة الكهربائية العملية. ومعظم هذه

البرامج بشكل عام تتكون من أربعة أجزاء رئيسية أو أربعة برامج جزئية نلخصها فيما يلي (البرنامج يستخدم طريقة غاوص-زايدل):

1- برنامج معالجة بيانات الخطوط والمحولات:

يقوم هذا البرنامج بمعالجة بيانات الخطوط والمحولات حيث يطلب هذه البيانات من ملف الدخل ثم يقلب الممانعات إلى سماحيات ويشكل مصفوفة السماحيات.

2- برنامج حل معادلات جريان الحمولة:

وهذا البرنامج يصمم عادةً للتعامل مع استطاعة الأحمال والتوليد بال MW وال Mvar، ومع توترات الباسبارات بالكميات الواحدة ومع الزوايا بالدرجات، ويتم في سياق البرنامج قلب استطاعات الأحمال والتوليد إلى كميات واحدة بنسبها إلى أساس مختار بال MVA.

ويجري في البرنامج التحقق من أن الاستطاعة الردية لقضبان تجميع التوليد (القضبان نموذج P-V) هي ضمن الحدود المسموحة، ويمكن أن يحدث تجاوز لحدود الاستطاعة الردية إذا كانت قيمة التوتر المحدد عالية كثيراً أو منخفضة كثيراً. بعد إجراء عدة عمليات تكرار (بطريقة غاوص-زايدل 10 عمليات) يتم التحقق من أن الاستطاعة الردية المحسوبة لقضبان التوليد هي ضمن الحدود المسموحة، وإذا تم الوصول إلى الحدود الحدية لبعض القضبان، فإنه يجري تحويل هذه القضبان من النموذج P-V إلى النموذج P-Q كما ورد سابقاً في الألووريم.

3- برنامج إخراج نتائج الباسبارات:

يقوم هذا البرنامج بإخراج النتائج على شكل جداول، وتتضمن نتائج الباسبارات طويلة وزاوية التوتر، الاستطاعة الفعالة والرديّة للمولدات والأحمال، وكذلك الاستطاعة الرديّة للسعات والمفاعلات التفرعية. كما تتضمن النتائج الاستطاعة الكلية للتوليد والأحمال.

4- برنامج إخراج نتائج الخطوط:

يعرض هذا البرنامج الاستطاعة الفعالة والرديّة على الخطوط، كما تتضمن النتائج الضياعات الكلية للاستطاعة الفعالة والرديّة في النظام.

1-13 إعداد المعطيات:

لإنجاز حساب جريان الحمولة بطريقة غاوص-زايدل مثلاً فإنه يجب تحديد المتحولات التالية: استطاعة الأساس للنظام بالـ MVA، دقة الحساب، عامل التسريع، والعدد الأعظمي لعمليات التكرار: الرموز المخزنة لهذه المتحولات (أحرف صغيرة) هي: basemva, accuracy, accel, maxiter القيم النموذجية لهذه المتحولات كما يلي:

Basemva = 100
Accel = 1.6

accuracy = 0.001
maxiter = 80

الخطوة الأولى: في تحضير ملف بيانات الدخل هي ترقيم كل من الباسبارات، حيث يتم ترتيبها على التوالي، لكن هذا لا يعني بالضرورة انه يجب إدخالها على التوالي. بالإضافة إلى لك نحتاج إلى ملفات البيانات التالية:

1-13-1 ملف بيانات العقد:

يتم إدخال البيانات لكل باسبار على سطر واحد وبحيث ترتب هذه البيانات في النهاية على شكل مصفوفة، العمود الأول في هذه المصفوفة يمثل رقم الباسبار أما العمود الثاني فيحوي رمز الباسبار. العمود الثالث والرابع هما طولية التوتر بالكميات الواحدية وزاوية التوتر بالدرجات، أما العمود الخامس والسادس منها استطاعة الحمل بال MW وال Mvar. وتضم الأعمدة من السابع إلى العاشر بيانات التوليد وهي الاستطاعة الفعالة بال MW والاستطاعة الردية بال Mvar والحد الأعظمي والأصغري للاستطاعة الردية المولدة على التوالي. ويحوي العمود الأخير الاستطاعة الردية المحقونة من قبل المكثفات التفرعية، ويستخدم رمز الباسبار في العمود الثاني لتمييز نوع الباسبار من حيث كونه باسبار حمولة أو باسبار منظم أو باسبار مرجع وفقاً لما يلي:

0- يستخدم هذا الرمز لباسبارات الأحمال. تدخل الأحمال بال MW وال Mvar وبإشارة موجبة، ولأجل هذا النوع من الباسبارات لا بد من إعطاء قيم ابتدائية للتوتر حيث تُعطى القيمة 1 لطويلة التوتر و 0 لزاوية التوتر، أما إذا كانت طويلة التوتر والزاوية محددة لهذا النوع من الباسبارات فسيتم أخذهما كقيم ابتدائية بدلاً من القيم الابتدائية 1 و 0.

2 يستخدم هذا الرمز للباسبارات المنظمة، ولأجل هذا النوع من الباسبارات يجب تحديد طويلة التوتر واستطاعة التوليد الفعالة بال MW والحدود العظمى والدنيا للاستطاعة الردية بال Mvar.

1 يستخدم هذا الرمز لباسبار المرجع، ولهذا النوع من الباسبارات تُعطى طويلة وزاوية التوتر.

1-13-2 ملف بيانات الخطوط:

يتم تعيين الخط بطريقة زوج العقد، وترتب المعلومات المطلوبة عن الخطوط ضمن مصفوفة . يمثل العمود الأول والثاني من هذه المصفوفة رقم عقدي الخط، أما الأعمدة من الثالث وحتى الخامس فتحتوي مقاومة الخط، المفاعلة، السماحية الكلية للخط بال pu منسوبة للأساس العام المختار. أما العمود الأخير فهو مخصص ليعار بمبدل الوضعيات في المحول، ولأجل الخطوط يوضع دائماً في هذا العمود الرقم 1. ويمكن إدخال الخطوط بأي تعاقب وبأي ترتيب للعقد، والاستثناء الوحيد لذلك هو أنه في حال المحول يجب أن يكون الرقم اليساري للباسبارات هو جهة مبدل الوضعيات للمحول.

وسنبين في المثال التالي كيفية تحضير البيانات لنظام قدرة مكون من 30 باسبار وكذلك نتائج حساب جريان الحمولة لهذا النظام.

مثال (1-11):

يبين الشكل (1-22) نظام قدرة كهربائي مكوناً من 30 عقدة، الباسبار 1 هو باسبار مرجع وقد تم تعيين التوتر فيه على القيمة $1.06 \angle 0^\circ$ pu . المطلوب: استخدام برنامج غاوص-زايدل لحساب جريان الحمولة على هذا النظام. معطيات باسبارات التوتر المنظم مبينة بالجدول (1-3)

الجدول (1-3) بيانات باسبارات التوتر المنظم

Bus NO.	Voltage Magnitude	Min. Mvar Capacity	Max. Mvar Capacity
2	1.043	-40	50
5	1.010	-40	40
8	1.010	-10	40
11	1.082	-6	24

13	1.071	-6	24
----	-------	----	----

ويبين الجدول (1-4) عيارات مبدل الوضعيات للمحولات، علماً أن الرقم اليساري للباسبار هو جهة مبدل الوضعيات للمحول.

الجدول (1-4) عيارات مبدل الوضعيات

Transformer Designation	Tap Setting pu
4-12	0.932
6-9	0.978
6-10	0.969
28-27	0.968

أما معطيات الاستطاعة الردية المحقونة Q الناجمة عن المكثفات التفرعية فهي كما يلي:

Injected Q due to Capacitors	
Bus No.	Mvar
10	19
24	4.3

الشكل (1-22) نظام قدرة مكون من 30 باسبار عائد للمثال (1-11).

أما استطاعات التوليد والأحمال فهي مبينة بالجدول (1-5)، حيث تم استخدام الرمز 0 لباسبار المرجع والرمز 1 لباسبار الأحمال والرمز 2 لباسبارات التوليد (باسبارات التوتر المنظم). بالإضافة إلى ذلك تم إعطاء قيم لكل من استطاعة الأساس، والدقة، وعامل التسريع والقيم العظمى والصغرى للاستطاعة الردية المولدة.

الجدول (1-5) بيانات العقد العائدة للمثال (1-11)



كما يبين الجدول (1-6) معطيات الخطوط، وكما نلاحظ فإنه تم وضع الرقم 1 في العمود الأخير لأجل الخطوط ونسبة مبدل التفريعات لأجل المحولات.

الجدول (1-6) معطيات الخطوط والحولات العائدة للمثال (1-11)



أما نتائج حساب جريان الحمولة على العقدة وعلى الخطوط بطريقة غاوص-زايدل فهي مبينة بالجداول (1-7) و (1-8) على التوالي

الجدول (1-7) نتائج حسابات جريان الحمولة للباسبارات العائدة للمثال (1-11)

الجدول (1-8) نتائج حسابات جريان الحمولة على الخطوط العائدة للمثال (1-11)

تابع الجدول (1-8)



تابع الجدول (1-8)



مثال (1-12) :

سنبين الآن نتائج حسابات جريان الحمولة على الشبكة السورية 230 و 400 kV (المبينة بالشكل (1-23) بطريقة نيوتن-رافسون. تم تقسيم الشبكة إلى خمس مناطق (5areas) كما هو مبين بالجدول (1-9)، حيث يمثل العمود الأول من هذا الجدول رقم المنطقة، أما العمودان الثاني والثالث فيمثلان الحد الأدنى والأعلى للتوتر بالكميات الواحدية المسموح بها في كل منطقة.

الجدول (1-9) توزيع الشبكة السورية إلى خمس مناطق.

" AREA1 "	1 , . 8 , 1 . 05
" AREA2 "	2 , . 8 , 1 . 05
" AREA3 "	3 , . 8 , 1 . 05
" AREA4 "	4 , . 8 , 1 . 2
" AREA5 "	5 , . 8 , 1 . 05

ويبين الجدول (1-10) معطيات العقد لهذه الشبكة ، حيث يشير العمود الأول إلى رمز العقدة والعمود الثاني إلى العقدة (الباسبار) من حيث كونها فعالة أو غير فعالة، والعمود الثالث إلى رقم المنطقة والعمود الرابع إلى نموذج العقدة والعمود الخامس إلى توتر الأساس والعمود السادس والسابع إلى التوتر الأصغري والأعظمي المسموح

بهما في حال إعطائهما، أما العمود الثامن فيشير إلى التوتر المرغوب عند تنظيم التوتر.
 ويشير العمود التاسع إلى السماحية التفرعية، أما العمود العاشر
 والحادي عشر فيشيران إلى الاستطاعة الحقيقية والردية على الترتيب وفقاً لما يلي.

NODE	NODE ACTIVATION	AREA	NODE TYPE	V _{Base}	V _{max}	V _{min}	V _{des}	Y _{SH}	P _L	Q _L
------	--------------------	------	--------------	-------------------	------------------	------------------	------------------	-----------------	----------------	----------------

الجدول (1-10) معطيات العقد للشبكة السورية





الشكل (1-23) الشبكة السورية 230 و 400 kV

ويبين الجدول (1-11) معطيات المولدات في محطات التوليد، حيث يشير العمود الأول رمز العقدة والعمود الثاني إلى نوع المولدة هل هي فعالة أو غير فعالة، ويشير العمود الثالث إلى الاستطاعة الفعالة الدنيا للمولد والعمود الرابع إلى الاستطاعة الفعالة العظمى للمولد والعمود الخامس إلى الاستطاعة الردية الدنيا والعمود السادس إلى الاستطاعة الردية الابتدائية أما العمود السابع فيشير إلى الاستطاعة الردية العظمى للمولد. بقية الأعمدة تشير إلى مؤشرات اقتصادية للمولد كاستهلاك الوقود وغير ذلك.. الخ.

الجدول (1-11) معطيات المولدات في الشبكة السورية.

ويبين الجدول (1-12) بيانات الخطوط لهذه الشبكة حيث يشير العمود الأول إلى رمز الخط والعمود الثاني إلى عقدة البداية والعمود الثالث إلى عقدة النهاية ويشير العمود الرابع إلى عدد الدارات التفرعية على الخط والعمود الخامس إلى نوعية الخط هل هو فعال أو غير فعال والعمود السادس إلى سعة الخط بال MVA والعمود السابع والثامن

إلى مقاومة ومفاعلة الخط على الترتيب أما بقية الأعمدة فتشير إلى نوعية الخط هل هو خط أو محول وإذا كان محولاً هل هو منظم للتوتر أم لا وفقاً لما يلي:

LINE	NEAR END	FAR END	CIRCUIT No.	LINW ACTIVATION	S _L	R _L	X _L	L	T _r
------	-------------	------------	----------------	--------------------	----------------	----------------	----------------	---	----------------

الجدول (1-12) بيانات الخطوط للشبكة السورية



تابع الجدول (1-12)

ويبين الجدول (1-13) النتائج العامة لحساب جريان الحمولة على الشبكة السورية 400KV, 230، ويبين الجدول (1-14) نتائج حساب جريان الحمولة في العقد. كذلك يبين الجدول (1-15) نتائج حساب جريان الحمولة على الخطوط. وأخيراً يبين الجدول (1-16) المعطيات العامة لنتائج الحساب مثل عقدة المرجع وعدد التكرار والحالات الحدية على العقد والخطوط.. الخ.

الجدول (1-13) النتائج العامة لحساب جريان الحمولة على الشبكة السورية



الجدول (1-14) نتائج حساب جريان الحمولة على العقد



الجدول (1-15) نتائج حساب جريان الحمولة على الخطوط



تابع الجدول (1-15)



الجدول (1-16) المعطيات العامة في الحساب



تابع الجدول (1-16)



مسائل:

1-1- ليكن لدينا نظام القدرة المبين بالشكل (1-24)، حيث يمثل كل من المولدات في العقد 1 و 2 بمفاعلة بالكميات الواحدية منسوبة إلى استطاعة أساس 100 MVA ومنبع تيار مكافئ. ويمثل كل من الخطوط بدارة π حيث تعطى الممانعة التسلسلية والسماحية التفرعية بالكميات الواحدية منسوبة لاستطاعة أساس 100 MVA، أما الأحمال في العقد 3 و 4 فمعطاة بال MW و Mvar. افرض أن طولية التوتر في العقد 3 و 4 مساوية إلى 1pu والمطلوب تشكيل مصفوفة السماحيات.

الشكل (1-24) مخطط الخط الواحد للمسألة (1-1).

1-2- يبين الشكل (1-25) نظام قدرة الممانعات معطاة بال pu منسوبة لأساس

100 MVA ، التيارات الداخلة إلى العقد 1 و 2 هي:

$$I_1 = 1.38 - j 2.72 \text{ pu}$$

$$I_2 = 0.69 - j 1.36 \text{ pu}$$

والمطلوب تشكيل مصفوفة السماحيات.

الشكل (1-25) مخطط الخط الواحد للمسألة (2-1).

1-3- أوجد بطريقة غاوص-زايدل حلول جملة المعادلات

$$x_1 + x_1 x_2 = 0$$

$$x_1 + x_2 = 6$$

باستخدام القيم الابتدائية التالية:

a) $x_1^{(0)} = 1 \quad x_2^{(0)} = 0$

b) $x_1^{(0)} = 1 \quad x_2^{(0)} = 2$

استمر بعمليات التكرار حتى تصبح كل من $|\Delta x_1^{(k)}|$ و $|\Delta x_2^{(k)}|$ أقل من 0.001

1-4- ليكن لدينا المعادلة من الدرجة الرابعة التالية:

$$x^4 - 21x^3 + 147x^2 - 379x + 252 = 0$$

والمطلوب استخدام طريقة نيوتن-رامنسون لإيجاد أحد جذور المعادلة مبتدئاً من

القيمة الابتدائية $x^{(0)}=0$ مع الاستمرار لغاية $|\Delta x^{(k)}| < 0.001$

1-5- المطلوب إيجاد جملة المعادلات التالية بإنجاز ثلاث عمليات تكرار بطريقة

نيوتن - رامنسون

$$\begin{aligned} x_1^4 - 2x_1 - x_2 &= 3 \\ x_1^4 + x_1^2 &= 41 \end{aligned}$$

مع العلم أن القيمة الابتدائية

$$x_1^{(0)} = 2 \quad x_2^{(0)} = 3$$

1-6- في نظام القدرة المبين بالشكل (1-26) لدينا الباسبار 1 هو باسبار مرجع

حيث $V_1 = 1.0 \angle 0^\circ$ بالكميات الواحدية والباسبار 2 هو باسبار حمولة

$Z = 0.02 + j 0.04$ pu ممانعة الخط ، $S_2 = 280 \text{ MW} + j60 \text{ Mvar}$ منسوبة

لأساس 100 MVA

(a) احسب قيمة V_2 بطريقة غاوص زايدل بإنجاز 4 عمليات تكرار مع العلم أن

القيمة الابتدائية

$$V_2^{(0)} = 1.0 + j0.0$$

(b) إذا تقاربت قيمة التوتر على الباسبار إلى القيمة $V_2 = 0.90 - j 0.10$ فالملطوب تحديد S_1 والضياعات الفعالة والرديّة على الخط.

الشكل (1-26) مخطط الخط الواحد للمسألة (1-6).

1-7- يبين الشكل (1-27) مخطط الخط الواحد لنظام قدرة بسيط ذي ثلاثة باسبارات، الباسبار 1 هو باسبار توليد والتوتر عند هذا الباسبار $V_1 = 1.0 \angle 0^\circ$ pu الأحمال على العقدتين 2 و 3 مبنية على المخطط وممانعات الخطوط معطاة بالكميات الواحديّة منسوبة لأساس 100 MVA. بإهمال مقاومات وسعات الخط فالملطوب:

(a) حساب V_2 و V_3 بإنجاز عمليّ تكرار بطريقة غاوص-زايدل باستخدام القيم الابتدائيّة :

$$V_2^{(0)} = 1.0 + j0, \quad V_3^{(0)} = 1.0 + j0$$

(b) إذا كانت التوترات وبعد عدة عمليّات تكرار تتقارب إلى القيم التاليّة:

$$V_2 = 0.90 - j 0.10 \text{ pu}$$

$$V_3 = 0.95 - j 0.05 \text{ pu}$$

فالملطوب حساب الجريان والضياعات على الخطوط، وكذلك حساب الاستطاعة الفعالة والرديّة لباسبار المرجع ورسم مخطط الجريان مبنياً عليه اتجاه الجريان على الخطوط.

الشكل (1-27) مخطط الخط الواحد للمسألة (1-7).

1-8- يبين الشكل (1-28) مخطط الخط الواحد لنظام قدرة بسيط مكون من ثلاثة باسبارات، العقدة الأولى هي عقدة توليد والتوتر على هذه العقدة $V_1 = 1.025 \angle 0^\circ \text{ pu}$ بينما التوتر على العقدة 3 مثبت على العتبة 1.03 واستطاعة التوليد الفعالة على هذه العقدة 300 MW. يتكون الحمل من 400 MW و 200 Mvar ويأخذ من العقدة 2، ممانعات الخطوط معطاة بالكميات الواحدية منسوبة لأساس 100MVA. بإهمال مقاومات وسماحيات الخطوط المطلوب.

(a) حساب زوايا الطور للتوترات V_2 و V_4 بإنجاز عمليتي تكرار بطريقة غاوص – زايدل واستخدام القيم الابتدائية $V_2^{(0)} = 1.0 + j0$ و $V_3^{(0)} = 1.03 + j0$ وتثبيت $|V_3| = 1.03 \text{ pu}$.

(b) إذا كانت التوترات وبعد عدة عمليات تكرار تتقارب إلى القيم التالية:

$$V_2 = 1.001243 \angle -2.1^\circ = 1.000571 - j0.0366898 \text{ pu}$$

$$V_3 = 1.03 \angle 1.36851^\circ = 1.029706 + j0.0246 \text{ pu}$$

فالمطلوب حساب الجريان والضيعات على الخطوط، وكذلك الاستطاعة الفعالة والرديّة لباسبار المرجع ورسم مخطط الجريان مبيناً عليه اتجاه على الخطوط.

الشكل (1-28) مخطط الخط الواحد للمسألة (1-8).

1-9- يبين الشكل (1-29) مخطط الخط الواحد لنظام قدرة مكون من أربعة باسبارات، المفاعلات معطاة بالكميات الواحدية منسوبة لأساس عام بـ MVA. تم تعيير مبدل التفريعات في كلتا المحولتين T_1 و T_2 بحيث كانت النسبة 0.8:1 و 1.25:1 على التوالي والمطلوب إيجاد مصفوفة السماحيات

الشكل (1-29) مخطط الخط الواحد للمسألة (9-1).

10-1- يبين الشكل (1-30) نظام قدرة مكون من باسبارين، الباسبار 1 هو باسبار المرجع توتره $V_1 = 1.0 \angle 0^\circ \text{ pu}$ ، يؤخذ من الباسبار 2 حمولة مقدارها 150 MW و 50Mvar.

سماحيات الخط $y_{12} = 10 \angle -73.74^\circ \text{ pu}$ منسوبة لأساس MVA 100، تعطى الاستطاعة والفعالة والرديّة على الباسبار 2 بالعلاقات.

$$P_2 = 10 |V_2| |V_1| \cos (106.26^\circ - \delta_2 + \delta_1) + 10 |V_2|^2 \cos (-73.74^\circ)$$

$$Q_2 = -10 |V_2| |V_1| \sin (106.26^\circ - \delta_2 + \delta_1) + 10 |V_2|^2 \sin (-73.74^\circ)$$

باستخدام طريقة نيوتن – رافسون المطلوب حساب طويلة وزاوية التوتر على الباسبار 2 بإنجاز عمليتي تكرار وابتداءً من القيم الأولية

$$|V_2|^{(0)} = 1.0 \text{ pu } \delta_2^{(0)} = 0^\circ$$

الشكل (1-30) مخطط الخط الواحد للمسألة (10-1).

11-1- يبين الشكل (1-31) نظام قدرة مكون من باسبارين، الباسبار 1 هو باسبار مرجع توتره $V_1 = 1.0 \angle 0^\circ \text{ pu}$ ، يؤخذ من الباسبار 2 حمولة مقدارها 100 MW و 50 Mvar .

ممانعة الخط $Z_{12} = 0.12 + j0.16 \text{ pu}$ منسوبة لأساس 100 MVA والمطلوب حساب طولية وزاوية التوتر على العقدة 2 بإنجاز عمليتي تكرار بطريقة نيوتن-رامنسون واستخدام القيم الابتدائية $\delta_2^{(0)} = 0^\circ$ $|V_2|^{(0)} = 1.0 \text{ pu}$

الشكل (1-31) مخطط الخط الواحد للمسألة (11-1).

12-1- يبين الشكل (1-32) مخطط الخط الواحد لنظام قدرة بسيط مكون من ثلاثة باسبارات، الباسباران 1, 2 هي باسبارات توليد، التوتر على الباسبار 1 $V_1 = 1.0 \angle 0^\circ \text{ pu}$ ، وطويلة التوتر على الباسبار 2 مثبتة على القيمة 1.05. استطاعة التوليد الفعالة على العقدة 2 400 MW . يؤخذ من الباسبار 3 حمل مكون من 500 MW و 400 Mvar، سماحيات الخطوط معطاة بالكميات الواحدية منسوبة لأساس 100 MVA. بإهمال مقاومات وسعات الخطوط المطلوب:

(a) برهن أن الاستطاعة الفعالة على الباسبار 2 والاستطاعة الفعالة والردية على الباسبار 3 تعطى بالعلاقات

$$P_2 = 40 |V_2| |V_1| \cos(90^\circ - \delta_2 + \delta_1) + 20 |V_2| |V_3| \cos(90^\circ - \delta_2 + \delta_1)$$

$$P_3 = 20 |V_2| |V_1| \cos(90^\circ - \delta_3 + \delta_1) + 20 |V_3| |V_2| \cos(90^\circ - \delta_3 + \delta_2)$$

$$Q_3 = -20 |V_3| |V_1| \sin(90^\circ - \delta_3 + \delta_1) - 20 |V_3| |V_2| \sin(90^\circ - \delta_3 + \delta_2) + 40 |V_3|^2$$

(b) احسب القيم الطورية للتوترات V_2 و V_3 بإنجاز عمليتي تكرار بطريقة نيوتن – ورامنسون، واستخدام القيم الأولية $V_2^{(0)} = 1.0 + j0 \text{ pu}$ و $V_3^{(0)} = 1.0 + j0 \text{ pu}$ والحفاظ على $|V_2| = 1.05 \text{ pu}$.

الشكل (1-32) مخطط الخط الواحد للمسألة (1-12).

13-1- من أجل المسألة (1-12) المطلوب:

إنجاز حساب جريان الحمولة من خلال عمليتي تكرار بطريقة التجزئة السريعة.

14-1- نظام قدرة مكون من 26 باسبار مبين بالشكل (1-33) المطلوب إنجاز جريان الحمولة بالطرق التالية:

(a) طريقة غاوص - زابدل. (b) طريقة نيوتن - رافسون.

(c) طريقة التجزئة السريعة .

معطيات الأحمال هي كما يلي:

LOAD DATA					
BUS No.	Load		BUS No.	Load	
	MW	Mvar		MW	Mvar
1	51.0	41.0	14	24.0	12.0
2	22.0	15.0	15	70.0	31.0
3	64.0	50.0	16	55.0	27.0
4	25.0	10.0	17	78.0	38.0
5	50.0	30.0	18	153.0	67.0
6	76.0	29.0	19	75.0	15.0
7	0.0	0.0	20	48.0	27.0
8	0.0	0.0	21	46.0	23.0
9	89.0	50.0	22	45.0	22.0
10	0.0	0.0	23	25.0	12.0
11	25.0	15.0	24	54.0	27.0
12	89.0	48.0	25	28.0	13.0
13	31.0	15.0	26	40.0	20.0

طويلة التوتر والاستطاعة الفعلية وحدود الاستطاعة الردية للباسبارات المنظمة معطاة

بالجدول التالي:

GENERATION DATA				
Bus No.	Voltage Mag.	Generation MW	Mvar Limits	
			Min	Max
1	1.025			
2	1.020	79.0	40.0	250.0
3	1.025	20.0	40.0	150.0
4	1.050	100.0	40.0	80.0
5	1.045	300.0	40.0	160.0
26	1.015	60.0	15.0	50.0

الاستطاعة الردية للمكتفات التفرعية المركبة في محطات التحويل، وكذلك عيارات

مبدل التفرعات معطاة كما يلي:

SHUNT CAPACITORS	
Bus No.	Mvar
1	4
4	2.0
5	5.0
6	2.0
11	1.5
12	2.0
15	0.5
19	5.0

TRANSFORMER TAP	
Designation	Tap Setting
2-3	0.960
2-13	0.960
3-13	1.017
4-8	1.050
4-12	1.050
6-19	0.950
7-9	0.950

معطيات الخطوط والمحولات التي تتضمن المقاومة والمفاعلة التسلسلية بالكميات
الواحدة ونصف السعة الكلية بالكميات الواحدة منسوبة لأساس 100 MVA مبنية
بالجدول التالي:

LINE AND TRANSFORMER DATA									
BUS No.	BUS No.	R Pu	X Pu	1/2B pu	BUS No.	BUS No.	R Pu	X Pu	1/2B pu
1	2	0.0005	0.0048	0.0300	10	22	0.0069	0.0298	0.005
1	18	0.0013	0.0110	0.0600	11	25	0.0960	0.2700	0.010
2	3	0.0014	0.0513	0.0500	11	26	0.0165	0.0970	0.004
2	7	0.0103	0.0586	0.0180	12	14	0.0327	0.0802	0.000
2	8	0.0074	0.0321	0.0390	12	15	0.0180	0.0598	0.000
2	13	0.0035	0.0976	0.0250	13	14	0.0046	0.0271	0.001
2	26	0.0323	0.1967	0.0000	13	15	0.0116	0.0610	0.000
3	13	0.0007	0.0054	0.0005	13	16	0.0179	0.0888	0.001
4	8	0.0008	0.0240	0.0001	14	15	0.0069	0.0382	0.000
4	12	0.0016	0.0207	0.0150	15	16	0.0209	0.0512	0.000
5	6	0.0069	0.0300	0.0990	16	17	0.0990	0.0600	0.000
6	7	0.0053	0.0306	0.0010	16	20	0.0239	0.0585	0.000
6	11	0.0097	0.0570	0.0001	17	18	0.0032	0.0600	0.038
6	18	0.0037	0.0222	0.0012	17	21	0.2290	0.4450	0.000
6	19	0.0035	0.0660	0.0450	19	23	0.0300	0.1310	0.000
6	21	0.0050	0.0900	0.0226	19	24	0.0300	0.1250	0.002
7	8	0.0012	0.0069	0.0001	19	25	0.1190	0.2249	0.004
7	9	0.0009	0.0429	0.0250	20	21	0.0657	0.1570	0.000
8	12	0.0020	0.0180	0.0200	20	22	0.0150	0.0366	0.000
9	10	0.0010	0.0493	0.0010	21	24	0.0476	0.1510	0.000
10	12	0.0024	0.0132	0.0100	22	23	0.0290	0.0990	0.000
10	19	0.0547	0.2360	0.0000	22	24	0.0310	0.0880	0.000
10	20	0.0066	0.0160	0.0010	23	25	0.0987	0.1168	0.000



الشكل (1-33) مخطط الخط الواحد للمسألة (1-14).





الفصل الثاني

تحليل الآلة التزامنية في الحالة العابرة

Synchronous machine transients analysis

1-2 مقدمة :

تمّ تناول الأداء في الحالة الثابتة للآلة التزامنية في كتاب نظم القدرة الكهربائية 1. عندما تعمل الآلة التزامنية في ظروف تشغيل متوازنة في الحالة الثابتة Steady state تكون القوة المحركة المغناطيسية (قمم) للدوائر والقمم الفعالة للثابت ثابتة بالنسبة لبعضها البعض. وعليه يكون الفيض المتشابك مع دائرة الدوائر ثابتاً مع الزمن ، وبالتالي لا تتعرض توترات في دارات الدوائر وتصبح الدارة المكافئة الوحيدة الطور مؤلفة من قوة محركة كهربائية (قممك) ثابتة على التسلسل مع ممانعة بسيطة هي الممانعة (المفاعلة) التزامنية X_s . وإذا كان الدوائر من النوع ذي الأقطاب البارزة الذي يتميز بثغرة هوائية غير منتظمة فيتم تمثيل الآلة باعتبار المفاعلة المباشرة X_d والمفاعلة العرضانية X_q .

تحت ظروف التشغيل العابرة مثل دائرة قصيرة (عطل) على أقطاب المولد، يكون الفيض المتشابك مع دارات الدوائر متغيراً مع الزمن مولداً تيارات عابرة فيها تؤثر بدورها على ملفات الثابت (المتحرض). تحليل الحالة العابرة سيتم على أساس تمثيل الآلة التزامنية المثالية كمجموعة من الدارات المتزاوجة مغناطيسياً ذات محارضات تتعلق بالوضع الزاوي للدوائر. وتكون المعادلات التفاضلية التي تصف أداء المولد ذات معاملات متغيرة مع الزمن وبالتالي من غير الممكن في معظم الحالات حلها بطرق الحل المغلق Closed solution. ويمكن تبسيط المسألة بتحويل متحولات القسم

الثابت من الكميات الطورية a, b, c إلى متحولات جديدة رياضية تُعرّف في نظام إحداثيات يدور مع الدائر (نظرية المحورين Two-axis Theory الشهيرة بنظرية بارك (Park)).

سنقوم في هذا الفصل بإنجاز النموذج الرياضي للآلة التزامنية في ظروف التشغيل العابرة والذي سيبنى بشكل رئيسي من المعادلات التفاضلية للكميات الخطية العائدة لتوترات وتيارات وفيوض المولد وسنستخدم نظرية بارك لتحويل الكميات الطورية إلى كميات $0, d, q$ ثم استخدام الخوارزميات والبرامج الحاسوبية التي يتيحها برنامج MATLAB لحل جملة المعادلات التفاضلية المتحصلة. وسنقوم أيضاً بإنجاز نماذج مبسطة للآلة التزامنية لتحليل العوابر.

2-2 الظواهر العابرة : Transient phenomena

كي نستوعب الظواهر العابرة للآلة التزامنية، سنقوم بتحليل الأداء العابر لدارة RL بسيطة (الشكل 2-1) .

الشكل (2-1) دارة بسيطة مؤلفة من R, L ثابتتين على التسلسل /8.
الدارة مؤلفة من توتر جيبي $i(t) = V_m \sin(\omega t - \alpha)$ يُطبق على RL في الزمن $t = 0$ ، وتصح العلاقة:

$$Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} = V_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (2-1)$$

حل هذه المعادلة التفاضلية يعطي:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \alpha - \gamma) - I_m e^{-t/\tau} \sin(\alpha - \gamma) \quad (2-2)$$

حيث:

$$I_m = V_m / Z, \tau = L/R, \gamma = \tan^{-1} \omega L/R$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

الحد الأول من هذه المعادلة هو المركبة الجيبية في الحالة الثابتة. أما الحد الثاني فيمثل المركبة المستمرة (DC) العابرة والتي تدعى dc offset وهي تتخامد أسياً هاتان المركبتان متساويتان ومتعاكستان في الزمن $t=0$ وعليه انعدام التيار الابتدائي محقق. قيمة المركبة المستمرة تتعلق بلحظة تطبيق التوتر في الدارة كما هو معرّف عن طريق الزاوية α . المركبة المستمرة صفر لأجل $\alpha = \gamma$ كما هو واضح من الشكل (2-2b). وبالمقابل تملك المركبة المستمرة أكبر قيمة ابتدائية V_m/Z لأجل

$$\alpha = \gamma - \frac{\pi}{2} \text{ Rad} \quad (\text{الشكل 2-2c}).$$

لأجل $\omega L \gg R$ أي $\gamma \approx \frac{\pi}{2}$ ينتج التالي:

- وصل الدارة في لحظة التوتر الأعظمي يجعل المركبة المستمرة صفراً.
- وصل الدارة في لحظة التوتر صفر يجعل المركبة المستمرة أعظمية.

مثال : (2-1):

لأجل الدارة في الشكل (2-1) افرض

$$R = 0.125 \, \Omega, \quad L = 10 \, \text{mH}$$

$$i(t) = 151 \sin(377t + \alpha)$$

أحسب وارسم التيار لحالتين :

(a) انعدام المركبة DC . (b) مركبة DC أعظمية .

استخدام برنامج MATLAB.

الحل باستخدام الحاسوب:

$$Z = 0.125 + j377(0.01) = 0.125 + j3.77 = 3.772 \angle 88.1^\circ \quad \Omega$$

$$I_m = \frac{151}{3.772} = 40 \quad A$$

$$\tau = \frac{L}{R} = 0.08 \quad \text{sec}$$

وعليه :

$$i(t) = 40 \sin(\omega t + \alpha - 88.1^\circ) - 40 e^{-t/0.08} \sin(\alpha - 88.1^\circ)$$

الحالة a تتحقق عندما $\alpha = 88.1^\circ$

الحالة b تتحقق عندما $\alpha = 88.1^\circ - 9^\circ = 79.1^\circ$

الشكل (2-2a) برنامج حاسوب للمثال (2-1).

الخوارزمية :

- إدخال البيانات (الزاوية تحول إلى راديان).
 - معادلة i للحالة a.
 - معادلة i للحالة b.
 - رسم منحنيات i كتابع للزمن للحالتين a و b .
- البرنامج: مبين في الشكل (2-2a) .
- النتائج الحاسوبية : مبينة في الشكل (2-2b) و (2-2c) .

الشكل (2-2b) منحني التيار للحالة a (انعدام المركبة dc).
الشكل (2-2c) : منحني التيار للحالة b (المركبة dc أعظمية).

2-3 عواير الآلة التزامنية SM transients:

2-3-1 المعادلات التفاضلية للمولد التزامني

تتألف الآلة التزامنية من ثلاثة ملفات مركبة على الثابت وملف مركب على الدائر وملف إخماد. تمثل ملف الإخماد بملفين مفترضين مقصورين أحدهما على المحور المباشر والثاني على المحور العرضي (الشكل 2-3).

الشكل (2-3) تمثيل تخطيطي لآلة تزامنية.

نفرض محوراً مرجعياً يدور بالسرعة التزامنية ω وينطبق على محور الطور a في الزمن $t=0$. إذا كانت الزاوية θ هي الزاوية التي يتقدم عبرها محور الدوائر المباشر على محور الطور a يكون :

$$\theta = \omega t + \delta + \frac{\pi}{2} \quad (3-2)$$

حيث : δ هي زاوية المحور العرضاني مع المحور المرجع و $\delta + \frac{\pi}{2}$ هي زاوية المحور المباشر مع المحور المرجع (المنطبق على الطور a في الزمن صفر).
تقليدياً تمثل الآلة التزامنية المثالية بمجموعة من الدارات المتشابكة مغناطيسياً حيث المحارسات تتغير مع الوضع الزواي للدوائر. نفترض أن الإشباع المغناطيسي مهمل وأن التوزيع المكاني للقمم جيبي. ويبين الشكل (2-4) مجموعة الدارات تخطيطياً.

الشكل (2-4) تمثيل تخطيطي للدوائر المتشابكة مغناطيسياً.

نفرض أن تيارات الثابت موجبة عندما تسري خارجة من أقطاب الآلة معادلة التوترات للآلة التزامنية كمولد هي:

$$\begin{bmatrix} \vartheta_a \\ \vartheta_b \\ \vartheta_c \\ -\vartheta_F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & T_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

وهي المعادلات التفاضلية التي تصف أداء المولد التزامني .

نكتب هذه المعادلة متريسياً مع التجزيء فنجد:

$$\begin{bmatrix} v_{abc} \\ v_{FDQ} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_{abc} & 0 \\ 0 & R_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{abc} \\ \lambda_{FDQ} \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

$$v_{FDQ} = \begin{bmatrix} -v_F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad i_{FDQ} = \begin{bmatrix} i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad \lambda_{FDQ} = \begin{bmatrix} \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} \text{ etc.} \quad (6-2)$$

نكتب الفيوض المتشابكة كتتابع للمحاضرات الذاتية والمتبادلة:

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{aF} & L_{aD} & L_{aQ} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bF} & L_{bD} & L_{bQ} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cF} & L_{cD} & L_{cQ} \\ L_{Fa} & L_{Fb} & L_{Fc} & L_{FF} & L_{FD} & L_{FQ} \\ L_{Da} & L_{Db} & L_{Dc} & L_{DF} & L_{DD} & L_{DQ} \\ L_{Qa} & L_{Qb} & L_{Qc} & L_{QF} & L_{QD} & L_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

وبشكل مختصر

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abc} \\ \lambda_{FDQ} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} L_{SS} & L_{SR} \\ L_{RS} & L_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

2-3-2 محارسات الآلات بارزة الأقطاب :

Inductances of salient-pole machines

تتغير قيمة المحارسة الذاتية لأية وشيعة من وشائع الثابت، تتغير دورياً من قيمة أعظمية (عندما ينطبق المحور d على المحور المغناطيسي للوشيعة) إلى قيمة أصغرية (عندما ينطبق المحور q على المحور المغناطيسي للوشيعة).

فعلى سبيل المثال، تكون L_{aa} عظمى لأجل $\theta = 0^\circ$ وصغرى لأجل $\theta = 90^\circ$ ، وعظمى ثانية لأجل $\theta = 180^\circ$ وهكذا. وعليه فإن دور L_{aa} هو 180° ، مما يسمح بتمثيلها تقريباً بواسطة جيب cosine التوافقية الثانية. ونظراً للبناء المتناظر للدائر، تحسب العناصر القطرية للمتريس الجزئي $[L_{ss}]$ كما يلي:

$$\begin{aligned} L_{aa} &= L_s + L_m \cos 2\theta \\ L_{bb} &= L_s + L_m \cos 2(\theta - 2\pi/3) \\ L_{cc} &= L_s + L_m \cos 2(\theta + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (2-9)$$

حيث θ هي كما أسلفنا الزاوية بين المحور d والطور a. ونظراً لبروز أقطاب الدائر فإن المحارضة المتبادلة بين أي طورين من أطوار الثابت هي أيضاً تابع دوري للوضع الزاوي للدائر. وبسبب تناظر الدائر تكون الممانعة المتبادلة بين الطورين a و b عظمى سالبة عندما يكون محور القطب Pole axis متأخراً بزاوية 30° خلف الطور a أو متقدماً بزاوية 30° أمام الطور b، وتكون صغرى سالبة عندما يكون محور القطب في وضع وسط بين الطورين. وعليه تُحسب العناصر غير القطرية للمتريس الجزئي $[L_{ss}]$ كما يلي:

$$\begin{aligned} L_{ab} &= L_{ba} = -M_s - L_m \cos 2(\theta + \pi/6) \\ L_{bc} &= L_{cb} = -M_s - L_m \cos 2(\theta - \pi/2) \\ L_{ca} &= L_{ac} = -M_s - L_m \cos 2(\theta + 5\pi/6) \end{aligned} \quad (2-10)$$

ونظراً لإهمال تأثيرات أخاديد الثابت والإشباع تكون جميع المحارضات الذاتية للدائر متساوية:

$$L_{FF} = L_F L_{DD} = L_D L_{QQ} = L_Q \quad (2-11)$$

المحارضة المتبادلة بين أية وشيعة في المحور d أو في المحور q ثابتة. والمحارضة المتبادلة بين أية وشيعة على المحور d للدوار وأية وشيعة على المحور q تكون صفراً لأن المحورين متعامدين:

$$L_{FD} = L_{DF} = M_R L_{FQ} = L_{QF} = 0 L_{DQ} = L_{QD} = 0 \quad (2-12)$$

وأخيراً لنحسب المحارضات المتبادلة بين دارات الثابت والدوار والتي هي توابع دورية للوضع الزاوي للدائر. ونظراً لأن المركبة الأساسية فقط للفيض المولّد تشبك

الثابت الموزع جيبيًا، فإن جميع المحارضات المتبادلة ثابت _دائر تتغير جيبيًا وتصل لقيمة عظمى عندما تكون الوشيعتان موضع الاهتمام على خط واحد.

$$\begin{aligned}
 L_{aF} &= L_{Fa} = M_F \cos \theta \\
 L_{bF} &= L_{Fb} = M_F \cos(\theta - 2\pi/3) \\
 L_{cF} &= L_{Fc} = M_F \cos(\theta + 2\pi/3) \\
 L_{aD} &= L_{Da} = M_D \cos \theta \\
 L_{bD} &= L_{Db} = M_D \cos(\theta - 2\pi/3) \\
 L_{cD} &= L_{Dc} = M_D \cos(\theta + 2\pi/3) \\
 L_{aQ} &= L_{Qa} = M_Q \sin \theta \\
 L_{bQ} &= L_{Qb} = M_Q \sin(\theta - 2\pi/3) \\
 L_{cQ} &= L_{Qc} = M_Q \sin(\theta + 2\pi/3)
 \end{aligned} \tag{2-13}$$

وكملخص لقد أنجزنا النموذج الرياضي للمولد التزامني المؤلف من جملة من المعادلات التفاضلية (2-4) ذات المعاملات المتغيرة مع الزمن (المعادلات 2-9 إلى 2-13). وتجدر الإشارة إلى أن هذا النظام من المعادلات التفاضلية لا يمكن حله باستخدام تحويلات لابلاس للحصول على شكل مغلق من الحلول.

2-4 مركبات بارك Park components :

يمكن تبسيط المسألة إلى حد كبير إذا حوّلنا متحولات الثابت من الأطوار a, b, c إلى متحولات جديدة في إطار نظام إحداثيات يتحرك مع الدائر . ويعتمد التحويل على ما يسمى نظرية المحورين التي كان رائدها بارك Park. نظام الإحداثيات الجديدة الجديد مؤلف من ثلاثة محاور؛ أحدهما يقع على المحور المباشر لملف تحريض الدوّار ويسمى المحور المباشر؛ والثاني يعامد الأول ويسمى المحور العرضاني ، والثالث

محور ثابت. على سبيل المثال، يمكن تحويل تيارات الثابت i_a ، i_b ، i_c إلى ثلاثة تيارات افتراضية i_d ، i_q ، i_0 . مبدأ التحويل هو أن التيارات الأصلية المتوازنة ($i_a + i_b + i_c = 0$) تولّد في أية لحظة ذات الفيض الذي تولده التيارات الافتراضية. التيار الافتراض الثالث i_0 مطلوب لجعل التحويل ممكناً عندما لا يكون مجموع التيارات الطورية صفراً. تحويل بارك للتيارات هو كما يلي:

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \sin\theta & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

أو بشكل متريسي مختصر:

$$i_{odq} = P i_{abc} \quad (2-15)$$

وبالتشابه نجد للتوترات والفيوض :

$$V_{0dq} = P V_{abc} \quad (2-16)$$

$$\lambda_{odq} = P \lambda_{abc} \quad (2-17)$$

يتميز متريس بارك بأنه Orthogonal أي أن مقلوب المصفوفة يساوي منقولها $[P]^{-1} = [P]^T$ وهو بالتالي متريس تحويل ثابت الاستطاعة.

$$P^{-1} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & \cos\theta & \sin\theta \\ 1/\sqrt{2} & \cos(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta - 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & \cos(\theta + 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (2-18)$$

سنكتب فيما يلي بدون برهان العلاقات التي تحول المحارضات المتغيرة مع الزمن في إطار نظام الإحداثيات المتحرك السابق ذكره مع ملاحظة أن كميات الدائر الأصلية تبقى على حالها:

$$\begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_d \\ \lambda_q \\ \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 & kM_F & KM_D & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 & 0 & kM_Q \\ 0 & kM_F & 0 & L_F & M_R & 0 \\ 0 & kM_D & 0 & M_R & L_D & 0 \\ 0 & 0 & kM_Q & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (2-19)$$

حيث :

$$L_0 = L_s - 2 M_s \quad (2-20)$$

$$L_d = L_s + M_s + 3/2 L_m \quad (2-21)$$

$$L_q = L_s + M_s - 3/2 L_m \quad (2-22)$$

$$K = \sqrt{3/2}$$

وتصبح المعادلات التفاضلية للآلة في نظام الإحداثيات المتحرك كما يلي:

$$\begin{bmatrix} \vartheta_0 \\ \vartheta_d \\ \vartheta_q \\ -\vartheta_F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r & \omega L_q & 0 & 0 & \omega k M_Q \\ 0 & -\omega L_d & r & -\omega k M_F & -\omega k M_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

$$- \begin{bmatrix} L_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 & k M_F & k M_D & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 & 0 & k M_Q \\ 0 & k M_F & 0 & L_F & M_R & 0 \\ 0 & k M_D & 0 & M_R & L_D & 0 \\ 0 & 0 & k M_Q & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (2-23)$$

ومن هذه المعادلات نلاحظ الآتي:

- المعادلات ذات معاملات ثابتة بشرط بقاء السرعة ثابتة.
- المعادلة الأولى :

$$\vartheta_0 = -r i_0 - L_0 \frac{di_0}{dt}$$

غير مقترنة بالمعادلات الأخرى، مما يسمح بمعالجتها لوحدها. نسمي المتحولات i_0 , L_0 , ϑ_0 متحولات التتابع الصفري؛ وهذا الاسم مأخوذ من نظرية المركبات المتناظرة التي سنتناولها في الفصل الرابع.

- والملاحظة الأخيرة هي أنه على الرغم من كون تقنية التحويل إلى مركبات عملية رياضية، فإنها تقدم معلومات فيزيائية هامة حول الظواهر العابرة.

مثال (2-2) :

مولد تزامني ثلاثي الطور ثنائي القطب مواصفاته:

555 MVR , 24 KV , Pf 0.9 , 60 Hz

$$L_{aa} = 3.2758 + 0.0458 \cos (2\theta) \text{ mH}$$

$$L_{ab} = -1.6379 - 0.0458 \cos(2\theta + \frac{\pi}{3}) \text{ mH}$$

$$L_{aF} = 40 \cos \theta \text{ mH}$$

$$L_{FF} = L_F = 576.92 \text{ mH}$$

$$r_a = 0.0031 \Omega$$

$$r_F = 0.0715 \Omega$$

(1) أحسب L_d و L_q .

(2) أحسب L_0 و θ_0 .

(3) أحسب M_F .

الحل :

(1) من المعادلة (2-21):

$$L_d = L_s + M_s + \frac{3}{2} L_m$$

ومن المعادلة (2-9) و (2-10) :

$$L_{aa} = L_s + L_m \cos 2\theta$$

$$L_{ab} = -M_s - L_m \cos 2(\theta + \frac{\pi}{6})$$

وبيانات المثال نجد :

$$L_s = 3.2758 \text{ mH}$$

$$L_m = 0.0458 \text{ mH}$$

$$M_s = 1.6379 \text{ mH}$$

وعليه:

$$L_d = 32.2758 + 1.6379 + \frac{3}{2} \times 0.0458$$

$$= 4.9825 \text{ mH}$$

$$L_q = L_s + M_s - \frac{3}{2} L_m$$

$$= 3.2758 + 1.6379 - \frac{3}{2} \times 0.0458$$

$$= 4.8451 \text{ mH}$$

(2)

$$L_0 = L_s - 2 M_s$$

$$= 3.2758 - 2 \times 1.6379 = 3.2758 - 3.2758 = 0$$

$$\mathfrak{g}_0 = -ri_0 - L_0 \frac{di_0}{dt} = -ri_0 = -0.003i_0$$

(3)

$$L_a F = M_F \cos \theta \Rightarrow M_F = 40 \text{ mH}$$

وهو المطلوب.

5-2 عطل متوازن:

نفترض حدوث عطل متوازن (أي ثلاثي الطور) على أقطاب مولد تزامني ثلاثي الطور يدور بسرعة تزامنية ثابتة وتحميج ثابت. نفرض أن المولد يعمل في حالة لا حمل قبل العطل أي:

$$i_a = i_b = i_c = 0$$

وحسب علاقات تحويل بارك :

$$i_0 = i_d = i_q = 0$$

القيمة الابتدائية لتيار المحرض :

$$i_F(0^+) = \frac{V_F}{r_F}$$

الشروط الحدية للعطل المتوازن هي:

$$\vartheta_a = \vartheta_b = \vartheta_c = 0$$

وعليه:

$$\vartheta_0 = \vartheta_d = \vartheta_q = 0$$

ونظراً لأن $i_0 = 0$ تكون معادلة المولد المتريسية في نظام إحداثيات بارك أثناء العطل:

$$\begin{bmatrix} \vartheta_d \\ -\vartheta_F \\ 0 \\ \vartheta_q \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & \omega L_q & \omega kM_Q \\ 0 & r_F & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_D & 0 & 0 \\ -\omega L_d & -\omega kM_F & -\omega kM_D & r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_D \\ i_q \\ i_Q \end{bmatrix}$$

$$- \begin{bmatrix} L_d & kM_F & kM_D & 0 & 0 \\ kM_F & L_F & M_R & 0 & 0 \\ kM_D & M_R & L_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_q & kM_Q \\ 0 & 0 & 0 & kM_Q & L_Q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_D \\ i_q \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (2-24)$$

نكتب هذه المعادلة بشكل متريسي مختصر:

$$\vartheta = -Ri - L \frac{d}{dt} i \quad (25-2)$$

أو:

$$\frac{d}{dt} i = -L^{-1} Ri - L^{-1} \vartheta \quad (26-2)$$

إذا فرضنا أن السرعة (ω) ثابتة، تصبح معادلة الحالة خطية وبالتالي قابلة للحل تحليلياً بواسطة طريقة لابلاس. أما إذا رغبتنا أن نأخذ بالحسبان تغيرات السرعة فتصبح

المعادلة التفاضلية غير خطية ويتعين حلها بطرق التحليل العددي بعد أن نضيف إليها معادلة الحركة للمولد والتي تسمى معادلة التآرجح. أما الآن، ونظراً لأن تغيرات سرعة الآلة أثناء العطل لا تؤثر كثيراً على تيار العطل اللحظي مباشرة بعد حصول العطل، فسنهمل تغير السرعة. حل المعادلة (2-26) يعطي التيارات i_d , i_q , i_0 ومنها نحصل على تيارات الأطوار باستخدام تحويل بارك:

$$i_{abc} = P^{-1} i_{odq} \quad (2-27)$$

وبالنشر، وملاحظة أن $i_0 = 0$ نجد :

$$\begin{aligned} i_a &= \sqrt{2/3} i_d \cos\theta + i_q \sin\theta \\ i_b &= \sqrt{2/3} i_d \cos(\theta - 2\pi/3) + i_q \sin(\theta - 2\pi/3) \\ i_c &= \sqrt{2/3} i_d \cos(\theta + 2\pi/3) + i_q \sin(\theta + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (2-28)$$

يمكن حل جملة المعادلات التفاضلية (2-26) باستخدام بعض البرامج الجاهزة التي تتيحها نظم برمجية مختلفة. فمثلاً MATLAB يقدم برنامجين على شكل M-file هما Ode23 و Ode45 لإنجاز الحل العددي لنظام معادلات تفاضلية باستخدام طريقة Runge-kutta وسنوضح نمذجة المولد التزامني أثناء عطل متوازن عن طريق المثال التالي:

مثال (2-3):

مولد تزامني 500 MVA , 30 KV , 60 Hz يعمل على اللاحمل بتهييج ثابت 400V. يتعرض المولد إلى عطل على أقطاب الثابت. افرض أن العطل حدث في لحظة كان فيها المحور العرضاني للدائر يصنع زاوية 30° مع الشعاع a، وأن سرعة الدائر ثابتة عند السرعة التزامنية. محددات المولد هي:

$L_a = 0.0072 \text{ H}$	$L_q = 0.0070 \text{ H}$	$L_F = 2.500 \text{ H}$
--------------------------	--------------------------	-------------------------

$L_D = 0.0068 \text{ H}$	$L_Q = 0.0016 \text{ H}$	$M_F = 0.100 \text{ H}$
$M_D = 0.0054 \text{ H}$	$M_Q = 0.0026 \text{ H}$	$M_R = 0.125 \text{ H}$
$r = 0.0020 \text{ H}$	$R_F = 0.4000 \text{ } \Omega$	$r_D = 0.015 \text{ } \Omega$
$r_Q = 0.0152 \text{ } \Omega$	$L_0 = 0.00110 \text{ H}$	

المطلوب استخدام MATLAB (أو أي برنامج آخر متوفر) لحساب ورسم منحنيات تيارات الأطوار i_a , i_b , i_c و تيار التحريض i_F انطلاقاً من نمذجة المولد بالمعادلات التفاضلية للقيم اللحظية.

النموذج الرياضي: المولد ممثل بالمعادلات التفاضلية (2-26) التي ستحل بواسطة البرنامج Ode45 في MATLAB.

يلزم للحل تحديد القيم الابتدائية للمتحويلات i_F , i_0 , i_d , i_q .

$$i_F(0^+) = \frac{V_F}{r_F} = \frac{400}{0.4} = 1000 \text{ A} = 1 \text{ KA}$$

$$i_0(0^+) = i_d(0^+) = i_q(0^0) = 0$$

الخوارزمية:

- إدخال البيانات : $\delta, \omega, f, r_F, V_F, \dots$
- تحديد زمن الحساب.
- إدخال القيم الابتدائية للمتحويلات (تيارات بارك).
- استدعاء البرنامج Ode45 الذي يستدعي بدوره برنامج حساب المشتقات الذي يجب أن يكتبه المبرمج نفسه.
- حساب تيارات الأطوار و تيار التهيج باستخدام علاقات بارك.
- إظهار النتائج والمنحنيات.
- ملاحظة: يستخدم برنامج حساب المشتقات المعادلات (2-26).

النتائج الحاسوبية: يبين الشكل (2-5) النتائج بشكل جدولي مجزأ بسبب كبر الجدول الذي يغطي زمن الحساب 0.8 sec .
ويبين الشكل (2-6) منحنيات تيارات الأطوار والتهيج أثناء العطل.



الشكل (2-5) جدول نتائج الحاسوب للمثال (2-3).

الشكل (2-6) النتائج البيانية للمثال (2-3).

تحليل النتائج البيانية:

تتغير تيارات المتحرض (الثابت) في الأطوار المختلفة مع الزمن تغيراً معقداً. يبين تحليل الشكل الموجي للمنحنيات أنها تتألف من مركبة ذات توافقية أساسية ومركبة مستمرة ومركبة ذات تردد مضاعف (ضعف التردد). تكون مركبة التردد الأساسي متناظرة بالنسبة لمحور الزمن. ويؤدي وجود المركبة المستمرة إلى موجة غير متناظرة. تتعلق درجة عدم التناظر بلحظة حصول العطل وبالتالي الموقع على موجة التوتر. يتألف تيار التهيج أيضاً من مركبة متناوبة ومركبة مستمرة. تضمحل المركبة المتناوبة المؤلفة من توافقية أساسية وتوافقية ثانية كتيار الثابت. وعلى أية حال فالتوافقية الثانية صغيرة ويمكن إهمالها عادة.

2-6 الأعطال غير المتوازنة :

معظم الأعطال التي تحدث لالآت التزامنية هي من نوع عطل طور مع الأرض وعطل طورين مع الأرض. وسنقوم فيما يلي بإنجاز النموذج الرياضي لهذين

النوعين من الأعطال كما سنعطي الخوارزمية لحل هذا النموذج بواسطة التكامل العددي باستخدام برنامج MATLAB.

2-6-1 عطل طورين مع الأرض:

نفرض حصول عطل مباشر (solid fault $(Z_f = 0)$ على الطورين b و c. الشرط الحدية هي:

$$\vartheta_b = \vartheta_c = 0 \quad (\text{التوترات})$$

$$i_b = -i_c$$

$$i_a = 0$$

وعليه من المعادلة (2-14):

$$i_0 = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_a + i_b + i_c) = 0$$

ومن المعادلة (2-26) نجد:

$$\vartheta_0 = r i_0 - L_0 i_0 = 0$$

ومن علاقات تحويل بارك للتيارات والتيارات نجد :

$$\vartheta_d \sin \theta - \vartheta_q \cos \theta = 0 \quad (2-29)$$

$$i_d = \sqrt{2} i_b \sin \theta \quad (2-30)$$

$$i_q = \sqrt{2} i_b \cos \theta \quad (2-31)$$

نشتق المعادلتين (2-30) و (2-31) :

$$\frac{di_d}{dt} = \sqrt{2} \frac{di_b}{dt} \sin \theta + \sqrt{2} \omega i_b \cos \theta \quad (2-32)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \sqrt{2} \frac{di_b}{dt} \cos \theta - \sqrt{2} \omega i_b \sin \theta \quad (2-33)$$

نعوّض (2-33) - (2-30) في المعادلة (2-23) ونستخدم (2-29) في المعادلات الأولى والرابعة من المعادلة (2-23) فنحصل على معادلة التوتر للعطل طورين مع الأرض في النظام الأصلي:

$$\begin{bmatrix} -v_F \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \sqrt{2}k\omega M_F \cos \theta & r_F & 0 & 0 \\ \sqrt{2}k\omega M_D \cos \theta & r_D & 0 & 0 \\ \sqrt{2}k\omega M_Q \cos \theta & 0 & 0 & r_Q \\ \sqrt{2}[r + \omega(L_d - L_q)\sin 2\theta] & k\omega M_F \cos \theta & k\omega M_D \cos \theta & k\omega M_Q \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \sqrt{2}kM_F \sin \theta & L_F & M_R & 0 \\ \sqrt{2}kM_D \cos \theta & M_R & L_D & 0 \\ -\sqrt{2}kM_Q \cos \theta & 0 & 0 & L_Q \\ \sqrt{2}(L_d \sin^2 \theta + L_q \cos^2 \theta) & kM_F \sin \theta & kM_D \sin \theta & kM_Q \cos \theta \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (2-34)$$

هذه المعادلة هي معادلة الحالة ويمكن كتابتها بشكل مختصر كالمعادلة (2-25). ومنها نحصل على المشتقات بمعادلة مثل المعادلة (2-26) وهي تناسب تماماً للحل بطرق التكامل العددي الذي يغطي قيم i_b ، i_F ، i_D ، i_Q .

مثال (2-4):

يعمل المولد في المثال (2-3) في حالة اللاحمل وبتوتر تحييج ثابت قدره 400V. يحصل عطل الطورين b و c مع الأرض على خرج المولد. استخدم MATLAB لحساب ورسم المنحنيات للتيارات i_b و i_F . افترض أن $\delta = 0$ وأن $\omega = \text{const}$.

الحل:

النموذج الرياضي المعتمد هو المعادلة:

$$\frac{d}{dt}i = -L^{-1}Ri - L^{-1}g$$

حيث

$$i = \begin{bmatrix} i_b \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}; \quad v = \begin{bmatrix} -g_F \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad R = \begin{bmatrix} \text{متريس معاملات } i \text{ في} \\ (2-34) \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} \text{متريس معاملات } \frac{d}{dt}i \text{ في (2-34)} \end{bmatrix}$$

الخوارزمية:

- إدخال البيانات: δ ، f ، r_F ، g_F .
- تحديد زمن الحساب: t_0 ، t_{Final} .
- حساب الشروط الحدية لمحاولات النموذج الرياضي في الزمن $t = 0$:

$$i_d(0) = 0 ; \quad i_F = \frac{g_F}{r_F} ; \quad i_D(0) = 0 ; \quad i_Q(0) = 0$$
- استدعاء البرنامج الجزئي Ode45 (وهو برنامج جاهز من برامج MATLAB المتاحة للمستخدم)، وهذا البرنامج يطلب برنامجاً لحساب المشتقات ينجزه المستخدم ويجب أن يعطى اسماً ما مثلاً: Lfault.

البرنامج LLFault:

- بيانات الدخل : f ، δ ، بيانات محارضا ومقاومات المولد .
- حساب: ω ، θ .
- إدخال المتريس R.
- إدخال المتريس L.
- حساب المشتقات بمساعدة النموذج الرياضي.
- إظهار نتائج i_b و i_F جدولياً وبيانياً.

النتائج الحاسوبية $t = 0$:

في الزمن $t = 0$ يكون $\vartheta_f = 04KV$ (وهو ثابت دوماً حسب نص المسألة).

$$i_F(0) = \frac{0.4}{0.4} = 1 \text{ KA}$$

ويُعلم أن $f = 60$ ، $\delta = 0$. ويجب الانتباه إلى أن الزوايا يجب أن تُحول إلى الراديان.

ويبين الشكل (2-7) النتائج الحاسوبية البيانية لتيار الطور b ولتيار التهيج i_F أثناء عطل الطورين b و c مع الأرض كما يبين الشكل (2-8) جزءاً من النتائج الحاسوبية الجدولية كما أظهرها الحاسوب.



الشكل (2-7) النتائج الحاسوبية البيانية للمثال (2-4).



الشكل (2-8) النتائج الحاسوبية الجدولية للمثال (2-4).

2-6-2 عطل طور مع الأرض:

لأجل عطل الطور a مع الأرض بشكل صلب (مباشر) تكون الشروط الحدية للعطل (الآلة تعمل على اللاحمل).

$$\begin{aligned} \vartheta_a &= 0 \\ i_b &= i_c = 0 \end{aligned}$$

بتطبيق المعادلة (2-4) وأخذاً بالاعتبار للشروط الحدية والتعويض عن المحارضات الأصلية بالمحارضات في نظام d-q-0 نحصل على نظام المعادلات التفاضلية كما يلي:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ -V_F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r - 2\omega L_m \sin 2\theta & -\omega M_F \sin \theta & -\omega M_D \sin \theta & \omega M_Q \cos \theta \\ -\omega M_F \sin \theta & r_F & 0 & 0 \\ -\omega M_D \sin \theta & 0 & r_D & 0 \\ \omega M_Q \cos \theta & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_s + L_m \cos 2\theta & M_F \cos \theta & M_D \cos \theta & M_Q \sin \theta \\ M_D \cos \theta & L_F & M_r & 0 \\ M_D \cos \theta & M_R & L_D & 0 \\ M_Q \sin \theta & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (2-35)$$

حيث :

$$L_s = \frac{1}{3}(L_0 + L_d + L_q) \quad (2-35)$$

$$L_m = \frac{1}{3}(L_d - L_q) \quad (2-36)$$

نكتب (2-35) بشكل مختصر (انظر المعادلة 2-25) ثم نكتب المعادلة التفاضلية المتريسية على شكل المعادلة (2-26) حسب متطلبات طرق التكامل العددي . حل هذه المعادلة يعطي المتحولات المجاهيل: i_a ، i_F ، i_D ، i_Q .

مثال (2-5):

يحصل عطل الطور a مع الأرض للمولد في المثال (2-3). أوجد منحنيات التيارات i_a و i_F و i_D و i_Q بافتراض العطل صلباً وسرعة المولد ثابتة على السرعة التزامنية وأن $\delta = 0^\circ$ باستخدام MATLAB. أعد الحل عندما تكون $\delta = 30^\circ$ وقارن النتائج مع التعليل.

النموذج الرياضي:

المعادلة التفاضلية هي:

$$\frac{d}{dt} i = -L^{-1}R_i - L^{-1}\theta$$

حيث :

$$i = \begin{bmatrix} i_a \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} ; v = \begin{bmatrix} 0 \\ -V_F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} ; R = \begin{bmatrix} \text{متريس معاملات } i \text{ في} \\ (35-2) \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} \text{متريس معاملات } \frac{di}{dt} \text{ في المعادلة (2-35)} \end{bmatrix}$$

الخوارزمية :

تشابه الخوارزمية في المثال (2-4) ماعدا أن برنامج المشتقات (نسميه LGfaultt) وهو برمجة للمعادلة التفاضلية الواردة في النموذج الرياضي.
يبن الشكل (2-9) النتائج البيانية الحاسوبية للتيارات i_a و i_F و i_D و i_Q لأجل $\delta = 0^\circ$ والشكل (2-10) لأجل $\delta = 30^\circ$.

الشكل (2-9) نتائج المثال (2-5) لأجل $\delta = 0^\circ$

الشكل (2-10) نتائج المثال (2-5) لأجل $\delta = 30^\circ$

7-2 نماذج مبسطة للآلات التزامنية لتحليل الحالة العابرة :

Simplified models of SM for transient analysis

يبين المنحني الموجي للعطل المتوازن الموضح في الشكل (2-6) أن المركبة المتناوبة لتيار الثابت (المتحرض) تتضاءل من قيمة ابتدائية عالية إلى القيمة في الحالة الثابتة steady state. يحصل هذا التضاؤل بسبب تغير مفاعلة الآلة نتيجة لرد فعل المتحرض. في اللحظة الزمنية التي تسبق العطل يوجد بعض الفيض المغناطيسي الذي يشبك كل من الثابت والدائر بسبب القمم للدائر فقط عندما تكون الآلة مفتوحة الدارة، وبسبب القمم للثابت والدائر معاً عندما يسري تيار ما في الثابت. إذا ازداد تيار الثابت فجأة نتيجة لحصول عطل ما، فإن الفيض الذي يشبك الثابت والدائر لا يمكنه أن يتغير فجأة بسبب التيارات الإعصارية التي تسري في دارات الدائر ودارات الإخماد والتي تعاكس هذا التغير. نظراً لأن القمم للثابت غير قادرة على بناء رد فعل متحرض تكون مفاعلة رد فعل المتحرض مهملة والمفاعلة الابتدائية صغيرة جداً وتساوي مفاعلة التشتت. وفي الوقت الذي يتناقص خلاله التيار الإعصاري في دارة الإخماد وبالتالي في دارة المحرض، يستكمل رد فعل المتحرض بناءه. إن رد فعل المتحرض الذي يُولد بواسطة تيار ذي عامل استطاعة صفر تقريباً يخلق تأثيراً مخففاً للتمغنت مما يؤدي إلى تزايد مفاعلة الآلة إلى المفاعلة التزامنية للمحور المباشر.

ومن المفيد التصور أننا نتعامل مع محول ملفه الأولي هو ملف المتحرض وملفاته الثانوية هي ملفات المحرض والإخماد. لأجل ظروف الحالة الثابتة، لا تعمل الدارات كمحول بين ملفات الثابت والدائر لأن فيض الثابت وفيض الدائر يدوران بالسرعة التزامنية ذاتها. هذه الحالة مشابهة لمحول مفتوح الثانوي حيث يمثل الأولي بالمفاعلة التزامنية X_d . بالمقابل، في ظروف الاضطراب، تختلف سرعة الدائر عن سرعة دوران فيض الثابت فيبدأ عمل المحول الافتراضي، وتشبه عندئذ دارات المحرض

والإخماد ثانوي محول مقصور. الدارة المكافئة لهذه الحالة منسوبة إلى جهة الثابت مبينة في الشكل (2-11) .

الشكل (2-11) الدارة المكافئة للفترة العابرة

بإهمال مقاومات الملفات تكون المفاعلة المكافئة للدارة في الشكل (2-11) والمعروفة بمصطلح المفاعلة المباشرة تحت العابرة:

$$X_d'' = X_\ell + \left(\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_f} + \frac{1}{X_{kd}} \right)^{-1} \quad (2-38)$$

حيث :

X_ℓ : مفاعلة التسريب.

X_{ad} : مفاعلة المتحرض المباشرة.

X_f : مفاعلة المحرض.

X_{kd} : مفاعلة الإخماد.

إذا أضفنا مقاومة ملف المخدم R_k إلى الشكل (2-11) وأوجدنا محارضة ثفنين مرئية من نهايات R_k يصبح الثابت الزمني للدائرة τ_d'' (الثابت الزمني تحت العابر للمحور المباشر):

$$\tau_d'' = \frac{X_{kd} + \left(\frac{1}{X_\ell} + \frac{1}{X_f} + \frac{1}{X_{ad}} \right)^{-1}}{R_k} \quad (2-39)$$

المفاعلات في (2-39) مقدرة بالوحدة (pu) ولذلك فإن لها ذات القيم العددية للمحارضات بالوحدة. المفاعلة X_d'' تأخذ قيمة بين 0.07 و 0.12 بالوحدة للمنوبات العنفيه وبين 0.1 و 0.35 بالوحدة للمنوبات ذات الأقطاب البارزة . تستخدم X_d'' في الحساب إذا كان ضرورياً إيجاد تيار العطل الابتدائي، لأغراض اختيار القاطع الآلي مثلاً.

نظراً لكبر مقاومة ملف الإخماد، تكون τ_d'' حوالي 0.035sec. وهكذا فهذه المركبة من مركبات تيار العطل تتلاشى سريعاً. لذلك فيسمح إهمال فرع الإخماد في الدارة المكافئة لتصبح كما في الشكل (2-12).

الشكل (2-12) الدارة المكافئة للفترة العابرة.

بإهمال المقاومات نحصل على المفاعلة المكافئة للشكل (2-12) X'_d (المفاعلة العابرة المباشرة).

$$X'_d = X_\ell + \left(\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_f} \right) \quad (2-40)$$

نضيف مقاومة المحرض R_f للدارة المكافئة، ونوجد مفاعلة ثنتين مرئية من نهايات R_f ، فنحصل على الثابت الزمني للدارة τ'_d (الثابت الزمني العابر للمحور المباشر) كما يلي:

$$\tau'_d = \frac{X_f + \left(\frac{1}{X_\ell} + \frac{1}{X_{ad}} \right)^{-1}}{R_f} \quad (2-41)$$

$$X'_d \approx 0.1 - 0.25 \text{ pu}$$

$$\tau_d \approx 1 - 2 \text{ sec}$$

الثابت الزمني للمحرض τ'_{d0} والذي يمثل تلاشي العوابر لأجل متحرض مفتوح الدارة يسمى الثابت الزمني العابر لدارة مفتوحة للمحور المباشر ويعطى بالعلاقة:

$$\tau'_{d0} = \frac{X_f}{R_f} \quad (2-42)$$

$$\tau'_{d0} \approx 5 \text{ sec}$$

$$\tau'_d = \frac{X'_d}{X_d} \tau'_{d0} \quad (2-43)$$

أخيراً، "يهدأ" الدائر ويتوقف العمل كمحول بين الثابت والدائر وتؤول الدارة المكافئة إلى الشكل (2-13).

الشكل (2-13) الدارة المكافئة للحالة الثابتة.

تصبح المفاعلة المكافئة هي المفاعلة التزامنية المباشرة:

$$X_d = X_\ell + X_{ad} \quad (2-44)$$

يمكن الحصول على دارات مكافئة مشابهة للمفاعلات على المحور q. هذه المفاعلات X_q ، X'_q ، X''_q ضرورية للحالات التي يكون فيها عامل الاستطاعة أكبر من الصفر ورد فعل المتحرض ليس بالضرورة كلياً على المحور المباشر. تعطي العلاقة التالية (2-45) مركبة التردد الأساسي لتيار المتحرض الذي ينشأ مباشرة بعد حدوث عطل متوازن على خرج مولد غير محمّل:

$$i_{ac}(t) = \sqrt{2}E_0 \left[\left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) e^{-t/\tau''_d} + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-t/\tau'_d} + \frac{1}{X_d} \right] \sin(\omega t + \delta) \quad (2-45)$$

يجب التذكّر أن المقاومات كانت مهملة عند استخراج المعادلات الآنفة الذكر ماعدا عند استخراج الثوابت الزمنية. وعلاوة على ذلك فإن معالجتنا السابقة قد أهملت المركبات المستمرة والتوافقية الإضافية الموافقة لتلاشي الفيض "المتدخل" للمتحرض. ويتعين علينا أيضاً إدراك أن تمثيل المسارات المقصورة للمفات الإخماد وحديد الدائر بدارة وحيدة مكافئة للإخماد.

إن هذا التمثيل هو تقريب للوضع الواقعي، وتبين الدراسات أن هذا التقريب مناسب في أحوال كثيرة. تعطى قيم مفاعلات الآلة وثوابتها الزمنية من قبل الصانع، ويمكن إيجاد هذه القيم أو بالأحرى التحقق منها بواسطة اختبارات الدارة القصيرة.

مثال (2-6) :

مولد تزامني ثلاثي الطور 60 Hz مقاد بعنفة تحقق له سرعة تزامنية ثابتة. ملفات المتحرض مفتوحة الدارة في البداية. يُعَيَّر جهد التهيج بحيث يكون جهد خرج المتحرض هو الجهد الاسمي (أي 1.0 pu).

مفاعلات المولد وثوابته الزمنية، هي:

$$\begin{aligned} X_d'' &= 0.15 \text{ pu} & T_d'' &= 0.35 \text{ sec} \\ X_d' &= 0.40 \text{ pu} & T_d' &= 1.0 \text{ sec} \\ X_d &= 1.20 \text{ pu} \end{aligned}$$

والمطلوب :

- أحسب تيارات القصر (العطل) للحالات الثابتة والعابرة وتحت العابرة.
 - أوجد المنحني الموجي لتيار الثابت - المركبة التوافقية الأساسية عندما يحصل عطل ثلاثي الطور على أقطاب المولد في اللحظة التي يكون فيها $\delta = 0$.
- الحل:

(a) قيم التيارات المطلوبة هي:

$$\begin{aligned} I_d &= \frac{E_0}{X_d} = \frac{1.0}{1.2} = 0.8333 \text{ pu} && \text{قيمة التيار الدائم} \\ I_d' &= \frac{E_0}{X_d'} = \frac{1.0}{0.4} = 2.5 \text{ pu} && \text{قيمة التيار العابر} \end{aligned}$$

$$I_d'' = \frac{E_0}{X_d''} = \frac{1.0}{0.15} = 6.666 \text{ pu} \quad \text{قيمة التيار تحت العابر}$$

(b) النموذج الرياضي هو المعادلة (2-45). نكتب برنامجاً ضمن بيئة MATLAB حسب الخوارزمية التالية:

- إدخال المعطيات : E_0 ، f_0 ، δ ، X_d ، X_d' ، X_d'' ، τ_d' ، τ_d'' .
- تحديد خطوة الحساب : $\Delta t \approx \frac{1}{60} \times \frac{1}{8} \text{ sec}$
- فتح حلقة لأجل الزمن : $t = 0 \rightarrow t_{\text{final}}$.
- المعادلة (2-45).
- معادلة المغلف الفعلي (للفترة تحت العابرة).
- معادلة المغلف للفترة العابرة.
- معادلة المغلف للفترة الثابتة.
- إظهار النتائج.

يبين الشكل (2-14) المنحني الموجي لتيار العطل (القصر) الذي يحوي فقط المركبة المتناوبة المتناظرة بالنسبة لمحور الزمن.

تعليق على الشكل (2-14):

ييدي تيار العطل ثلاث حالات:

- التيار العابر بسرعة ويكون مطاله كبيراً لأن مفاعله المنوبة في هذه الفترة هي المفاعلة العابرة بسرعة (X_d'') .

$$|I_d''| = \frac{|E_0|}{X_d''}$$

حيث $|E_0|$ = توتر اللاحمل للمنوبة بالطور (قيمة فعالة rms)

- التيار العابر ومطاله أصغر لأن مفاعله المنوبة في الفترة العابرة هي المفاعلة العابرة:

$$|I'_d| = \frac{|E_0|}{X'_d} ; \quad X'_d > X''_d$$

- التيار الدائم (الثابت) ومطاله ثابت وأصغر من مطال التيار العابر لأن مفاعلة المنوبة في الفترة الثابتة هي المفاعلة التزامنية X_d .

$$|I_d| = \frac{|E_0|}{X_d} ; \quad X_d > X'_d > X''_d$$

الشكل (2-14) تيار العطل المتناوب (المتناظر) للآلة التزامنية /15/.

إذا مددنا المغلف envelope العابر باتجاه الخلف (زمنياً) يظهر الفرق بين المغلف العابر والمغلف فوق العابر (أو العابر بسرعة) وهذا الفرق هو التيار في ملف الإخماد الذي يتخامد بسرعة وفق الثابت الزمني لملف الإخماد. وبالتشابه يتخامد الفرق بين المغلف العابر والمغلف الدائم وفق الثابت الزمني لملف التهيج (ملف المحرض).

وبالرغم من أن مفاعلات الآلة التزامنية تتعلق بالإشباع المغناطيسي فيمكن إعطاء قيم مرشدة لها كما يبين الجدول التالي (الجدول 2-1)

الجدول (2-1) قيم عملية لمفاعلات الآلات التزامنية
(جميع القيم بالوحدة منسوبة للاستطاعة الاسمية للآلة)

المحركات المتوافقة *	المعوضات المتوافقة	المنوبات ذات الأقطاب البارزة	المنوبات ذات الدوائر الاسطواني	
0.8-1.10	1.5-2.5	0.6-1.5	1.00-2.0	X_s (or X_d)
0.65-0.8	0.95-1.5	0.4-1.0	0.9-1.5	X_q
0.3-0.35	0.3-0.6	0.2-0.5	0.12-0.35	X'_d
0.18-0.2	0.18-0.38	0.13-0.35	0.1-0.25	X''_d
0.19-0.35	0.17-0.37	$=X''_d$	$=X''_d$	X_2
0.05-0.07	0.025-0.16	0.02-0.2	0.04-0.14	X_0

r_a	0.003-0.008	0.003-0.015	0.004-0.01	0.003-0.012
-------	-------------	-------------	------------	-------------

* المحركات السريعة لها القيم الأدنى

8-2 المركبة المستمرة لتيار الثابت: DC component of stator currents

لم تؤخذ المركبة العابرة DC في الحسابان في المعادلة (2-45). كما كان واضحاً من تحليل دائرة RL في الشكل (2-1)، ستوجد بشكل عام مركبة مستمرة (Unidirectional) تتعلق بلحظة تطبيق التوتر. في الآلة التزامنية، تتعلق المركبة DC بالقيمة اللحظية لجهد الثابت في لحظة حصول القصر (العطل). ويُعطى وضع الدائر بالزاوية θ حيث:

$$\theta = \omega t + \delta + \frac{\pi}{2}$$

وعليه تتبع المركبة المستمرة وضع الدائر δ لدى حصول العطل في الزمن $t = 0$. يسمى الثابت الزمني الذي تتخامد وفقه المركبة المستمرة لتيار الثابت، الثابت الزمني للمتحرّض أثناء القصر τ_a . ويتم معظم التخامد للمركبة المستمرة خلال الفترة تحت العابرة. ولهذا السبب نستخدم القيمة الوسطية لـ X_d'' و X_q'' لحساب τ_a . والعلاقة التقريبية له هي:

$$\tau_a = \frac{X_q'' + X_d''}{2R_a} \quad (2-45)$$

$$\tau_a \approx 0.05 - 0.17 \quad \text{sec}$$

نظراً لأن التوترات ثلاثية الطور تنحرف عن بعضها البعض بمقدار $\frac{2\pi}{3}$ راديان فإن قيمة المركبة المستمرة لتيار الثابت تختلف من طور لآخر وتتبع القيمة اللحظية لجهد الطور لحظة حدوث العطل. المركبة المستمرة للطور a:

$$I_{dc} = \sqrt{2} \frac{E_0}{X_d''} \sin \delta e^{-t/\tau_a} \quad (2-47)$$

إذا ركبنا هذه المركبة على المركبة المتناوبة المتناظرة I_{ac} نحصل على التيار غير المتناظر I_{asy} asymmetrical current :

$$i_{asy}(t) = \sqrt{2}E_0 \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-t/\tau_d'} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-t/\tau_d} + \frac{1}{X_d} \right] \sin(\omega t + \delta) + \sqrt{2} \frac{E_0}{X_d''} \sin \delta e^{-t/\tau_a} \quad (2-48)$$

وتتعلق درجة عدم التناظر في تيار القصر بالنقطة من دورة التوتر التي يحصل عندها القصر. إن أسوأ حالة عابرة ممكنة تحصل عندما $\delta = \pi/2$. أعظم قيمة للمركبة المستمرة هي:

$$I_{dc(max)} = \sqrt{2} \frac{E_0}{X_d''} \quad (2-49)$$

وعليه فإن أعظم قيمة وسطية rms لتيار القصر (ac و dc) في بداية القصر هي:

$$I_{asy} = \sqrt{I_d''^2 + I_{dc}^2} = \sqrt{\left(\frac{E_0}{X_d''} \right)^2 + \left(\sqrt{2} \frac{E_0}{X_d''} \right)^2} \quad (2-50)$$

ومنه

$$I_{asy} = \sqrt{3} \frac{E_0}{X_d''} = \sqrt{3} I_d'' \quad (2-51)$$

وتعطى استطاعة الفصل للقاطع الآلي عملياً بدلالة تيار القصر غير المتناظر I_{asy} .

مثال (2-7):

نفرض حدوث قصر ثلاثي الطور على المولد في المثال (2-6) في اللحظة التي يكون فيها وضع الدائر $\delta = \pi/2$. أوجد المنحني الموجي لتيار المتحرض للطور a. افرض $\tau_a = 0.15\text{sec}$.

الحل:

نضع $\delta = \pi/2$ ونستخدم المعادلة (2-48) في برنامج MATLAB للمثال (2-6) فنحصل على النتائج في الشكل (2-15) كما يُظهرها الحاسوب.

الشكل (2-15) تيار العطل غير المتناظر $\delta = \pi/2$.

مثال (2-8) :

مولد تزامني ثلاثي الطور (60 Hz , 13.8 kV , 100 MVA) موصل إلى محول $\Delta - Y$ (100 MVA , 13.8/220 kV). مفاعلات المولد بالوحدة منسوبة إلى الاستطاعة الاسمية للمولد :

$$X_d = 1 \text{ pu} \quad X'_d = 0.25 \text{ pu} \quad X''_d = 0.12 \text{ pu}$$

وثوابته الزمنية:

$$\tau_a = 0.25 \text{ sec} \quad \tau'_d = 1.1 \text{ sec} \quad \tau''_d = 0.4 \text{ sec}$$

مفاعل المحول 0.2 بالوحدة منسوبة إلى ذات أساس الاستطاعة. يعمل المولد على اللاحمل تحت التوتر الاسمي له وفجأة يحدث عطل ثلاثي الطور على ثانوي المحول كما هو مبين في الشكل (2-16).

الشكل (2-16) مخطط الخط الواحد للمثال (2-8).

والمطلوب :

(a) أوجد تيار العطل تحت العابر، والعابر، والدائم بالوحدة والأمبير على جانبي المحول.

(b) احسب أعظم تيار (rms) (ac+dc) في بداية العطل.

(c) أوجد علاقة تيار العطل الآني بما فيه المركبة المستمرة. افرض $\delta = \pi/2$.

(d) استخدم MATLAB لإيجاد منحنى $i(t)$.

الحل :

(a)

تيار الأساس في جهة المولد

$$I_{B1} = \frac{S_B}{\sqrt{3}V_{B1}} = \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 13.8} = 4184 \text{ A}$$

تيار الأساس في ثانوي المحول

$$I_{B2} = \frac{13.8}{220} (4184) \text{ A}$$

$$I_d'' = \frac{1.0}{0.12 + 0.2} = 3.125 \text{ pu} = 13075 \text{ A on the generator side}$$

$$= 820 \text{ A on the 220- kV side}$$

$$I_d' = \frac{1.0}{0.25 + 0.2} = 2.22 \text{ pu} = 92885 \text{ A on the generator side}$$

$$= 852.5 \text{ A on the 220- kV side}$$

$$I_d = \frac{1.0}{0.1 + 0.2} = 0.833 \text{ pu} = 3486.6 \text{ A on the generator side}$$

$$= 218.6 \text{ A on the 220- kV side}$$

(b)

في جهة المولد

$$I_{asy} = \sqrt{3}I_d'' = \sqrt{3}(3.125) = 5.4 \text{ pu} = 22646 \text{ A}$$

(c)

$$i(t) = \sqrt{2}[(I_d'' - I_d')e^{-t/0.4} + (I_d' - I_d)e^{-t/1.1} + I_d] \sin(377t + \pi/2) + \sqrt{2}I_d''e^{-t/0.25}$$

$$i(t) = [1.28e^{-2.5t} + 1.96e^{-0.91t} + 1.18] \sin(377t + \pi/2) + 4.42e^{-4t} \text{ pu}$$

9-2 تأثير تيار الحمل :Effect of Load current

إذا كان المولد التزامني محملاً قبل حصول العطل المتوازن (أي العطل ثلاثي الطور)، فثمة طريقتان لحساب تيارات العطل.

2-9-1 طريقة التوتر الداخلي خلف المفاعلة

Method of internal voltage behind reactance

في حالة وجود تيار حمل قبل العطل Prefault load current، نعتبر ثلاثة جهود E'' ، E' ، E_0 خلال الفترات العابرة بسرعة والعابرة والدائمة على الترتيب.

E'' = التوتر خلف المفاعلة العابرة بسرعة.

E' = التوتر خلف المفاعلة العابرة.

E_0 = التوتر خلف المفاعلة التزامنية.

نعتبر مخطط الخط الواحد لمولد محمل (الشكل 2-17a). التوترات الداخلية لهذا المولد المبينة في الشكل (2-17b):

الشكل (2-17)

(a) مخطط الخط الواحد لمولد محمل. (b) المخطط الشعاعي.

$$\begin{aligned} E'' &= V + jX_d'' I_L \\ E' &= V + jX_d' I_L \\ E &= V + jX_d I_L \end{aligned} \quad (2-52)$$

مثال (2-9) :

نعتبر الشبكة الكهربائية في المثال (2-8) . نوصل حملاً (100MVA, Pf0.8 Lag) إلى ثانوي المحول كما هو مبين بالشكل (2-18) . التوتر بين طورين على أقطاب الحمل هو 220 KV. يحدث عطل متوازن على أقطاب الحمل. احسب تيار المولد العابر بما فيه تيار الحمل.

الشكل (2-18) مخطط الخط الواحد للمثال (2-9).

الحل:

نمثل الحمل بممانعة كما في الشكل (2-18) .

$$S_L = \frac{100 \angle 36.87^\circ}{100} = 1 \angle 36.87^\circ \text{ pu}$$

$$V = \frac{220}{220} = 1 \angle 0^\circ \text{ pu}$$

$$Z_L = \frac{|V|^2}{S^*} = \frac{1}{1 \angle -36.87^\circ} = 0.8 + j0.6 \text{ pu}$$

يكون تيار الحمل قبل العطل:

$$I_L = \frac{V}{Z_L} = \frac{1.0 \angle 0^\circ}{0.8 + j0.6} = 0.8 - j0.6 = 1 \angle -36.87^\circ \text{ pu}$$

القوة المحركة الكهربائية خلف المفاعلة العابرة :

$$E' = V + j(X'_d + X_l)I_L \\ = 1.0 \angle 0^\circ + j(0.25 + 0.2)(0.8 - j0.6) = 1.27 + j0.36 = 1.32 \angle 15.83^\circ \text{ pu}$$

حدوث العطل يمثل بوصل القاطع S تيار القصر العابر:

$$I'_g = \frac{E'}{j(X'_d + X_l)} = \frac{1.32 \angle 15.83^\circ}{j(0.25 + 0.2)} = 0.8 - j2.822 = 2.93 \angle -74.17^\circ \text{ pu}$$

2-9-2 نظرية ثفنين Thevenin theorem

تنص نظرية ثفنين على ما يلي:

نتيجة لإضافة ممانعة ما (في حالة العطل هي Z_f التي تكون صفراً) بين عقدتين من عقد منظومة كهربائية يحصل تغير على توترات وتيارات هذه المنظومة. لحساب هذا التغير نرسم ما يسمى شبكة ثفنين Thevenin network ونحسب تياراتها وتوتراتها فتكون هذه مساوية تماماً لذلك التغير.

تتألف شبكة ثفنين من قمعك توضع على التسلسل مع الممانعة المضافة وممانعة ثفنين مرئية من العقدتين (الشكل 2-19).

الشكل (2-19) شبكة ثفنين بشكل عام مرئية من العقدتين 1 و 2.

$$E_{th} = \text{التوتر بين العقدة 1 و 2 مثلاً قبل إضافة } Z_f .$$

$$Z_{th} = \text{الممانعة المكافئة لشبكة الممانعات للمنظومة بعد إجراء التالي:}$$

- قصر القمك للمولدات والمحركات.
- وضع ممانعات المولدات والمحركات في شبكة الممانعات.
- فصل أي حمل موجود بين 1 و 2.

$$I = \text{التيار الناجم عن العطل فقط.}$$

بعدئذٍ نأخذ تيارات الحمل بالحسبان بتطبيق مبدأ التراكم.

مثال (2-10) :

أوجد التيار العابر الذي يقدمه المولد في

المثال (2-9) باستخدام نظرية ثفنين.

الحل:

نفصل ممانعة الحمل ونوجد الممانعة المكافئة

بين نهايتي الدارة 1 و 2 بعد قصر القمك للمولد.

$$Z_{th} = j0.25 + j0.2 = j0.45 \text{ pu}$$

حسب نص المسألة (المثال 2-9) فرق التوتر بين 1 و 2 على أقطاب الحمل هو 220 kV وعليه:

$$E_{th} = V_{th} = \frac{220}{220} = 1 \text{ pu}$$

$$I'_f = \frac{V_{th}}{Z_{th}} = -j2.222 \text{ pu}$$

وهو التيار الذي يسري في نقطة العطل والناجم فقط عن العطل.

التيار الذي يقدمه المولد I'_g فعلاً هو تيار العطل + تيار الحمل وعليه:

$$I'_g = I'_f + I_L = -j2.222 + (0.8 - j0.6) = 2.93 \angle -74.17^\circ \text{ pu}$$

وهو الجواب نفسه كما في المثال (2-9).

الفصل الثالث

تحليل العطل المتوازن (المتناظر) في منظومات

القدرة الكهربائية

Balanced (Symmetrical) Fault Analysis in Power Systems

1-3 مقدمة:

تؤلف دراسة الأعطال جزءاً هاماً من تحليل نظم القدرة. والمتطلبات الأساسية لهذه المسألة هو إيجاد توترات العقد والتيارات الفروع أثناء العطل بأنواعه المختلفة. وقد تحصل الأعطال بسبب التوترات الزائدة (العابرة) Overvoltages الناجمة عن التأثيرات الخارجية كضربات البرق Lightning strokes المباشرة أو غير المباشرة على خطوط النقل، مثلاً، أو بسبب التوترات الزائدة الناجمة عن عمليات داخلية كفتح وإغلاق القواطع Switching التي تقتضيها ظروف التشغيل. وثمة أسباب أخرى للعطل مثل تماس النواقل مع بعضها البعض أو مع الأرض، أو تدني عازلية بعض العوازل بسبب اتساخها... الخ.

وقد يتبع التأثيرات الخارجية أو الداخلية انهيار العازل انخياراً داخلياً أو انخياراً خارجياً مما يجعل النواقل متصلة بالأرض أو ببعضها البعض، أي حصول حالة عطل للمنظومة.

وتصنف أعطال منظومات القدرة إلى أعطال متوازنة (متناظرة) وأعطال غير متوازنة.

لقد درسنا تحليل العطل المتوازن لآلة تزامنية في الفصل الثاني أما الآن فسندرس في هذا الفصل تحليل العطل المتوازن في شبكة كهربائية كبيرة. تكون المصادر الأساسية التي تغذي موقع العطل هي المنوبات والمحركات والمعوضات التزامنية.

تتعلق قيمة تيارات العطل على الممانعة الداخلية للمولدات وعلى ممانعة مسار العطل في الشبكة المدروسة. ولقد رأينا في الفصل الثاني أن مفاعلة المولد أثناء العطل ليست ثابتة وأن سلوك المولد في مثل هذا الظرف يمر في ثلاث فترات:

- الفترة العابرة بسرعة (فوق العابرة)، والتي تدوم لبضع دورات الأولى (حوالي 50 ms).

- الفترة العابرة والتي تغطي زمناً أطول.

- الفترة الدائمة.

2-3 خوارزمية حساب العطل المتوازن الثلاثي الطور باستخدام نظرية ثفنين:

يُعرّف هذا العطل بأنه قِصْرٌ آني للأطوار الثلاثة معاً. وحسب الإحصاءات فإن هذا العطل قليل الحدوث إلا أنه أفسى أنواع الأعطال الكهربائية على الشبكة. ونظراً لأن منظومة القدرة متناظرة (متوازنة) الهيكلية والبناء فيمكن تحليل هذا العطل على أساس الطور الواحد. الطوران الآخريان يحملان تيارات ماثلة تختلف عن بعضها البعض بزاوية الطور.

1-2-3 دراسة العطل في حالة اللاحمل:

لقد بينا في الفصل الثاني أن مفاعلة المولد التزامني في ظروف القصر هي كمية متغيرة مع الزمن، وأن ثمة ثلاث مفاعلات تبرز في هذا المجال. المفاعلة العابرة بسرعة X'_d وتدوم لبضع دورات بعد حدوث العطل مباشرة، والمفاعلة العابرة X''_d

وتدوم حوالي 30 دورة، والمفاعلة التزامنية X_d وتدوم للدورات اللاحقة وحتى فصل العطل. ونظراً لأن دوام العطل متعلق بلحظة استجابة نظم الحماية، فمن العسير أحياناً اتخاذ القرار حول أية مفاعلة يجب استخدامها في الحساب. وكقاعدة عامة، تستخدم المفاعلة العابرة بسرعة لتحديد سعة الفصل Interrupting capacity للقواطع الآلية، وتستخدم المفاعلة العابرة لتحديد عيارات الحواكم وتنسيقها. وتستخدم أيضاً المفاعلة العابرة لدراسات الاستقرار. في الحقيقة، يمكن اعتبار العطل تغيراً في هيكلية الشبكة ناجم عن إضافة ممانعة في مكان حدوث العطل. وإذا كانت ممانعة العطل صفرًا نسمي العطل عطلاً صلباً Solid Fault أو عطلاً مباشراً. سنقوم باستخدام نظرية ثفنن لحساب الشبكة المعطلة وسنوضح ذلك بمثال.

مثال (3-1):

يبين الشكل (3-1) مخطط الخط الواحد لمنظومة قدرة بسيطة ذات 3 بارسبارات. يُمثل كل مولد بواسطة قمع خلف المفاعلة العابرة. جميع الممانعات معطية بالوحدة على استطاعة أساس 100 MVA ومهملة المقاومة. اعتبر الافتراضات التالية:

- 1- تهمل السعات التفرعية ونفرض أن النظام يعمل على اللاحمل.
- 2- تعمل المولدات تحت التوتر الاسمي والتردد الاسمي علماً أن قواها المحركة الكهربائية لها ذات الطور.

احسب تيار العطل، توترات البارسات، وتيارات الخطوط خلال العطل عندما يحدث عطل ثلاثي الطور متوازن عبر ممانعة عطل $Z_f = j0.16 \text{ pu}$ على البارسات الثلاثة إفرادياً.

الشكل (3-1) مخطط الممانعة لنظام قدرة بسيط.

الحل:

يُمثل العطل بإضافة (وصل) ممانعة Z_f بين البارسبار 3 والأرض، كما هو مبين في الشكل (3-2a)، وإذا حصل العطل على البارسبار 3. تنص نظرية ثفنين أن تغيرات التوتر في الشبكة التي يسببها الفرع المضاف (ممانعة العطل) المبين في الشكل (3-2a)، تساوي التوترات التي تنجم عن التوتر المضاف $V_3(0)$ فيما جميع المنابع الأخرى مقصورة (الشكل 3-2b).

الشكل (3-2) (a) شبكة الممانعة لأجل عطل في البارسبار 3.

(b) شبكة ثفنين.

سندرس الآن العطل في ثلاث حالات:

(a) عطل متوازن في البارسبار 3:

من الشكل (3-2) نجد :

$$I_3(F) = \frac{V_3(0)}{Z_{33} + Z_f}$$

حيث $V_3(0)$ = توتر ثفنين ويساوي إلى توتر البارسبار قبل حصول العطل.

يمكن الحصول على توتر البارسبار قبل العطل من نتائج دراسة جريان

الحمولة. في هذا المثال، ونظراً لأن الأحمال مهمة والقمك للمولدات مساوية للتوتر

الاسمي، تكون توترات الباسبار مساوية 1pu أي:

$$V_1(0) = V_2(0) = V_3(0) = 1.0 \text{ pu}$$

Z_{33} = ممانعة ثفنين مرئية من الباسبار المعطل.

ولإيجاد ممانعة ثفنين نحول Δ_{123} إلى نجمة مكافئة كما هو مبين في الشكل (3-3a).

الشكل (3-3) اختزال شبكة ثنائي.

$$Z_{1S} = Z_{2S} = \frac{(j0.4)(j0.8)}{j1.6} = j0.2$$

$$Z_{3S} = \frac{(j0.4)(j0.4)}{j1.6} = j0.1$$

$$Z_{33} = \frac{(j0.4)(j0.6)}{j0.4 + j0.6} + j0.1$$

$$= j0.24 + j0.1 = j0.34$$

من الشكل (3-2c) نجد:

$$I_3(F) = \frac{V_3(F)}{Z_{33} + Z_f} = \frac{1.0}{j0.34 + j0.16} = -j2.0 \quad \text{pu}$$

من الشكل (3-3a)، وبتطبيق قاعدة مجزئ التيار نجد:

$$I_{G1} = \frac{j0.6}{j0.4 + j0.6} I_3(F) = -j1.2 \quad \text{pu}$$

$$I_{G2} = \frac{j0.4}{j0.4 + j0.6} I_3(F) = -j0.8 \quad \text{pu}$$

نحسب تغيرات توتر الباسبار من الشكل (3-3) :

$$\Delta V_1 = 0 - (j0.2)(-j1.2) = -0.24 \text{ pu}$$

$$\Delta V_2 = 0 - (j0.4)(-j0.8) = -0.32 \text{ pu}$$

$$\Delta V_3 = 0 - (j0.2)(-j1.2) = -0.68 \text{ pu}$$

نوجد توترات الباسبارات أثناء العطل بتراكم توترات الباسبارات قبل العطل

مع تغيرات توترات الباسبارات الناجمة عن توتر ثفنين في الشبكة (3-3b):

$$V_1(F) = V_1(0) + \Delta V_1 = 1.0 - 0.24 = 0.76 \text{ pu}$$

$$V_2(F) = V_2(0) + \Delta V_2 = 1.0 - 0.32 = 0.68 \text{ pu}$$

$$V_3(F) = V_3(0) + \Delta V_3 = 1.0 - 0.68 = 0.32 \text{ pu}$$

تحسب تيارات الخطوط أثناء العطل كما يلي:

$$I_{12}(F) = \frac{V_1(F) - V_2(F)}{Z_{12}} = \frac{0.76 - 0.68}{j0.8} = -j0.1 \text{ pu}$$

$$I_{13}(F) = \frac{V_1(F) - V_3(F)}{Z_{13}} = \frac{0.76 - 0.32}{j0.4} = -j1.1 \text{ pu}$$

$$I_{23}(F) = \frac{V_2(F) - V_3(F)}{Z_{23}} = \frac{0.68 - 0.32}{j0.4} = -j0.9 \text{ pu}$$

(b) عطل متوازن في الباسبار 2 عبر $Z_f = j0.16$

نرسم مخطط الممانعة للعطل في 2 (الشكل 3-4a) ومنه نرسم شبكة ثفنين

لهذا العطل (الشكل 3-4b).

الشكل (3-4) (a) مخطط الممانعة للعطل في 2، (b) شبكة ثفنين للعطل في 2

نحسب ممانعة ثفنين مرئية من 2 باعتبار الفروع المتوازية فنجد:

$$Z_{22} = \frac{(j0.6)(j0.4)}{j0.6 + j0.4} = j0.24$$

ومن الشكل (3-5b) نحسب تيارا العطل:

$$I_2(F) = \frac{V_Z(0)}{Z_{22} + Z_f} = \frac{1.0}{j0.24 + j0.16} = -j2.5 \text{ pu}$$

الشكل (3-5) اختزال شبكة ثفنين.

ومن الشكل (3-5a) وباستخدام مجزئ تيار العطل بين المولدين نجد:

$$I_{G1} = \frac{j0.4}{j0.4 + j0.6} I_2(F) = -j1.0 \text{ pu}$$

$$I_{G2} = \frac{j0.6}{j0.4 + j0.6} I_2(F) = -j1.5 \text{ pu}$$

ومن الشكل (3-5a) نحسب تغير التوتر في البارسبات الثلاثة والناجم عن العطل:

$$\Delta V_1 = 0 - (j 0.2) (-j 1.0) = -0.2 \text{ pu}$$

$$\Delta V_2 = 0 - (j 0.4) (-j 1.5) = -0.6 \text{ pu}$$

$$\Delta V_3 = -0.2 - (j 0.4) \left(\frac{-j1.0}{2} \right) = -0.4 \text{ pu}$$

التوتر الجديد للبارسبارات الثلاثة أثناء العطل هو التوتر قبل العطل مضافاً إليه تغير التوتر في الباسبار المعني والناجم عن العطل:

$$V_1(F) = V_1(0) + \Delta V_1 = 1.0 - 0.2 = 0.8 \text{ pu}$$

$$V_2(F) = V_2(0) + \Delta V_2 = 1.0 - 0.6 = 0.4 \text{ pu}$$

$$V_3(F) = V_3(0) + \Delta V_3 = 1.0 - 0.4 = 0.6 \text{ pu}$$

تيارات العطل في الخطوط:

$$I_{12}(F) = \frac{V_1(F) - V_2(F)}{Z_{12}} = \frac{0.8 - 0.4}{j0.8} = -j0.5 \text{ pu}$$

$$I_{13}(F) = \frac{V_1(F) - V_3(F)}{Z_{13}} = \frac{0.8 - 0.6}{j0.4} = -j0.5 \text{ pu}$$

$$I_{32}(F) = \frac{V_3(F) - V_2(F)}{Z_{32}} = \frac{0.6 - 0.4}{j0.4} = -j0.5 \text{ pu}$$

(c) العطل المتوازن في الباسبار 1 عبر $Z_F = j 0.16$

نتبع الخطوات نفسها كما في (b) أو (c).

الشكل (3-6) (a) مخطط الممانعة للعطل في 1 ، (b) شبكة ثفنين للعطل في 1

الشكل (3-7) اختزال شبكة ثفنين لأجل العطل في الباسبار 1

$$Z_{11} = \frac{(j0.2)(j0.8)}{j0.2 + j0.8} = j0.16$$

$$I_1(F) = \frac{V_1(0)}{Z_{11} + Z_f} = \frac{1.0}{j0.16 + j0.16} = -j3.125 \text{ pu}$$

$$I_{G1} = \frac{j0.8}{j0.2 + j0.8} I_2(F) = -j2.50 \text{ pu}$$

$$I_{G2} = \frac{j0.2}{j0.2 + j0.8} I_2(F) = -j0.625 \text{ pu}$$

$$\Delta V_1 = 0 - (j 0.2) (-j 2.5) = -0.50 \text{ pu}$$

$$\Delta V_2 = 0 - (j 0.4) (-j 0.625) = -0.25 \text{ pu}$$

$$\Delta V_3 = -0.5 + (j 0.4) \left(\frac{-j0.625}{2} \right) = -0.375 \text{ pu}$$

$$V_1(F) = V_1(0) + \Delta V_1 = 1.0 - 0.5 = 0.50 \text{ pu}$$

$$V_2(F) = V_2(0) + \Delta V_2 = 1.0 - 0.25 = 0.75 \text{ pu}$$

$$V_3(F) = V_3(0) + \Delta V_3 = 1.0 - 0.375 = 0.625 \text{ pu}$$

$$I_{21}(F) = \frac{V_2(F) - V_1(F)}{Z_{21}} = \frac{0.75 - 0.5}{j0.8} = j0.3125 \text{ pu}$$

$$I_{31}(F) = \frac{V_3(F) - V_1(F)}{Z_{31}} = \frac{0.625 - 0.5}{j0.4} = j0.3125 \text{ pu}$$

$$I_{23}(F) = \frac{V_2(F) - V_3(F)}{Z_{23}} = \frac{0.75 - 0.625}{j0.4} = j0.3125 \text{ pu}$$

وهو المطلوب

3-2-2 خوارزمية العطل في حالة منظومة قدرة محملة :

عمدنا في المثال السابق إلى إهمال تيارات الحمل وإلى افتراض التوتر قبل العطل في البارسبارات مساوياً 1.0pu. ولأجل حساب أكثر دقة يمكن أن نعلم التوتر قبل العطل للبارسبارات من نتائج جريان الحمولة للمنظومة قبل العطل، وأن

- تمثل الحملات بممانعات ثابتة وبالتالي نحصل على نموذج رياضي خطي لمعادلات العقدة . ويمكن أن نلخص خوارزمية الحل بالخطوات التالية:
- نعتد التوتير قبل العطل للباسبارات من دراسة جريان الحملولة للمنظومة قبل العطل.
 - نمثل الحملات بسماحيات ثابتة باستخدام توترات الباسبارات قبل العطل.
 - نرسم شبكة الممانعات للمنظومة المعطلة.
 - نرسم شبكة ثفنين مرئية من الباسبار المعطل ونحسب منها تغير التوتير للباسبارات المختلفة والناجم عن العطل فقط.
 - نطبق مبدأ التراكم لإيجاد توتر الباسبارات أثناء العطل وذلك بجمع التوتير قبل العطل لكل باسبار مع تغير التوتير لهذا الباسبار.
 - نحسب تيارات العطل في الخطوط باستخدام نتائج الخطوة السابقة وممانعات هذه الخطوط.

3-3 مفهوم سعة القصر لباسبار (لقضيب التجميع) في منظومة القدرة :

Short Circuit Capacity (SCC) :

سعة القصر لباسبار (لقضيب التجميع) ما هي مقياس عام لمتانة هذا الباسبار. ونعرف سعة القصر لباسبار $(SCC \text{ MVA}) K$ بأنها جداء قيمة توتره الإسمي وقيمة تيار العطل الجاري فيه عندما يحدث العطل المتوازن في الباسبار نفسه. وتستخدم سعة القصر لتصميم أبعاد الباسبار، تحديد وسعة الفصل للقاطع الآلي. ويجدر الإشارة إلى أن سعة الفصل لقاطع آلي هي إحدى مواصفات القاطع الآلي فقط، إذ تحتاج لمواصفات أخرى لتحديد اختيار القاطع الآلي.

لدى حدوث عطل متوازن على الباسبار K مثلاً يهبط توتره إلى الصفر تقريباً (يكون التوتر صفراً تماماً عندما $Z_f = 0$)، بينما يهبط التوتر في الباسبارات الأخرى بمقادير مختلفة حسب متانة (قوة) هذه الباسبارات. يُقصد بمتانة باسبار ما، قدرة هذا الباسبار على المحافظة على ثبات توتره عندما يحدث عطل متوازن على باسبار آخر في المنظومة. وعليه يوجد مفهومان هما سعة القصر لباسبار ومتانة الباسبار. وتُحدر الإشارة إلى أنه يوجد علاقة مباشرة بين سعة القصر والمتانة لباسبار ما. فكلما كانت سعة القصر أعلى تكون متانته أعلى. الباسبار المتين جداً (بشكل لامتناهي) تكون سعة القصر له لانهائية، وندعو هذا الباسبار (الباس اللانهائي Infinite Bus) ويتميز بأنه قادر على إبقاء توتره ثابتاً إذا حصل عطل في أي باسبار آخر (طبعاً إذا حصل عطل عليه ذاته فينهار توتره كلياً). ونشير أيضاً إلى أن سعة القصر الكبيرة لباسبار ما "يدفع ضريبتها" القاطع الآلي الذي عليه عندئذ أن يكون قادراً على فصل تيار عطل كبير.

وسنقدم الآن بعض العلاقات الرياضية في هذا المجال.

سعة القصر لباسبار K:

$$SCC = \sqrt{3} V_{LK} I_K(F) * 10^{-3} \text{ MVA} \quad (3-1)$$

حيث:

V_{LK} = قيمة التوتر الاسمي بين طورين للباسبار K [kV]

$I_K(F)$ = قيمة تيار العطل الجاري في الباسبار K نتيجة عطل متوازن فيه [A].

قيمة التيار المتناظر (المتناوب) للعطل بالوحدة هو:

$$I_k = \frac{V_k(0)}{X_{kk}} \quad (2-3)$$

حيث:

$V_k(0)$ = قيمة التوتر قبل العطل بالوحدة Pu

X_{KK} = مفاعلة ثفنين مرئية من الباسبار K بالوحدة.
نفرض مقاومة ثفنين مهملة وبالتالي يبقى الحساب في جانب الأمان.

$$I_B = \frac{S_B * 10^3}{\sqrt{3}V_B} \quad (3-3)$$

حيث:

S_B = استطاعة الأساس [MVA]

V_B = توتر الأساس بين الطورين [KV]

وعليه فتيار العطل بالأمبير:

$$I_K(F) = I_K(F)_{Pu} * I_B$$

$$= \frac{V_k(0) * S_B * 10^3}{X_{kk} * \sqrt{3}V_B} \quad (3-4)$$

$$SCC = \frac{V_k(0)S_B}{X_{kk}} \frac{V_L}{V_B} \quad (3-5)$$

إذا كان التوتر الأساس مساوياً للتوتر الاسمي

$$SCC = \frac{V_k(0)S_B}{X_{kk}} \quad (3-6)$$

عادة تكون $V_K(0) = 1.0 \text{ pu}$ وعليه:

$$SCC = \frac{S_B[MVA]}{X_{kk}[pu]} [MVA] \quad (3-7)$$

مثال (3-2):

احسب سعة القصر لباسبار القامشلي 230 KV في الشبكة السورية إذا علمت أن :

$$S_B = 100 \text{ MVA} , \quad X_{\text{قامشلي}} = 0.18$$

$$SCC = \frac{100}{0.189} = 529 \text{ MVA}$$

واحسب سعة القصر لباسبار تشرين 230 KV إذا علمت :

$$SB = 100 \quad , \quad X_{\text{تشرين}} = 0.044$$

$$SCC = \frac{100}{0.044} = 2273 \quad \text{MVA}$$

نلاحظ أن باسبار تشرين أكثر متانة بكثير من باسبار القامشلي وذلك لأن سعة قصره أكبر بأربع مرات.

3-4 اختيار القواطع الآلية: Selection of circuit breakers

القاطع الآلي Circuit breaker هو قاطع يصمم ليفصل تيارات العطل. وهو جهاز ميكانيكي وظيفته قطع وإعادة إغلاق دائرة كهربائية تحت كل الظروف بما فيها ظروف العطل حيث تكون التيارات كبيرة القيمة. عندما تبدأ تلامسات القاطع بالابتعاد عن بعضها يتشكل قوس كهربائي. ومن المرغوب أن يُجبر القوس على سلوك مسار متعرج حيث يطول مساره ويُبرّد وأخيراً يطفأ. تيار القوس هو تيار متناوب (تبسيطاً) يأخذ القيمة صفر مرتين خلال دورة. يتم تطويع القوس ليسير بمسار طويل بواسطة عدة طرق:

- حقل مغناطيسي (القواطع ذات الأطفاء المغناطيسي) Magnetic blow breakers
 - تيار هوائي (قواطع ذات النفخ الهوائي Air blast breakers).
- يتم أحياناً اعتراض القوس في الهواء أو الزيت أو SF₆ أو في الفراغ. في هذه الفقرة لannenوي دراسة عمل القاطع الآلي كجهاز حماية بل دراسة بعض أسس اختيار القواطع الآلية المتعلقة بنتائج دراسات الأعطال.

هناك اثنتان من مواصفات القاطع الآلي تتطلبان حساب تيار العطل وهما:

- التيار اللحظي الأعظمي الذي يجب أن يتحمله القاطع.
- التيار الإجمالي عندما تتباعد تلامسات القاطع لتفصل الدارة.

لإيجاد القيمة الوسطية الفعالة rms للتيار الأول (ويدعى التيار الخاطف Momentary current) نحسب التيار العابر بسرعة (فوق العابر) المتناظر باستخدام المفاعلات العابرة بسرعة (فوق العابرة) لآلات التزامنية، ثم نضرب التيار الناتج بالعامل (1.6) الذي يجسد تأثير المركبة المستمرة (DC-offset). أما التيار الثاني (ويدعى تيار الفصل Interrupting rating) فيُحسب من التيار العابر بسرعة (باستخدام X_d' للمحركات) ثم يضرب الناتج بعامل يجسد تأثير المركبة المستمرة، ويتعلق هذا العامل بسرعة القاطع الآلي (مثلاً 2، 3، 5، 8 دورات) التي هي مقياس للفترة الزمنية بين لحظة حدوث العطل ولحظة انطفاء القوس. نأخذ قيمة هذا العامل من الجدول التالي :

العامل	سرعة القاطع الآلي (دورات)
1	8 أو أكثر
1.1	5
1.2	3
1.4	2

وإذا كانت $SCC < 500 \text{ MVA}$ تُزاد قيمة العامل في الجدول بمقدار 0.1 ولأجل القواطع الهوائية 600 V أو أقل نعتبر قيمة العامل 1.25. وتصنف القواطع ذات السرعات المختلفة حسب زمن الفصل الاسمي لها. زمن الفصل الاسمي Rated interrupting time لقاطع آلي هو الفترة الزمنية بين لحظة تفعيل دائرة الإطلاق Energizing the trip circuit ولحظة انطفاء القوس. يسبق هذه الفترة زمن تأخر الإطلاق Tripping delay الذي يكون عادة حوالي نصف دورة للحكمة حتى تستجيب. يتم تحديد المواصفات للقاطع الآلي ونذكر بعضها:

- التوتّر الاسمي.
- التيار الدائم الاسمي Rated continuous current وهو أعظم تيار 50 Hz يمكن أن يحمله القاطع باستمرار دون زيادة درجة الحرارة عن الحد المسموح.
- عامل مجال التوتّر K Voltage range factor.
- تيار القصر الاسمي لأجل التوتّر الأعظمي الاسمي (kV).

$$K = \frac{\text{التوتّر الأعظمي الاسمي}}{\text{الحد الأدنى لمجال توتّر التشغيل}} \quad (8-3)$$

K يحدد مجال التوتّر الذي يكون فيه الجداء : «تيار العطل × توتّر التشغيل» ثابتاً. لا يجوز للقاطع الآلي أن يتجاوز قدرته على فصل العطل. يتعيّن على القاطع أن يمتلك مقدرة فصل متناظرة عظمى مساوية لـ:

$$\text{تيار العطل الاسمي} \times K \quad (9-3)$$

في المجال بين التوتّر الأعظمي الاسمي و $\frac{1}{K} \times$ التوتّر الأعظمي الاسمي تُعرف مقدرة الفصل المتناظرة على أنها الجداء:

$$\frac{\text{التوتّر الأعظمي الاسمي}}{\text{توتّر التشغيل}} = \text{تيار العطل الاسمي} \quad (10-3)$$

مثال (3-3) :

قاطع آلي 69 kV مواصفاته: $K = 1.21$

التيار المستمر = 1200 A

تيار العطل الاسمي = 19000 A تحت التوتّر الأعظمي الاسمي

التوتر الأعظمي الإسمي = 72.5 kV

احسب مقدرة الفصل المتناظرة الأعظمية للقاطع و اشرح أهميتها لأجل توترات تشغيل منخفضة.

الحل:

مقدرة الفصل المتناظرة الأعظمية للقاطع:

$$1.21 * 19000 = 22990 \text{ A}$$

لا يجوز تجاوز هذه القيمة.

من تعريف K نجد:

$$60\text{kV} = \frac{72.5}{1.21} = \text{الحد الأدنى لتوتر التشغيل}$$

وعليه فإن القاطع يمكن أن يفصل تيار عطل أعظمي 22990 (أي أكبر من 19000)

لأجل توترات تشغيل من 60 إلى 72.5 kV.

فمثلاً لأجل تموتر تشغيل 66 kV يكون تيار الفصل:

$$\frac{72.5}{66} * 19000 = 20871 \text{ A}$$

يكون K = 1.0 لقواطع 115 kV وأكبر.

مثال (3-4) :

نظام ثلاثي الطور مؤلف من مولد تزامني يغذي ثلاثة محركات تزامنية متماثلة

عن طريق محول رافع للتوتر وخط نقل ومحول خافض للتوتر. مواصفات النظام هي:

	Sn [MVA]	V _n kV	X' _d	X'' _d	X _T
G	25	11		20 %	
M	5	6.6	30%	25%	
T ₁	25	11/66 kV			10%

T ₂	25	66/6.6 kV			10%
----------------	----	-----------	--	--	-----

L X_L = 15% S_B = 25 MVA , V_B=66 kV

الشكل (3-8) نظام ثلاثي الطور للمثال (3-4).

توتر باسبار المحركات هو 6.6 kV. حصل عطل متوازن صلب في النقطة F. افرض أن النظام يعمل بدون حمل قبل حدوث العطل. وافرض أن استطاعة الأساس 25 MVA وتوتر الأساس للمولد 11 kV ولخط النقل 66 kV وللمحركات 6.6 kV.

أحسب:

- 1- التيار العابر بسرعة المغذي لنقطة العطل بالأمبير.
- 2- التيار العابر بسرعة المار في القاطع B بالأمبير.
- 3- التيار الخاطف (الكلي العابر بسرعة) المار في القاطع B.
- 4- التيار الذي يجب أن يفصله القاطع B خلال خمس دورات .

الحل:

1- نحسب مفاعلة المحرك العابرة بسرعة حسب نظام النسب الجديد

$$X''_{dm} = 0.2 * \frac{25}{5} = 1.25 \text{ pu}$$



شبكة ثفنين

اختزال شبكة ثفنين

الشكل (3-9).

من الشكل (3-9) نجد:

$$I_F(F) = \angle 0^\circ \left(3 * \frac{1}{j1.25} + \frac{1}{j0.55} \right) = -j4.22 \text{ pu}$$

تيار الأساس في منطقة المحركات :

$$\frac{25*1000}{\sqrt{3}*6.6} = 2187 \text{ A}$$

$$\therefore I_F(F) = 4.22 * 2187 = 9229 \text{ A}$$

-2

$$I_B(F) = 1 \angle 0^\circ \left(2 * \frac{1}{j1.25} + \frac{1}{j0.55} \right) = -j3.42$$

$$= 3.42 * 2187 = 7479.5 \text{ A}$$

-3

$$I_B(F) \text{ total} = 1.6 * 7479.5 = 11.967 \text{ A}$$

4- نعيد حساب تيار العطل المتناوب باعتبار X'_d للمحركات. نحسب X'_d للمحرك حسب نظام النسب الجديد:

$$X'_{dM} = j0.3 * \frac{25}{5} = j1.5 \text{ pu}$$

$$I_B(F) = 1 \angle 0^\circ \left(2 * \frac{1}{j1.5} + \frac{1}{j0.55} \right) = -j3.1515 \text{ pu}$$

ومن الجدول نأخذ قيمة عامل المركبة المستمرة 1.1 فنجد تيار الفصل:

$$1.1 * 3.1515 * 2187 = 7581 \text{ A}$$

وهو المطلوب.

مثال (3-5) :

نظام قدرة مؤلف من 4 باسبارات (الشكل 3-10)، الباسباران 1 و 2 توليد والباسباران 3 و 4 محولات . المولدان متماثلان ($X'_d = 11 \text{ kV}$, 100 MVA) (10% والمحولات متماثلان ($X_T = 5\%$, 100 MVA , $11/110 \text{ kV}$). ممانعات الخطوط مبينة على الشكل بالوحدة على أساس 110 kV , 100 MVA . المطلوب

إنجاز حسابات العطل المتوازن في الباسبار 4 ($Z_f = 0$) . افرض توتر قبل العطل مساوياً 1 pu في الباسبارات جميعها، وأهمل تيارات الحمل قبل العطل.

الشكل (3-10) نظام القدرة للمثال (3-5)

الحل:

نرسم شبكة ثفنين لأجل العطل في 4 (الشكل 3-11)، ونجري اختزالاً منهجياً (الشكل 3-12) ونحسب تيار العطل مباشرة من الشكل (3-12e) فنجد :

$$Z_{th} = Z_{44} = j 0.13560 \text{ pu}$$

$$I_4(F) = \frac{1}{j0.13560} = -j7.37463 \text{ pu}$$

الشكل (3-11) شبكة ثفنين للعطل في 4

الشكل (3-12) اختزال شبكة ثفنين.

من الشكل (3-12) نحصل على مساهمة كل مولد من تيار العطل :

$$I_{G1} = I_4(F) * \frac{j0.19583}{j0.37638} = -j3.83701 \text{ pu}$$

$$I_{G2} = I_4(F) * \frac{j0.18055}{j0.37638} = -j3.53762 \text{ pu}$$

$$\Delta V_1(F) = 0 - (j0.15)(-j3.83701) = -0.57555 \text{ pu}$$

$$\Delta V_2(F) = 0 - (j0.15)(-j3.53762) = -0.53064 \text{ pu}$$

$$V_1(F) = 1 + \Delta V_1(F) = 0.42445 \text{ pu}$$

$$V_2(F) = 1 + \Delta V_2(F) = 0.46936 \text{ pu}$$

$$\therefore I_{12}(F) = \frac{V_1(F) - V_2(F)}{j0.2} = j0.22455 \text{ pu}$$

$$I_{13}(F) = \frac{V_1(F) - V_2(F)}{j0.15 + j0.1} = j0.17964 \text{ pu}$$

ومن

$$\Delta V_3 (F) = 0 - [(j0.15)(-j3.83701) + (j0.15)(j0.17964)]$$

$$= - 0.54860 \text{ pu}$$

$$\therefore V_3 (F) = 1 - 0.54860 = 0.4514 \text{ pu}$$

$$V_4 (F) = 0$$

ويترك إيجاد تيارات بقية الخطوط كتمرين للقارئ
سعة القصر للباسبار 4:

$$SCC = \frac{100 \text{ MVA}}{Z_{44} [\text{pu}]} = 737.463 \text{ MVA}$$

مسألة للقارئ: أعد حل المثال إذا حل العطل على الباسبار 2.
تعليق: نلاحظ أن عملية اختزال شبكة ثنيتين غير عملية ومتعبة وتأخذ زمناً طويلاً
يطول مع زيادة عدد باسبارات المنظومة. لذلك من الضروري اعتماد خوارزمية
منهجية مناسبة للحل بواسطة الحاسوب وهو مضمون الفقرة التالية.

3-5 خوارزمية تحليل العطل لمنظومة قدرة كبيرة باستخدام متريس ممانعات العقد

: Algorithm for fault analysis using bus impedance matrix

لقد حسبنا الأعطال فيما سبق من فقرات منظومات قدرة بسيطة استخدمنا
فيها نظرية ثنيتين لرسم شبكة ثنيتين واتبعنا في ذلك خوارزمية تم تنفيذها يدوياً، وكان
ذلك ممكناً نظراً للعدد القليل لباسبارات المنظومات المدروسة. في هذه الفقرة
سنستخدم متريس ممانعات العقد ونظرية ثنيتين لتحليل العطل المتوازن في الشبكات
الكهربائية الكبيرة Large- scale- systems مهما كان عدد باسباراتها نعتبر منظومة
قدرة ذات n باسبار (الشكل 3-13) تعمل تحت ظروف متوازنة مما يسمح لنا
بتمثيلها على أساس طور واحد. تمثل الآلة بقمك ثابتة خلف ممانعة مناسبة X_d'' أو

X'_d . تمثل الخط بدارة مكافئة π حيث الممانعات مقدرة بالوحدة (pu) منسوبة إلى استطاعة أساس عامة MVA. يحدث عطل متوازن في الباسبار K عبر ممانعة عطل Z_F .

نعتد التوتر قبل العطل للباسبارات من نتائج جريان الحمولة (أو نفرضها 1 pu) فنحصل على الشعاع:

الشكل (3-13) منظومة قدرة ذات n باسباراً

$$V_{bus}(0) = \begin{bmatrix} V_1(0) \\ \vdots \\ V_k(0) \\ \vdots \\ V_n(0) \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

كما ذكرنا سابقاً، نظراً لأن تيارات العطل أكبر بكثير من تيارات الحمل فيمكن إهمال هذه التيارات. وعلى أية حال، فيعتبر تقريباً مقبولاً أن نمثل حمل الباسبار بواسطة ممانعة ثابتة تحت توتر الباسبار قبل العطل أي :

$$Z_{iL} = \frac{|V_i(0)|^2}{S_L^*} \quad (3-12)$$

إن تغيرات توتر باسبارات المنظومة الناجمة عن العطل (الممثل بإضافة Z_f بين الباسبار المعطل K والأرض) تكافئ توترات باسبارات شبكة ثفنن التي تحوي توتر ثفنن $V_K(0)$ فيما تكون جميع القمم لآلات التزامنية مقصورة، ومما نعات جميع عناصر المنظومة والحمولات (الشكل 3-14). تمثل جميع تغيرات التوتر الناجمة عن العطل في هذه الدارة بالشعاع:

$$\Delta V_{bus} = \begin{bmatrix} V_1 \\ : \\ V_k \\ : \\ V_n \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

الشكل (3-14) شبكة ثفنين للعطل في K.

بتطبيق مبدأ التراكم نحصل على التوتر أثناء العطل للباسبارات:

$$V_{bus}(F) = V_{bus}(0) + \Delta V_{bus} \quad (3-14)$$

ومن فصل جريان الحمولة حصلنا على المعادلة المترسية لمنظومة كهربائية ذات n باسبار.

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \quad (3-15)$$

حيث:

I_{bus} = شعاع التيارات المحقونة في الباسبارات.

Y_{bus} = متريس سماحيات العقد، حيث عناصره القطرية :

$$Y_{ii} = \sum_{j=0}^n y_{ij} \quad j \neq i \quad (3-16)$$

وعناصره غير القطرية:

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij} \quad (17-3)$$

حيث:

y_{ij} (حرف صغير) = المساية الطبيعية للخط i-j .

يجب الانتباه إلى أن جميع التيارات المحقونة في باسبارات شبكة ثفنين

(الشكل 3-14) تساوي صفر ماعدا التيار المحقون في الباسبار المعطل (k)، والذي

يساوي إلى $-I_k(F)$ (لأن العطل يغادر الباسبار المعطل) .

يعطي تطبيق المعادلة (3-15):

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -I_k(F) \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{1k} & \dots & Y_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{k1} & \dots & Y_{kk} & \dots & Y_{kn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{n1} & \dots & Y_{nk} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_k \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

أو باختصار :

$$I_{bus}(F) = Y_{bus} \Delta V_{bus} \quad (3-19)$$

$$\Delta V_{bus} = Z_{bus} I_{bus}(F) \quad (3-20)$$

حيث :

$$Z_{bus} = Y_{bus}^{-1} \quad (3-21)$$

Z_{bus} = ممتريس ممانعات العقد.

نجد بتعويض (3-20) في (3-14)

$$V_{bus}(F) = V_{bus}(0) + Z_{bus} I_{bus}(F) \quad (3-22)$$

نكتب المعادلة الأخيرة بدلالة عناصرها فنجد:

$$\begin{bmatrix} V_1(F) \\ \vdots \\ V_k(F) \\ \vdots \\ V_n(F) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1(0) \\ \vdots \\ V_k(0) \\ \vdots \\ V_n(0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1k} & \dots & Z_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{k1} & \dots & Z_{kk} & \dots & Z_{kn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{n1} & \dots & Z_{nk} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -I_k(F) \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-23)$$

ونظراً لاحتواء شعاع التيارات على عنصر واحد مغاير للصفر نجد:

$$V_k(F) = V_k(0) - Z_{kk} I_k(F) \quad (3-24)$$

وأيضاً من الشكل (3-13) توتر الباسبار المعطل يساوي من جهة أخرى:

$$V_k(F) = Z_f I_k(F) \quad (3-25)$$

لأجل عطل صلب مباشر يكون $Z_f = 0$ و $V_k(F) = 0$.

بتعويض (3-25) في (3-24) نحصل على :

$$I_k(F) = \frac{V_k(0)}{Z_{kk} + Z_f} \quad (3-26)$$

وعليه لأجل عطل في k نحتاج فقط العنصر Z_{kk} من مصفوفة ممانعات العقد، وهذا العنصر هو في الواقع ممانعة ثفنين مرئية من الباسبار المعطل (k) .

نكتب المعادلة i من المعادلة المتريسية (3-23) فنحصل على توترات الباسبارات أثناء العطل:

$$V_i(F) = V_i(0) - Z_{ik} I_k(F) \quad (3-27)$$

أو :

$$V_i(F) = V_i(0) - \frac{Z_{ik}}{Z_{kk} + Z_f} V_k(0) \quad (3-28)$$

بمعرفة توترات الباسبارات أثناء العطل، نستطيع حساب تيار العطل الجاري في الخطوط كلها. فتيار العطل المار في الخط الواصل بين الباسبارين i و j الذي ممانعته Z_{ij} (هو موجب إذا اتجه من i إلى j):

$$I_{ij}(F) = \frac{V_i(F) - V_j(F)}{Z_{ij}} \quad (3-29)$$

وهكذا نلاحظ أنه بمعرفة متريس ممانعات العقد للمنظومة، يمكن بسهولة إيجاد العطل وتوترات الباسبارات أثناء العطل لأجل عطل في أي باسبار.

إحدى الطرق لحساب Z_{bus} هي إيجاد Y_{bus} لشبكة ثننين ثم نقوم بحساب مقلوب المصفوفة Y_{bus} . يجب أن ننتبه إلى أن المصفوفة Y_{bus} لشبكة ثننين تختلف عن المصفوفة Y_{bus} لمنظومة القدرة المستخدمة في دراسة جريان الحمولة. السبب هو أن المولدات والمحركات تمثل بممانعاتها لأجل حسابات الأعطال، بينما لم تكن هذه الممانعات متضمنة كجزء من الشبكة لأجل دراسة جريان الحمولة. وثمة طريقة ثانية لبناء Z_{bus} بناءً مباشراً دون الحاجة لإيجاد Y_{bus} .

افتراضات فيزيائية:

سنلخص فيما يلي الافتراضات الفيزيائية التي تبسط النموذج الرياضي لتحليل الأعطال ولا تؤثر بشكل ملحوظ على دقة النتائج:

- تُحمل الحمولات العادية normal loads ساعات الخطوط وأية عناصر تفرعية مع الأرض.
- يُمثل المولد بمنبع توتر على التسلسل مع مفاعله العابرة، العابرة بسرعة.
- تُعتبر كافة الحمولات المجهزة بمبدل مآخذ، في الوضع الاسمي.
- تحمل مقاومة الخط إذا كانت أصغر من مفاعله بـ 6 أضعاف أو أكثر.

مثال (3-6) :

أعد حل المثال (3-1) باستخدام متريس ممانعات العقد لأجل عطل متوازن في البارسبار 3.

الحل :

نعيد رسم شبكة ثننين للعطل على البارسبار 3 (الشكل 3-2b) مع تحويل الممانعات إلى سماعات (الشكل 3-15).

الشكل (3-15) مخطط المسيرة للشكل (3-2b).

نوجد Y_{bus} لشبكة ثفنين المسألة :

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} -j8.75 & j1.25 & j2.5 \\ j1.25 & -j6.25 & j2.5 \\ j2.5 & j2.5 & -j5.0 \end{bmatrix}$$

$$Y_{bus}^{-1} = Z_{bus} = \begin{bmatrix} j0.16 & j0.08 & j0.12 \\ j0.08 & j0.24 & j0.16 \\ j0.12 & j0.16 & j0.34 \end{bmatrix}$$

$$I_3(F) = \frac{V_3(0)}{Z_{33} + Z_f} = \frac{1.0}{j0.34 + j0.16} = -j2.0 \text{ pu}$$

ومن المعادلة (3-27) نجد توترات الباسبارات أثناء العطل:

$$V_1(F) = V_1(0) - Z_{13}I_3(F) = 1.0 - (j0.12)(-j2.0) = 0.76 \text{ pu}$$

$$V_2(F) = V_2(0) - Z_{23}I_3(F) = 1.0 - (j0.16)(-j2.0) = 0.68 \text{ pu}$$

$$V_3(F) = V_3(0) - Z_{33}I_3(F) = 1.0 - (j0.34)(-j2.0) = 0.32 \text{ pu}$$

ومن المعادلة (3-29) نحسب تيارات الخطوط :

$$I_{12}(F) = \frac{V_1(F) - V_2(F)}{Z_{12}} = \frac{0.76 - 0.68}{j0.8} = -j0.1 \text{ pu}$$

$$I_{13}(F) = \frac{V_1(F) - V_3(F)}{Z_{13}} = \frac{0.76 - 0.32}{j0.4} = -j1.1 \text{ pu}$$

$$I_{23}(F) = \frac{V_2(F) - V_3(F)}{Z_{23}} = \frac{0.68 - 0.32}{j0.4} = -j0.9 \text{ pu}$$

وهذه النتائج تطابق تماماً نتائج المثال (3-1).

مسألة للقارئ:

أعد الحل لأجل عطل في الباسبار 2 ثم عطل في الباسبار 1.

تعليق : نلاحظ أن العناصر القطرية لمتريس ممانعات العقد هي تماماً ممانعات ثفنين التي حسبناها في المثال (3-1) عن طريق الاختزال المضني لشبكة ثفنين مختلفة حسب مكان العطل.

مثال (3-7) :

أعد حل المثال (3-5) باستخدام خوارزمية متريس ممانعات العقد.

الحل:

نوجد Y_{bus} لشبكة ثفنين المسألة في الشكل (3-11) مع الانتباه إلى تحويل الممانعات إلى سماحيات.

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} -j28.333 & j5.000 & j6.667 & j10.000 \\ j5.000 & -j28.333 & j10.000 & j6.667 \\ j6.667 & j10.000 & -j16.667 & j0.000 \\ j10.000 & j6.667 & j0.000 & -j16.667 \end{bmatrix}$$

نحسب مقلوب المصفوفة Y_{bus} فنحصل على :

$$Z_{bus} = \begin{bmatrix} j0.0903 & j0.0537 & j0.0719 & j0.0780 \\ j0.0597 & j0.0903 & j0.0780 & j0.0719 \\ j0.0719 & j0.0780 & j0.1356 & j0.0743 \\ j0.0780 & j0.0719 & j0.0743 & j0.1356 \end{bmatrix}$$

(يمكن استخدام التابع inv العائد للبرنامج MATLAB للحصول على مقلوب المصفوفة).

$$I_4(F) = \frac{V_4(0)}{Z_{44}} = \frac{1.0}{j0.1356} = -j7.37463 \text{ pu}$$

ومن المعادلة (3-27) نحسب توترات الباسبارات أثناء العطل:

$$V_{bus}(F) = \begin{bmatrix} V_1(F) \\ V_2(F) \\ V_3(F) \\ V_4(F) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4248 \\ 0.4698 \\ 0.4521 \\ 0.0 \end{bmatrix} \text{ Pu}$$

ومن المعادلة (3-29) نحسب تيارات الخطوط أثناء العطل:

$$I_{13}(F) = j0.182 \text{ pu} ; I_{12}(F) = j0.225 \text{ pu}$$

$$I_{14}(F) = -j4.248 \text{ pu} ; I_{24}(F) = -j3.132 \text{ pu}$$

$$I_{23}(F) = -j0.177 \text{ pu}$$

إحدى ميزات طريقة Z_{bus} ، أنه بعد تشكيل Z_{bus} نستطيع حالاً حساب العطل على أي باسبار فمثلاً لأجل عطل باسبار 1 أو 2 نجد :

$$I_1(F) = \frac{1.0}{Z_{11}} = \frac{1}{j0.0903} = -j11.074197 \text{ pu}$$

$$= I_2(F)$$

3-6 حسابات العطل المتوازن لشبكات التوتر المنخفض :

يقصد بشبكات التوتر المنخفض الشبكات ذات التوتر 1000V أو أقل. من حيث المبدأ لا تختلف حسابات الأعطال لهذه الشبكات عنها في الشبكات ذات التوتر الأعلى. أما في التفاصيل فنجد للشبكات تحت 1000V خصوصيات هامة.

نظراً لأن شبكات التوتر المنخفض الحديثة لم تعد تُغذى من مولدات توتر منخفض مباشرة بل عن طريق شبكة توتر متوسط ومحولات مناسبة، فيمكن اعتبار العطل فيها عطلاً بعيداً عن المولد (عطل بعيد) ويمكن أن تمثل شبكة التوتر المغذية بقمك قيمتها $1.05 V_n$ على التسلسل مع ممانعة Z_N تحسب كما يلي:

$$Z_N = \frac{1.1V_n^2}{SCC} \quad \text{طور } \Omega \quad (3-30)$$

حيث :

V_n : التوتر بين طورين الإسمي للشبكة المغذية (مثلاً 20kV).

SCC : سعة القصر للشبكة المغذية [MVA] (مثلاً 500 MVA في الشبكة السورية
20 kV).

شكل

وتحدد نسبة R_N/X_N حسب هيكلية هذه الشبكة التي تتألف غالباً من كابلات و/أو خطوط هوائية وعملياً تكون هذه النسبة بحدود 0.1 إلى 0.2 عندما محطة التحويل (مثلاً 66/20 kV) قريبة من مركز تحويل شبكة التوزيع. إن تأثير الشبكة المغذية هو تأثير محمد لتيار العطل خاصة إذا كانت استطاعة القصر لها صغيرة، وأخذ هذا بالحسبان (عندما يكون الإخماد 5% أو أكبر من تيار العطل) يقود إلى تجنب المبالغة غير المبررة في تصميم عناصر الشبكة من حيث الاجهادات الديناميكية والحرارية لتيارات العطل، وخاصة للشبكات المغذية للمناطق الصناعية أو لتلبية الاحتياجات الذاتية لمحطة توليد.

- تكون نسبة R/X لمسار العطل أصغر من 0.3 لشبكات التوتر المتوسط والتوتر العالي، الأمر الذي يسمح بإهمال R في حسابات العطل لها. بينما تكون نسبة R/X في شبكات التوتر المنخفض مساوية أو أكبر من الواحد. وفي بعض الحالات

الخاصة (شبكة كابلات صغيرة المقطع) فقد تصل R/X إلى قيمة يصبح معها إهمال X ممكناً (مثلاً لأجل $R/X \geq 3$).

كما تجدر الإشارة إلى أنه لا يجوز في بعض الحالات إهمال ممانعات بعض عناصر شبكة التوتر المنخفض مثل القواطع والمنصهرات والباسبارات ومحولات التيار... إلخ.

إن معرفة النسبة R/X لمسار العطل هامة في إيجاد عامل تأثير المركبة المستمرة DC-offset (ويدعى عامل الصدمة في النظم القياسية) ويمكن إيجاده من الشكل (3-16).

الشكل (3-16) عامل الصدم في النظم القياسية الألمانية.

$$\hat{I}_s = C \cdot \sqrt{2I''(F)} \quad (3-31)$$

$\hat{I}_s$ = تيار العطل الصدمي وهو الذروة الأولى لمنحني العطل مع أخذ تأثير المركبة المستمرة بالاعتبار.

$C =$ عامل الصدم وهو يساوي 1.6 في النظم القياسية الأمريكية.
إن معرفة تيار العطل الصدمي هام في حسابات الإجهادات الكهربائية والميكانيكية لعناصر منظومة القدرة.

- يمكن إهمال ساعات المكثفات التفرعية وساعات الكابلات.
 - يمكن إهمال تغير R مع درجة الحرارة، ويمكن اعتماد درجة حرارة 20° لأجل حسابات أعطال شبكات التوتر المنخفض.
 - يجب أخذ تأثير الأحمال (المحركات غير التزامنية) في حسابات العطل.
- يكون عملياً :

$$\hat{I}_{sM} = 8-11 I_{nM} \quad (3-32)$$

$\hat{I}_{sM} =$ تيار العطل الصدمي للمحرك.

$I_{nM} =$ التيار الاسمي للمحرك.

ومن غير الضروري اعتبار كل محرك صغير الاستطاعة على حدة، بل يمكن اعتماد محرك مكافئ استطاعته تساوي مجموع الاستطاعات الاسمية للمحركات الإفرادية. وتصلح العلاقات التالية في الحساب:

$$I_M''(F) = \frac{0.9V_{nM}}{\sqrt{3}Z_M} \quad (3-33)$$

$$Z_M = \frac{V_{nM}}{\sqrt{3}I_{st}} \quad (3-34)$$

حيث :

$V_{nM} =$ التوتر الاسمي بين طورين على أقطاب المحرك.

$Z_M =$ ممانعة الإقلاع للمحرك.

$I_{st} =$ تيار الإقلاع للمحرك.

$$I_{st} = 4-8 I_{nM} \quad (3-35)$$

مثال (3-8) :

مجموعة محركات تحريضية استطاعتها الإجمالية 15MW $\cos\phi = 0.85$ تعمل تحت توتر 6kV . احسب ممانعة الإقلاع Z_M لها والمستخدم في حساب الأعطال علماً أن تيار الإقلاع يساوي 5 أضعاف التيار الإسمي.

الحل :

للمحرك المكافئ

$$I_n = \frac{15}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0.85} = 1.7 \text{ kA}$$

$$Z_M = \frac{6}{\sqrt{3} \cdot 5 \cdot 1.7} = 0.407 \text{ } \Omega/\text{phase}$$

وسنوضح في المثال (3-9) طريقة الحساب وفق النظم القياسية الألمانية.

مثال (3-9) :

تغذى شبكة توتر منخفض 380V من شبكة 6kV سعة القصر لها 230MVA عبر محول ($6/0.4\text{kV}$ ، $Dy5$ ، $Z_T = 6\%$ ، 1MVA ، ضياعات القصر = 11.3kW). محددات عناصر الشبكة (الشكل 3-17).

X mΩ/phase	R mΩ/phase	
-	0.017	القاطع الآلي 2000A
0.02	0.01	محول التيار $2000/5\text{A}$
-	0.049	قاطع عزل 2000A
0.7	-	5mt باسبار $1 \times 1000 \times 10\text{al}$
-	0.032	8 وصلات مع الباسبار

-	0.5	منصهرة 200 A
0.06	0.18	قاطع حمل 200 A
0.16	0.84	محول تيار 200/5 A
0.07	-	1mt باسبار 1×40× 10 al
-	0.032	5 وصلات مع الباسبار

والمطلوب احسب تيارات العطل لأجل العطلين F_1 و F_2 على شبكة التوتر المنخفض.

الشكل (3-17) شبكة شعاعية للمثال (3-9).

الحل :

نختار توتر الأساس في منطقة العطل.

نمثل الشبكة المغذية بتوتر داخلي (قمك) منسوباً إلى منطقة العطل:

$$\frac{1.05 * 380}{\sqrt{3}} = 230.36 \quad V$$

وممانعة Z_N منسوبة إلى منطقة العطل:

$$Z_N = \frac{1.1 * 6^2}{230} \left(\frac{0.4}{6} \right)^2 * 10^3 = 0.77 \quad m\Omega/Phase$$

نفرض $\frac{R_N}{X_N} = 0.2$ فنجد:

$$R_N = 0.15 \quad m\Omega/phase$$

$$X_N = 0.76 \quad m\Omega/phase$$

المحول:

$$Z_T = \frac{6}{100} * \frac{(0.4)^2}{1} * 10^3 = 9.6 \quad \text{m}\Omega/\text{phase}$$

$$X_T = \frac{P_{\text{Losses}}}{S_T} = \frac{11}{1000} \frac{(0.4)^3}{1} * 10^3 = 1.82 \quad \text{m}\Omega/\text{phase}$$

$$X_T = \sqrt{(9.6)^3 - (1.82)^2} = 9.42 \quad \text{m}\Omega/\text{phase}$$

الممانعات الإضافية :

$$R_{\text{add}} = 1.73 \text{ m}\Omega/\text{phase} \quad ; \quad X_{\text{add}} = 1.33 \text{ m}\Omega/\text{phase}$$

الكابل :

$$R_C = 39.8 \text{ m}\Omega/\text{phase} \quad ; \quad X_C = 11.3 \text{ m}\Omega/\text{phase}$$

$$I''_{F1} = \frac{1.05 * 380}{\sqrt{3} \sqrt{(0.15 + 1.82 + 1.73)^2 + (0.76 + 9.42 + 1.33)^2}} = 19.054 \text{ kA}$$

إذا أهملنا الممانعات الإضافية يصبح تيار العطل 22.22 kA أي أكبر بمقدار 16.6%.
لمسار العطل F_1 نجد :

$$\frac{R_1}{X_1} = \frac{3.62}{11.19} = 0.32$$

ومن المخطط في الشكل (3-16) نجد أن عامل الصدم $C=1.37$ وعليه يكون التيار الصدمي للعطل:

$$I_s(F_1) = 1.37 * \sqrt{2} * 19.054 = 36.92 \text{ kA}$$

العطل F_2 :

$$I''(F_2) = \frac{1.05 * 380}{\sqrt{3} \sqrt{43.5^2 + 22.81^2}} = 4.69 \text{ kA}$$

$$\frac{R_2}{X_2} = \frac{43.42}{22.44} = 1.9 \Rightarrow C = 1$$

$$I_s(F_2) = \sqrt{2} * 4.69 = 6.633 \text{ kA}$$

وبإهمال الممانعات الإضافية نجد أن تيار العطل 4.91 بدلاً من 4.69، أي أكبر بمقدار 4.7% فقط.

مثال (3-10) :

يتم تغذية حمل من الشبكة العامة (سعة القصر 500MVA) عن طريق مركز تحويل $Z_T = 6\%$ ، 1600 kVA يحوي اللوحة T عبر كابلات $3(3 \times 1000 \text{ mm}^2)$ بطول 10m. وعبر لوحة المبنى M المتصلة باللوحة T عن طريق كابلات : $3(3 \times 240 \text{ mm}^2)$ بطول 180. تتصل اللوحة M باللوحة S في المنزل عن طريق كابل $3 \times 25 \text{ mm}^2$ بطول 25m. يبين الشكل (3-18) مخططاً رمزياً للشبكة. والمطلوب ادرس العطل المتوازن الذي يحصل في اللوحات الثلاثة وقدر استطاعة القطع للقواطع الآلية المركبة في اللوحات.

الشكل (3-18) مخطط رمزي للشبكة في المثال (3-10).

الحل :

1- عطل متوازن في مركز التحويل T:

الشبكة المغذية (الشبكة العامة):

$$Z_N = \frac{1.1 - 400^2}{500 \cdot 10^3} = 0.352 \text{ m}\Omega/\text{phase}$$

نفرض $R_N / X_n = 0.1$ ومنه :

$$R_N = 0.035 ; \quad X_N = 0.350 \text{ m}\Omega/\text{phase}$$

المحول :

$$Z_T = \frac{6}{100} \frac{(0.4)^2}{1.6} * 10^3 = 6 \quad \text{m}\Omega/\text{phase}$$

$$R_T = \frac{1.05}{100} \frac{(0.4)^2}{1.6} * 10^3 = 1.05 \quad \text{m}\Omega/\text{phase}$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = 5.407 \quad \text{m}\Omega/\text{phase}$$

$$R_c = \frac{\ell \rho}{A.n} * 10^3 = \frac{10 * \frac{1}{56}}{1000 * 3} * 10^3 = 0.06 \quad \text{m}\Omega/\text{phase}$$

$$X_c = X' \frac{1}{n} = 0.08 * \frac{10}{3} = 0.267 \quad \text{m}\Omega/\text{phase}$$

$$R_{\text{total}} = 1.145 \quad \text{m}\Omega/\text{phase}$$

$$X_{\text{total}} = 6.524 \quad \text{m}\Omega/\text{phase}$$

$$\frac{R_t}{X_t} = \frac{1.145}{6.524} = 0.176$$

$$Z_t = 6.624 \quad \text{m}\Omega/\text{phase}$$

$$I''(F_1) = \frac{1.05 * 400}{\sqrt{3} * 6.624} = 36.61 \quad \text{kA}$$

من المخطط (3-16) نجد $C = 1.58$.

$$\hat{I}_s(F_1) = 1.58 * \sqrt{2} * 36.61 = 81798 \quad \text{kA}$$

إذا فرضنا أن القاطع يفصل بعد 5 دورات يكون تيار الفصل (rms):

$$I(F_1) = 1.1 * 36.61 = 40.27 \quad \text{kA}$$

وبنفس الطريقة نوجد تيار العطل للوحتين M و S فنجد:

$$I''(F_2) = \frac{1.05 * 400}{\sqrt{3} * 12.637} = 19.19 \quad \text{kA}$$

$$I''(F_3) = \frac{1.05 * 400}{\sqrt{3} * 26.985} = 9 \quad \text{kA}$$

ونلخص فيما يلي النتائج :

	F ₁ (T)	F ₂ (M)	F ₃ (S)
R mΩ/phase	1.145	5.609	23.466
X mΩ/phase	6.524	11.324	13.324
R/X	0.176	0.5	1.76
C	1.58	1.2	1.0
Z	6.624	12.637	26.985
I'(F) _{rms} kA	36.61	19.19	9
I _s (F) kA	81.798	32.57	12.73
I(F) _{rms}	40.27	21.12	9.9
kA تيار الفصل			

3-7 استخدام تيارات العطل للتصميم الحراري والديناميكي لمنظومة القدرة الكهربائية:

لتيارات العطل تأثيرات مختلفة على عناصر القدرة الكهربائية، وتلعب هذه التأثيرات دوراً حاسماً في تصميم وإنشاء مركبات المنظومة التي تجري فيها تيارات العطل. وهذا يتطلب معرفة القيم الأعظمية لتيارات العطل المرتقبة التي يتعين على عنصر المنظومة المعني تحملها. ولتحقيق ذلك ينبغي تقويم وضع المنظومة من حيث استطاعة التوليد الأعظمية وحالات الفصل والوصل غير المناسبة والتوسعات المخططة... إلخ. في حالة وجود معدات "تلطف" تيار العطل مركبة قبل العنصر المطلوب اختياره، مثل وشائع خائقة للتيار أو أجهزة فصل ووصل أو منصهرات، في مثل هذا الوضع ينبغي التأكد من تحمل العنصر لمرور التيار في تلك المعدات.

3-7-1 التأثيرات الكهروديناميكية:

تعاين النواقل الحاملة للتيار من إجهادات انعطاف (انحناء) وتعاين نقاط تثبيتها من إجهادات شد وضغط وانعطاف وذلك بسبب القوى الكهروديناميكية التي تنشأ بينها.

فمن المعلوم أنه ينشأ بين ناقلين مستقيمين ومتوازيين يحملان تيارين I_a و I_b القوة F حيث:

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\ell}{D} I_a I_b \quad (3-36)$$

حيث :

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9} \text{ H/cm} = \text{نفوذية الفراغ الحر.}$$

$$\ell = \text{طول الناقل.}$$

$$D = \text{البعد بين الناقلين.}$$

وإذا قدرنا التيار بالأمبير و ℓ و D بوحدة الطول نفسها فنحصل على القوة بـ Kp :

$$F = 2.04 \cdot 10^{-8} I_a I_b \quad (3-37)$$

ويؤثر F على كامل طول الناقل بانتظام، في حالة تيارين بذات الاتجاه تكون القوة تجاذبية وإلا فالقوة تدافعية.

في حالة نظام ثلاثي الطور تحمل نواقله التيارات اللحظية i_a و i_b و i_c تكون القوى متغيرة مع الزمن.

$$f_a = \underbrace{2.04 \cdot 10^{-8} \frac{\ell}{D} \hat{I}^2}_{F_{\max}} \left(3/8 \cos 2\omega t - \frac{\sqrt{3}}{8} \sin \omega t - \frac{3}{8} \right)$$

$$f_b = F_{\max} \left(\frac{3}{4} \cos 2\omega t - \frac{\sqrt{3}}{4} \sin 2\omega t \right) \quad (3-38)$$

$$f_c = F_{\max} \left(\frac{\sqrt{3}}{8} \sin 2\omega t - \frac{3}{8} \cos 2\omega t - \frac{3}{8} \right)$$

وكما يبين الشكل (3-19) يتعرض الناقل في الوسط (b) لأعلى الإجهادات وتكون القوة f_b متناوبة فيما الناقلان الآخران يتعرضان لإجهادات أقل وباتجاه واحد (أي غير متناوب). وتكون القوة العظمى على الناقل b مساوية.

$$F_{b\max} = 0.866F_{\max} \quad (3-39)$$

وكما ذكرنا في فقرة سابقة فإن تيار العطل يتألف عموماً من مركبة متناوبة ومركبة مستمرة حسب النقطة الزمنية للعطل وكلا المركبتين تتخامدان مع الزمن، ولذلك فإن منحنيات الشكل (3-19) ليست صحيحة تماماً وإنما يتناقص مطاها مع الزمن.

الشكل (3-19) المنحني الزمني للقوى المؤثرة على نواقل الأطوار الثلاثة.

ينبغي أن تتحمل عناصر منظومة القدرة الإجهادات الديناميكية الأعظمية الممكنة، وهذا يقتضي اعتماد تيار العطل الصدمي الأعظمي في أسوأ الظروف (مثلاً استطاعة تغذية أعظمية، حدوث العطل عندما يمر التوتر بنقطة الصفر). وعليه نعتمد في الحساب التصميمي العلاقة :

$$F_{\max} = 2.04 \cdot 10^{-8} \hat{I}_s \frac{\ell}{D} \quad (3-40)$$

3-7-2 التأثيرات الحرارية:

تؤدي تيارات القصر إلى تسخين النواقل وعناصر النظام الأخرى وهذا يتعلق بفترة العطل وقيمة تياره والمنحنى الزمني له. وتفقد النواقل نتيجة ارتفاع الحرارة متانتها الميكانيكية كما أن عوازلها تسوء. باعتبار أن العطل يُفصل خلال فترة قصيرة (أقل من 10sec) يُفرض في حساب متانة القصر الحرارية لعناصر النظام أن الحرارة المتولدة في الناقل نتيجة تيار القصر تحتزن فيه وتسهم فقط في ارتفاع درجة حرارته، بمعنى أننا سنهمل انتشار الحرارة إلى المحيط. كما سنفرض أن الحرارة النوعية لمادة الناقل ثابتة وليست متعلقة بدرجة حرارته.

نفرض تياراً مستمراً أو تياراً متناوباً ثابت المطال يجري في ناقل ما فتكون كمية الحرارة المتولدة فيه خلال زمن dt :

$$dQ = I^2 R dt \quad (3-41)$$

وترتفع درجة حرارة الناقل بمقدار $d\theta$ حيث :

$$dQ = MCd\theta \quad (3-42)$$

حيث:

$$M = \text{كتلة الناقل} = LA\gamma$$

$$C = \text{الحرارة النوعية لمادة الناقل.}$$

$$\gamma = \text{كثافة مادة الناقل.}$$

ولكن مقاومة الناقل تزداد مع درجة الحرارة:

$$R = \frac{L}{\chi A} [1 + \alpha(\theta - \theta_0)] \quad (3-43)$$

L = طول الناقل.

A = مقطع الناقل .

α = عامل درجة الحرارة.

θ_0 = الدرجة الابتدائية .

χ = الناقلية النوعية لمادة الناقل.

ومن المعادلة السابقة نجد:

$$d\theta = \frac{I^2}{A^2 C \chi \gamma} [1 + \alpha(\theta - \theta_0)] dt$$

وفي خلال زمن t تصبح درجة الحرارة النهائية للناقل:

$$\theta = \theta_0 + \frac{1}{\alpha} (e^{\frac{I_a^2}{A^2 C \chi \gamma}} - 1) \quad (3-44)$$

ولذلك فإن درجة الحرارة النهائية بعد مرور التيار I لمدة t تتعلق بالتيار ومقطع الناقل ومادة الناقل.

ويبين الجدول التالي بعض الثوابت لمواد مختلفة :

الجدول (3-1) ثوابت بعض المواد المستخدمة في المنظومة الكهربائية.

البرونز	الفولاذ	النحاس	الألمنيوم
---------	---------	--------	-----------

الناقلية $C \text{ S/mm}^2$	35.5	57	8.3	36.4
عوامل درجة الحرارة $\alpha \cdot 10^{-3} / ^\circ\text{C}$	4.0	3.92	4.5	4.0
الكثافة g/cm^3	2.7	8.9	7.7	7.4-8.9
الحرارة النوعية $\text{Kcal/kg}^\circ\text{C}$	0.213	0.093	0.13	0.084

لو وضعنا في المعادلة (3-44) $t = 1 \text{ s}$ (هذا الزمن يستخدم غالباً لحساب المتانة الحرارية لكثير من عناصر النظام) فيمكن لأجل درجة حرارة نهائية معطية حساب كثافة التيار المسموحة لمواد ناقل مختلفة ونرمز لها بـ S_{th} . ويبين الشكل (3-20) S_{th} للنحاس والألمنيوم لدرجات حرارة ابتدائية ونهائية مختلفة.

a b

الشكل (3-20) كثافة التيار

(a) لناقل نحاسي، (b) لناقل ألمنيوم أو ألمنيوم فولاذ.

حتى الآن كنا نفرض تياراً مستمراً أو متناوباً ثابت المطال. غير أن تيارات العطل لا تحقق هذه الشروط إذ إن تيار العطل متغير المطال متخامد إلى I_f . سابقاً كان I_f (تيار العطل للحالة الثابتة) يستخدم للحسابات الحرارية، إلا أنه ثبت أن الحرارة المتولدة أكبر من الحرارة المحسوبة على أساس I_f .
ويستخدم حالياً للحسابات الحرارية تيار I_m يحسب من العلاقة التجريبية :

$$I_m = I_f'' \sqrt{(m+n)t} \quad (3-45)$$

حيث:

I_m = القيمة الفعالة rms لتيار العطل.

m = عامل تأثير المركبة المستمرة.

n = عامل تأثير تخامد المركبة المتناوبة.

t = زمن دوام العطل.

إن الحدود المسموح بها لتحميل عنصر ما في منظومة قدرة كهربائية من الوجهة الحرارية يُعبر عنها بما يلي:

- تيار الثانية I_{1sec} لأجهزة الفتح والإغلاق والمحولات، ومحولات التيار، والوشائع والآلات الكهربائية ويقصد بتيار الثانية القيمة الحدية للتيار الذي يستطيع أن يتحملها العنصر لمدة ثانية واحدة، وتعطى قيمته من قبل الشركة الصانعة ويجب أن يكون أكبر أو يساوي I_m ($I_s \geq I_m$).

- درجة الحرارة الحدية المسموح بها لأجل الكابلات والنواقل والباسبارات.
ويبين الجدول (3-2) درجات الحرارة المسموح بها نتيجة التسخين بواسطة تيارات الأعطال لنواقل مختلفة.

الجدول (3-2) درجات الحرارة الحدية المسموح بها لنواقل مختلفة بسبب تيارات العطل.

نوع الناقل	المادة	θ المسموح بها $^{\circ}\text{C}$
ناقل عار ومدهون	نحاس	200
	ألنيوم	180
أسلاك		
(إجهاد الشد أكبر من 1Kp/mm^2)	Al/st	200
أسلاك	نحاس	170
(إجهاد الشد أقل من 1Kp/mm^2)	ألنيوم	170
	Al/st	160
	فولاذ	200
كوابل		
1 ك. ف معزول بالبلاستيك		180
1 ك. ف معزول بالورق		200
10 ك. ف	ألنيوم	165
20 ك. ف		145
30 ك. ف		130
110 ك. ف		130

3-7-3 تأثيرات القوس الكهربائية :

في حالة العطل ذي القوس تتولد حرارة كبيرة، فعلى سبيل المثال يولد قوس كهربائي بطول 4m لأجل تيار عطل 10 kA استطاعة حرارية تبلغ 10^4Kcal/s . ونظراً لتركز هذه الحرارة على مجال صغير نسبياً، فإنها تؤدي إلى تسخين مكثف للمحيط. وبسبب التسخين المفاجئ للهواء المحيط بالقوس فإن موجة ضغط تظهر

عند قدح القوس. وبالإضافة لذلك يشع القوس حرارة وضوءاً ويؤدي إلى حرق المواد التي ينطلق منها.

بالإضافة إلى هذه التأثيرات الضارة المباشرة، يؤدي القوس العاملين في المحطة بسبب غيمة الغازات أو غبرة المعادن المتولدة والمعدن المنصهر المتبعثر والتوهج المضّر للعين.

من الصعوبة بمكان اتخاذ إجراءات فعالة ضد الضرر الذي يلحق بمكان العطل. ومع ذلك يمكن تخفيف الضرر للعاملين عن طريق بعض طرق إنشاء معدات الفصل والوصل (أغطية حماية خاصة للقوس، بناء خلايا فصل ووصل مغلقة...). وثمة إجراء هام آخر هو انقاص طاقة القوس عن طريق تقصير فترة اشتعاله، ويتم هذا بواسطة فصل العطل بشكل مبكّر. لذلك يجب معايرة الحواكم لتحقيق فصلاً سريعاً للعطل.

وتُعتبر قدرة القوس المتولدة التي تقل عن 500 kWs غير خطيرة. ولكن لا يمكن ضمان هذه القيمة الحدية بواسطة أجهزة الحماية العادية (حواكم حماية وقواطع آلية). لذلك لا بد من استخدام طفايات قوس كهربائي لتحقيق الحماية شبه الكاملة. وتُحذر الإشارة إلى أنه لأجل مستويات التوتر المتوسط يتجه التطور إلى صناعة تجهيزات فصل ووصل معزولة كلياً.

3-8 تطبيقات على الحاسوب:

التطبيق 1: حل المثال (3-5) باستخدام الحاسوب.

الحل:

نستخدم برنامج MATLAB. يبين الشكل (3-21) البرنامج المكتوب في بيئة MATLAB.

ونلخص مخطط سير العمليات على الشكل التالي:

- إدخال Y_{bus} .
- حساب Z_{bus} من العلاقة $Z_{bus} = Y_{bus}^{-1}$.
- تحديد رقم الباس (قضيبة التجميع) الذي حدث عليه العطل.
- تحديد ممانعة العطل.
- إدخال توترات الباسات قبل حصول العطل.
- حساب تيار العطل من المعادلة (3-26).
- حساب توترات الباسات أثناء العطل من المعادلة (3-27).
- حساب تيارات الخطوط (الفروع) من المعادلة (3-29).
- إظهار نتائج الحساب.

ويبين الشكل (3-21b) نتائج الحساب كما أظهرها الحاسوب ونلاحظ تطابقها مع نتائج الحل اليدوي كما في المثالين (3-6) و (3-7).

ملاحظة:

يمكن أن يغير القارئ الباس المعطل وكذلك ممانعة العطل ويقارن النتائج ويصل إلى استنتاجات حول تأثير تغيير مكان العطل وتغيير قيمة ممانعة العطل على التيارات والتوترات في الشبكة الكهربائية المدروسة. وسنبين في تطبيقات لاحقة بعض الاختبارات في هذا الصدد.





الشكل (3-21a)

الشكل (3-21b)

تطبيق 2 :

نفرض حصول العطل على باس (قضيبي تجميع) توليد (مثلاً الباس رقم 2) في الشبكة الكهربائية المدروسة في التطبيق 1 استخدم ذات البرنامج لحساب تيارات وتوترات الأعطال وقارن النتائج المتحصلة مع نتائج التطبيق 1 حيث حصل العطل على باس حمولة (الباس رقم 4).

الحل:

تطبيق البرنامج حسب المعطيات الحالية يعطي النتائج المتضمنة في الشكل (3-22) وبمقارنة هذه الحالة مع حالة العطل السابقة نلاحظ الآتي:

1- تيار العطل أصبح حوالي 6 أضعاف (لماذا؟).

2- انخيار التوتر على قضيب التجميع رقم 2 أدى إلى هبوط التوتر على بقية
الباسات بنسب متفاوتة:

توتر الباس 1 هبط حوالي 70% بينما كان الهبوط حوالي 60%.

توتر الباس 3 هبط حوالي 85% بينما كان الهبوط حوالي 55%.

3- زادت تيارات الفروع زيادة كبيرة جداً إذ زاد تيار الفرع 2-1 مثلاً 30
ضعفاً، وهذا متوقع لأن المولد في 1 يغذي نقطة العطل مباشرة إضافة
إلى المولد 2.

يُطلب من الطالب متابعة المقارنة ومحاولة تعليل ذلك.



الشكل (3-22).

3- مسائل للحل:

3-1) معطيات النظام في الشكل (3-23) هي:

Generator : 25 MVA, 12.4 kV, 10% subtransient reactance.

Motor: 20 MVA, 3.8 kV, 15% subtransient reactance.

Transformer T1 : 25 MVA, 11/33 kV, 8% reactance.

Transformer T2 : 20 MVA, 33/3.3 kV , 10% reactance

يستجر المحرك 15 MW بعامل استطاعة متقدم 0.9 تحت توتر KV 3.1. أوجد التيارات العابرة بسرعة في المولد والمحرك عندما يحدث عطل على بار المولد.

الشكل (3-23) للمسألة 3-1.

3-2) محركان متوافقان مرتبطان بقضيب تجميع شبكة كبيرة عبر خط نقل كما هو

مبين بالشكل (3-24). مواصفات عناصر النظام هي:

المحرك: 1MVA، 440V، المفاعلة العابرة 0.1 بالوحدة .

الخط: 0.05Ω (المفاعلة).

الشبكة الكبيرة: استطاعة قصر بأسبارها 8 MVA، 440 V. يحدث عطل على بار المحركات.

والمطلوب حساب تيار العطل المتناظر المغذي لنقطة العطل، إذا علمت أن توتر بار المحركات ما قبل العطل 400V.

الشكل (3-24) للمسألة 2-3.

3-3) مولد متواقت (500 kVA، 440 V، 0.1 بالوحدة المفاعلة العابرة) يغذي حمولة مسالمة 400 kW وبعامل استطاعة متأخر 0.8 . احسب تيار العطل المتناظر لعطل متوازن على أقطاب المولد.

3-4) وحدة مولد - محول مرتبطة بخط نقل عبر قاطع آلي. المواصفات:
المولد:

$$10 \text{ MVA}, 6.6 \text{ kV}, X_d''=0.1 \text{ pu}, X_d' = 0.2 \text{ pu}, X_d = 0.8 \text{ pu}$$

المحول :

$$10 \text{ MVA}, 6.9/33 \text{ kV} \quad X = 0.08 \text{ pu}$$

كان النظام يعمل بدون حمل وتوتر الخط 20 kV، عندما حصل عطل بعد القاطع مباشرة. والمطلوب حساب:

- تيار العطل العابر بسرعة (فوق العابر) المتناظر المار في القاطع.
- أعظم قيمة للمركبة المستمرة لتيار العطل المارة في القاطع.
- التيار العابر بسرعة (فوق العابر) الإجمالي الاسمي للقاطع.
- التيار الذي يجب على القاطع فصله واستطاعة الفصل.

(e) تيار العطل في الحالة الثابتة.

3-5) النظام في الشكل (3-25) يعطي استطاعة 50 MVA تحت 11 kV بعامل استطاعة متأخر 0.8، إلى باسبار لانهائي. المواصفات هي:
المولد :

$$60 \text{ MVA}, 12 \text{ kV}, X'_d = 0.35 \text{ pu}$$

المحولات (لأحدها) :

$$80 \text{ MVA}, 12/66 \text{ kV}, X = 0.08 \text{ pu}$$

$$X = 12\Omega$$

الخط :

احسب التيار المتناظر الذي يُطلب من القواطع A و B أن تفصله في حالة عطل ثلاثي الطور في النقطة F قرب القاطع.

الشكل (3-25) للمسألة 3-5.

3-6) محطة توليد ذات مولدين تغذي خطاً عبر باسبار (قضيبي جميع) كما هو مبين في الشكل (3-26) .

الشكل (3-26) للمسألة 3-6.

وهناك مصدر تغذية آخر مرتبط بالباسبار عبر محول، ونفرض هذا المصدر لانهائياً. نركب ملفاً خانقاً X بين المحول 2 والباسبار بهدف تحديد limiting استطاعة الفصل للقاطع الآلي المركب في بداية الخط المغذي B، بالقيمة 333 MVA (عطل قريب من القاطع). احسب المفاعلة الحثية للملف الخانق اللازم إذا علمت أن سرعة القاطع 8 دورات .

افترض أن المفاعلات كلها معطاة بالوحدة لتواترات أساس مناسبة اختر استطاعة أساس للنظام 100 MVA.

مواصفات النظام:

	MVA	X
G ₁	25	15%
G ₂	50	20%
T ₁	100	8%
T ₂	40	10%

(7-3) معطي منظومة قدرة (الشكل 3-27) مواصفاتها :

	MVA	X
G ₁	100	0.30
G ₂	60	0.18
T	50	0.10
الملف الخانق	S _B =100	0.2 pu
L ₁ , L ₂		80Ω

قبل حدوث عطل ثلاثي الطور في منتصف الخط 2، كان النظام يعمل على فراغ وتوتر الخط 110 kV.

احسب استطاعة القصر بـ MVA التي يجب أن تُفصل من قبل القاطعين B و A المركبين في نهايتي الخط 2. أعد الحل إذا فرضنا أن الملف الخانق غير موجود. ناقش النتائج.

الشكل (3-27) للمسألة 3-7.

3-8) ليكن نظام ذو ثلاث باسبارات كما هو مبين بالشكل (3-28).

- المولد 1 : $X' = 10\%$ ، 100 MVA
- المولد 2 : يماثل المولد 1.
- المحولان متماثلان ولكل منهما: 100 MVA ، 5%.
- ممانعات الخطوط مسجلة على الشكل ومنسوبة لـ 100 MVA ، 100 kV.
- افترض تواترات العقد ما قبل العطل 1 بالوحدة، والتيارات ما قبل العطل معدومة.

الشكل (3-28) للمسألة 3-8.

بعض أجوبة المسائل:

8.87 KA ; 4.93 KA (1-3

26.96 KA (2-3

6.97 KA (3-3

a) 0.9277 KA (b) 1.312 KA (c) 1.4843 KA (4-3
(d) 1.0205 KA , 53.03 MVA (e) 0.1959 KA

8.319 KA (5-3

2.39 pu (6-3

132.1 ; 47.9 ; 136.9 ; 45.6 MVA (7-3

$I^f = -j8.006$ pu ; $I_{13}^f = -j4.004$ pu (8-3



الفصل الرابع

المركبات المتناظرة

Symmetrical components

1-4 مقدمة :

بحثنا في كتاب نظم القدرة الكهربائية 1 كيفية تمثيل نظام القدرة ثلاثي الطور عندما يعمل في ظروف تشغيل متوازنة. يتميز النظام في هذا الوضع بكون ممانعته متماثلة وتواترته وتياراته الثلاثية الطور تشكل نظاماً متوازنة تماماً في أية نقطة من نظام القدرة. مثل هذا النظام المتوازن يمكن تحليله على أساس طور واحد. إذ أن معرفة التوتر والتيار في أحد الأطوار (وليكن الطور a) كافٍ لتعيين التوترات والتيارات في الطورين الآخرين، وتكون الاستطاعات الفعلية والردية ببساطة ثلاثة أمثال قيمها لطور واحد.

أما إذا عمل نظام القدرة (المتناظر التكوين بالأساس) في ظروف تشغيل غير متوازنة مثل :

-تعرض النظام لعطل بين طور والآخر.

-تعرض النظام لعطل بين طورين.

-تحميل النظام بحمولات غير متوازنة.

في هذه الحالة، ينبغي دراسة النظام على أساس ثلاثة أطوار. ويمكن تبسيط الدراسة باستخدام طريقة المركبات المتناظرة التي تسمح بتحويل نظام التوترات (والتيارات) ثلاثية الأطوار غير المتوازنة إلى ثلاثة أنظمة توترات ندعوها النظام

الصفري، النظام الموافق (الموجب) والنظام المعاكس (السالبي). وكل نظام من هذه الأنظمة هو نظام توترات متوازن.

2-4 تحويل نظم التيارات والتوترات إلى نظام المركبات المتناظرة:

Symmetrical component transformation

على الرغم من أن نظرية المركبات المتناظرة قد نشرت من قبل C.L. Fortescue سنة 1918 فإن استخدامها في الشبكات الكهربائية قد بدأ مع مطلع الخمسينيات. وهذه النظرية قابلة للتطبيق على نظام أشعة ذي n شعاعاً، وفيمايلي سنشرح هذه الطريقة على نظام ثلاثي نظراً لاستخدامه الواسع في الشبكات الكهربائية.

نفرض نظام ثلاثة توترات V_a, V_b, V_c غير متوازنة. يمكن تعريف هذه التواترات كمايلي :

$$\left. \begin{aligned} V_a &= \frac{1}{3}(V_a + V_a + V_a) + \frac{1}{3}(V_b + aV_b + a^2V_b) \\ &\quad + \frac{1}{3}(V_c + aV_c + a^2V_c) \\ V_b &= \frac{1}{3}(V_b + V_b + V_b) + \frac{1}{3}(V_a + aV_a + a^2V_a) \\ &\quad + \frac{1}{3}(V_c + aV_c + a^2V_c) \\ V_c &= \frac{1}{3}(V_c + V_c + V_c) + \frac{1}{3}(V_a + aV_a + a^2V_a) \\ &\quad + \frac{1}{3}(V_b + aV_b + a^2V_b) \end{aligned} \right\} \quad (4-1)$$

ولنتفق على المصطلحات التالية:

$$\left. \begin{aligned} V_{a0} &= \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) & V_{b0} &= V_{a0} & V_{c0} &= V_{b0} = V_{a0} \\ V_{a1} &= \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) & V_{b1} &= a^2V_{a1} & V_{c1} &= aV_{a1} \\ V_{a2} &= \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) & V_{b2} &= V_{a2} & V_{c2} &= a^2V_{a2} \end{aligned} \right\} \quad (4-2)$$

بمقارنة (4-1) و (4-2) نحصل على :

$$\left. \begin{aligned} V_a &= V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \\ V_b &= V_{b0} + V_{b1} + V_{b2} \\ V_c &= V_{c0} + V_{c1} + V_{c2} \end{aligned} \right\} \quad (4-3)$$

تدل المعادلات (3-4) أنه يمكن تحويل الأشعة الأصلية V_a, V_b, V_c إلى تسعة أشعة يمكن ترتيبها في ثلاث مجموعات :

- 1) V_{a0}, V_{b0}, V_{c0}
- 2) V_{a1}, V_{b1}, V_{c1}
- 3) V_{a2}, V_{b2}, V_{c2}

* المجموعة الأولى تتألف من ثلاثة أشعة متساوية بالقيمة المطلقة وفروق الطور بينها تساوي الصفر. نسمي هذه المجموعة النظام الصفري (نظام التتابع الصفري) Zero sequence system وهو نظام متوازن.

* المجموعة الثانية تتألف من ثلاثة أشعة متساوية بالقيمة المطلقة وفروق الطور بينها تساوي 120° وتتابع الأطوار هو a_1, b_1, c_1 (موجب) ونسمي هذه المجموعة النظام

الموجب (نظام التتابع الموجب) Positive sequence system أو الموافق، لأن تتابع أطواره يوافق تتابع أطوار النظام الأصلي (abc) وهو نظام متوازن.

* المجموعة الثالثة تشكل أيضاً نظاماً متوازناً بتتابع أطوار سالب a_2, c_2, b_2 ونسميه النظام السالب أو المعاكس أو نظام التتابع السالب negative sequence system .

ويبين الشكل (4-1) المخططات الشعاعية للأنظمة الثلاثة:

$$\begin{aligned} & \text{النظام الصفري} \quad (V_{a0}, V_{a0}, V_{a0}) \\ & \text{النظام الموافق} \quad (V_{a1}, a^2 V_{a1}, a V_{a1}) \\ & \text{النظام المعاكس} \quad (V_{a2}, a V_{a2}, a^2 V_{a2}) \end{aligned}$$

(نظام التتابع السالب)	(نظام التتابع الموجب)	(نظام التتابع الصفري)
(النظام المعاكس)	(النظام الموافق)	
(النظام السالب)	(النظام الموجب)	(النظام الصفري)

الشكل (4-1) المخططات الشعاعية لأنظمة المركبات المتناظرة.

وتجدر الإشارة إلى أن تحديد ثلاثة مركبات من المركبات التسعة يكفي لتحديد المركبات كلها (المعادلات 4-2). وجرت العادة أن نركز على مركبات الطور a وعليه نستطيع أن نكتب ماتريسيا (أنظر العلاقات 4-2):

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

وباختصار

$$[V_s] = [S][V] \quad (4-5)$$

حيث :

$S =$ ماتريس التحويل

$$S = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

وإذا أجرينا عملية التحويل المعاكس (أو من المعادلة 4-3) فنحصل :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (4-7)$$

وباختصار :

$$[V] = [T][V_s] \quad (4-8)$$

حيث :

$$[T] = [S^{-1}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (4-9)$$

ويرمز لـ T في بعض المراجع بالرمز A كما يرمز لـ S بالرمز A^{-1} ويبين الشكل (4-2) التحصيل التخطيطي للمركبات المتناظرة:



الشكل (4-2): تحصيل المركبات المتناظرة تخطيطياً.

حالات خاصة :

أ- نظام ثلاثي الطور متوازن: (توترات أو تيارات متوازنة)

بتطبيق العلاقة (4-4) نجد :

$$V_{a0} = 0 ; \quad V_{a1} = V_a ; \quad V_{a2} = 0$$

أي أنه يوجد نظام موافق فقط.

ب- نظام ثلاثي الطور : $V_a ; \quad V_b = V_c = 0$

في هذه الحالة تكون المركبات كلها متساوية:

$$V_{a0} = V_{a1} = V_{a2} = V_c = 0$$

ج- ليكن النظام ثلاثي الطور مع ناقل حيادي المبين في الشكل (4-3) والمطلوب:

- إيجاد المركبة الصفريّة للتوترات المركبة V_{ca}, V_{bc}, V_{ab}
- إيجاد العلاقة بين المركبة الصفريّة للتيارات وتيار الناقل الحيادي.

الحل :

مجموع التوترات المركبة V_{ca}, V_{bc}, V_{ab} يساوي الصفر دوماً سواءً كانت التوترات V_c, V_b, V_a متوازنة أم غير متوازنة.

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_a - V_b \\ V_{bc} &= V_b - V_c \\ V_{ca} &= V_c - V_a \\ + \hline V_{ab} + V_{bc} + V_{ca} &= 0 \end{aligned} \quad (4-10)$$

المركبة الصفريّة صفر دوماً $\therefore V_{ab0} = 0$

الشكل (4-3)

$$I_{a0} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) = \frac{1}{3} I_n \quad (4-11)$$

وعليه فالتيار في الناقل الحيادي يساوي ثلاثة أمثال التيار الصفري. أما إذا لم يكن في النظام ناقل عودة حيادي فتكون المركبة الصفرية للتيارات مساوية دوماً للصفر.

- يمكن إيجاد المركبات المتناظرة بالقياس (الشكل (4-4)).

التوتر الصفري للتوترات البسيطة

التيار الصفري

الشكل (4-4): توصيلات قياس المركبات الصفرية للتيار والتوتر /1/.

- أهمية المركبات المتناظرة:

كما بينا سابقاً فإن المركبات المتناظرة ليست تصوراً رياضياً بحتاً، بل إنها حقيقة فيزيائية. فكل نظام من الأنظمة الثلاثة له أهميته في حالات تشغيل معينة:

- * يولد النظام الموافق في المحركات التحريضية العزم الدوار النافع بالاتجاه اليميني.
- * يولد النظام المعاكس عزوم الكبح في المحركات التحريضية وبواسطة النظام المعاكس المحض يمكن الوصول إلى دوران يساري للمحركات التحريضية.
- * للتيارات الصفرية تأثير تحريضي كبير على النواقل المتجاورة، أما التوترات الصفرية فتتقل تواترات سعوية إلى النواقل المتجاورة.

هذا ويقابل كل نظام من الأنظمة المتناظرة ممانعة متناظرة:

فالممانعة الموافقة Z_1 هي وحدها الممانعة الهامة في حالة التشغيل المتوازن. والممانعة المعاكسة Z_2 تساوي Z_1 للخطوط الهوائية والكابلات والمحولات بينما $Z_1 \neq Z_2$ في الآلات الدوارة (لأن اتجاه الدوران هو الحاسم).

أما الممانعة الصفرية Z_0 فيكون لها تأثير عندما يظهر تيار عبر الأرض أو عبر خط صفري خاص وسنرى لاحقاً أن لتوصيلة الملفات ولمعاملة النقطة النجمية في المحولات أثراً هاماً جداً.

3-4 الاستطاعة وفق نظرية المركبات المتناظرة:

سنبرهن فيمايلي أن مجموع استطاعات المركبات المتناظرة الثلاثة يساوي الاستطاعة ثلاثية الطور.

ليكن V_c, V_b, V_a التواتر البسيطة على الأطوار الثلاثة.

I_c, I_b, I_a التيارات في الأطوار الثلاثة.

ووفق نظرية المركبات المتناظرة نكتب للتيارات:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (4-12)$$

$$[I_s] = [S][I] \quad (4-13)$$

$$[I] = [T][I_s] \quad (4-14)$$

الاستطاعة العقدية لنظام ثلاث الطور:

$$S = V_a I_a^+ + V_b I_b^+ + V_c I_c^+ \quad (4-15)$$

وماتريسيا:

$$S = [V_a \ V_b \ V_c] \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}^* = [V][I]^* \quad (4-16)$$

t تعني منقول

+ تعني مرافق

$$S = [T \ V_s]^t [T I_s]^* = V_s^t T^t T^* I_s \quad (4-17)$$

$$T^t T^+ = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \\ = 3 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-18)$$

$$S = 3V_s^t I_s^+ \\ = 3V_{a0} I_{a0}^+ + 3V_{a1} I_{a1}^+ + 3V_{a2} I_{a2}^+ \quad (4-19)$$

أمثلة حول نظرية المركبات المتناظرة:

* مثال (4-1) :

حمولة أومية متوازنة تغذى عن طريق نظام تيارات غير متوازن الشكل (4-5) والمطلوب:

1- احسب I_c

2- أوجد المركبات المتناظرة لتيارات الخطوط

3- أوجد التيارات المارة في كل فرع من فروع الحمولة.

I_{AB} , I_{BC} , I_{CA}

4- أوجد المركبات المتناظرة لتيارات الحمولة.

الشكل (4-5).

الحل :

$$I_A + I_B + I_C = 0 \quad -1$$

$$10\angle 30^\circ + 15\angle -60^\circ + I_C = 0$$

$$\therefore I_C = -16.2 + j8.0 = 18\angle 154^\circ \quad A$$

-2

$$I_{A1} = \frac{1}{3} (10\angle 30^\circ + 15\angle (-60^\circ + 120^\circ) + 18\angle (154^\circ + 240^\circ))$$

$$= 10.35 + j9.3 = 14\angle 42^\circ \quad A$$

$$I_{A2} = \frac{1}{3} (10\angle 30^\circ + 15\angle (-60^\circ + 240^\circ) + 18\angle (154^\circ + 120^\circ))$$

$$= -1.7 - j4.3 = 4.65\angle 248^\circ \quad A$$

$$I_{A0} = \frac{1}{3} (I_A + I_B + I_C) = 0$$

$$I_{B1} = 14 \angle 282^\circ \quad A \quad I_{C1} = 14 \angle 162^\circ \quad A$$

$$I_{B2} = 4.65 \angle 8^\circ \quad A \quad I_{C2} = 4.65 \angle 128^\circ \quad A$$

$$I_{B0} = 0 \quad A \quad I_{C0} = 0 \quad A$$

check

$$I_A = I_{A1} + I_{A2} + I_{A0} = 8.65 + j5 = 10 \angle 30^\circ$$

3- نكافئ مثلث الحمولة بنجمة (الشكل 4-6):

$$V_{AB} = \frac{1}{3} R (I_A - I_B)$$

$$I_{AB} = V_{AB} / R = \frac{1}{3} (I_A - I_B)$$

$$I_{BC} = \frac{1}{3} (I_B - I_C)$$

$$I_{CA} = \frac{1}{3} (I_C - I_A)$$

الشكل (4-6)

$$I_{AB} = \frac{1}{3} (10 \angle 30^\circ - 15 \angle -60^\circ) = 6 \angle 86^\circ \quad A$$

$$I_{BC} = \frac{1}{3} (15 \angle -60^\circ - 18 \angle 154^\circ) = 10.5 \angle -41.5^\circ \quad A$$

$$I_{CA} = \frac{1}{3} (18 \angle 154^\circ - 10 \angle 30^\circ) = 8.3 \angle 173^\circ \quad A$$

-4

$$I_{AB1} = \frac{1}{3} (6 \angle 86^\circ + 10.5 \angle (-41.5^\circ + 120^\circ) + 8.3 \angle (173^\circ + 240^\circ))$$

$$= 8 \angle 72^\circ \quad A$$

$$I_{AB2} = \frac{1}{3} (6 \angle 86^\circ + 10.5 \angle (-41.5^\circ + 240^\circ) + 8.3 \angle (173^\circ + 120^\circ))$$

$$= 2.7 \angle 218^\circ \quad A$$

$$I_{AB0} = 0$$

تعليق : نلاحظ أن :

$$I_{AB1} = \frac{I_{A1}}{\sqrt{3}} \angle 30^\circ$$

$$I_{AB2} = \frac{I_{A2}}{\sqrt{3}} \angle -30^\circ$$

مثال (4-2 غير محلولة) :

حمولة مثلثية أومية 15 ; 20 ; 250 Ohm

مغذاة من منبع ثلاثي الطور متوازن 400V (الشكل 4-7).

أوجد المركبات المتناظرة لتيارات المثلث ثم لتيارات الخطوط.

أ- اعتبر V_{bc} شعاع المرجع.

ب- اعتبر V_{ab} شعاع المرجع.

الشكل (4-7)

الأجوبة :

reference	V_{bc}	V_{ab}
$\underline{I}_{ab0}$	$7.5 \angle 165^\circ$	$7.5 \angle 45^\circ$
$\underline{I}_{ab1}$	$16.1 \angle 120^\circ$	$16.1 \angle 0^\circ$
$\underline{I}_{ab2}$	$7.5 \angle 75^\circ$	$7.5 \angle -45^\circ$
$\underline{I}_{a0}$		0
$\underline{I}_{a1}$		$27.825 \angle -29.889^\circ$
$\underline{I}_{a2}$		$12.99 \angle -15.13^\circ$

4-4 الممانعات المتتالية (الممانعات المتناظرة)

sequence impedances (symmetrical impedances):

حتى الآن درسنا تطبيق نظرية المركبات المتناظرة على التواترات والتيارات والاستطاعات، وسنبحث فيما يلي تطبيقها على نظام ممانعات مؤلف من عناصر مسالمة (الشكل 4-8).

يتألف هذا النظام من ثلاث ممانعات : Z_C, Z_b, Z_a تسري فيها التيارات I_C, I_b, I_a على الترتيب التي تعود عبر الممانعة الأرضية Z_n . التواترات البسيطة على طرفي نظام الممانعات هي : V_C, V_b, V_a و V_C, V_B, V_A إن الدارة في الشكل (4-8) يمكن أن تمثل خطأ هوائياً ثلاثي الطور يربط عقدتين في شبكة كهربائية.

نستطيع أن نكتب جبرياً:

$$\begin{aligned} V_A - V_a &= V_{Aa} , & V_{Aa} &= Z_a I_a + Z_n (I_a + I_b + I_c) \\ V_B - V_b &= V_{Bb} , & V_{Bb} &= Z_b I_b + Z_n (I_a + I_b + I_c) \\ V_C - V_c &= V_{Cc} , & V_{Cc} &= Z_c I_c + Z_n (I_a + I_b + I_c) \end{aligned}$$

الشكل (4-8) ممانعات غير متوازنة.

وبشكل مصفوفات :

$$\begin{bmatrix} V_{Aa} \\ V_{Bb} \\ V_{Cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_b + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_c + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (4-20)$$

أو

$$[V] = [Z][I] \quad (4-21)$$

حيث $[Z]$ = متريس الممانعات الطبيعية.

بتطبيق نظرية المركبات المتناظرة على المعادلة (4-21) نجد :

$$[T][V_s] = [Z][T][I_s]$$

أو

$$[V_s] = [S][Z][T][I_s] = [Z_s][I_s] \quad (4-22)$$

إن العلاقة (4-22) تمثل ما يسمى قانون أوم في نظام المركبات المتناظرة.

$[Z_s]$ = متريس (مصفوفة) الممانعات المتناظرة.

وعليه لحساب $[Z_s]$ لنظام ما ينبغي معرفة ماتريس ممانعاته الطبيعية $[Z]$ ثم نطبق

العلاقة (4-23). فمثلاً لحساب متريس الممانعات المتناظرة للدائرة المبينة في الشكل (4-

8) يتم كمايلي :

$$[Z_s] = [S][Z][T] \quad (4-23)$$

$$Z_s = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_b + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_c + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

$$Z_S = \begin{bmatrix} \frac{1}{3}(Z_a + Z_b + Z_c) + 3Z_n & \frac{1}{3}(Z_a + a^2Z_b + aZ_c) & \frac{1}{3}(Z_a + aZ_b + a^2Z_c) \\ \frac{1}{3}(Z_a + aZ_b + a^2Z_c) & \frac{1}{3}(Z_a + Z_b + Z_c) & \frac{1}{3}(Z_a + a^2Z_b + aZ_c) \\ \frac{1}{3}(Z_a + a^2Z_b + aZ_c) & \frac{1}{3}(Z_a + aZ_b + a^2Z_c) & \frac{1}{3}(Z_a + Z_b + Z_c) \end{bmatrix}$$

$$= Z_{012} \quad (4-25)$$

وبشكل عام يمكن أن نكتب العلاقة (4-22) كمايلي :

$$\begin{bmatrix} V_{Aa0} \\ V_{Aa1} \\ V_{Aa2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (4-25)$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{Z_{012}}$

حيث:

Z_{00} = الممانعة الذاتية الصفرية.

Z_{11} = الممانعة الذاتية الموافقة (أو الموجبة)

Z_{22} = الممانعة الذاتية المعاكسة (أو السالبة)

بقية الممانعات = الممانعات المتبادلة بين الأنظمة المتناظرة

(مثلاً Z_{01} = الممانعة المتبادلة بين النظام الصفري والنظام الموافق).

وعليه فإن متريس الممانعات المتناظرة يشمل ثلاث ممانعات ذاتية وست ممانعات متبادلة.

إن الدليل الشائقي الرقم لعناصر $[Z_S]$ له مدلول إذ أن الرقم الأول يعطي النظام المتناظر لهبوط التوتر والرقم الثاني يعطي النظام المتناظر للتيار الذي سبب هبوط التوتر عبر الممانعة المتناظرة المعينة.

مثلاً : Z_{01}

0 نظام التوتر

1 نظام التيار

بمقارنة (4-24) و (4-25) نجد :

$$\begin{aligned} Z_{11} &= Z_{22} = \frac{1}{3}(Z_a + Z_b + Z_c) \\ Z_{00} &= \frac{1}{3}(Z_a + Z_b + Z_c) + 3Z_n \\ Z_{12} &= Z_{20} = Z_{01} = \frac{1}{3}(Z_a + a^2 Z_b + a Z_c) \\ Z_{10} &= Z_{21} = Z_{02} = \frac{1}{3}(Z_a + a Z_b + a^2 Z_c) \end{aligned} \quad (4-26)$$

- نلاحظ من العلاقة (4-25) أن أية مركبة متناظرة لهبوط التوتر تتولد من جميع المركبات المتناظرة للتيار. مما يدعونا للقول إن دراسة الدارة بمساعدة نظرية المركبات المتناظرة ليست أسهل من دراستها كدارة ثلاثية الأطوار. على أنه لحسن الحظ فإن نظام القدرة الكهربائية يتميز بنظم ممانعات متوازنة أي :

$$Z_a = Z_b = Z_c = Z_L$$

ويصبح عندها متريس الممانعات المتناظرة ماتريسا قطرياً:

$$Z_S = \begin{bmatrix} Z_L + 3Z_n & 0 & 0 \\ 0 & Z_L & 0 \\ 0 & 0 & Z_L \end{bmatrix} \quad (4-27)$$

= Z012

ونكتب عندها العلاقة (4-25) بشكل منشور كمايلي :

$$V_{Aa1} = Z_L I_{a1} = Z_1 I_{a1}$$

$$V_{Aa2} = Z_L I_{a2} = Z_2 I_{a2}$$

$$V_{Aa0} = (Z_L + 3Z_n) I_{a0} = Z_0 I_{a0}$$

حيث :

الممانعة الصفريّة (ممانعة التسلسل الصفري) $Z_0 = Z_1 + 3Z_n$

الممانعة الموافقة (ممانعة التسلسل الموجب) $Z_1 = Z_L$

الممانعة المعاكسة (ممانعة التسلسل السالب) $Z_2 = Z_L$

تشير المعادلات (4-28) إلى استقلالية الأنظمة المتناظرة عن بعضها البعض (فمثلاً هبوط التوتر الصفري ينجم فقط عن التيار الصفري) مما يسهل حساب الأنظمة الثلاثية الطور بشكل محسوس (حساب الأعطال غير المتوازنة).

ويمكن تمثيل المعادلات (4-28) بثلاث دارات مكافئة هي الدارة الصفريّة والدارة الموافقة والدارة المعاكسة:

الدارة الموافقة

الدارة المعاكسة

الدارة الصفريّة

الشكل (4-9).

4-5 حساب توتر النقطة النجمية (توتر نقطة الحياد) Neutral Voltage

4-5-1 مولد يغذي نظام ممانعات:

منبع توتر ثلاثي الطور (E_c, E_b, E_a)

نقطته النجمية مؤرضة عن طريق ممانعة Z_n يغذي نظام ممانعات ذات تأثيرات متبادلة

(مغناطيسية متبادلة) يتألف من الممانعات الذاتية Z_{cc}, Z_{bb}, Z_{aa}

والممانعات المتبادلة Z_{ca}, Z_{bc}, Z_{ab}

حيث $Z_{ac} = Z_{ca}$, $Z_{cb} = Z_{bc}$, $Z_{ba} = Z_{ab}$ (الشكل 4-10)

والمطلوب :

1- حساب التوترات البسيطة (بين طور والأرض) V_c, V_b, V_a في النقاط c,b,a على الترتيب عندما تسري التيارات I_c, I_b, I_a في الأطوار، وكذلك حساب المركبات المتناظرة لهذه التوترات.

2- حساب توتر النقطة النجمية n بالنسبة للأرض (V_n) في حالات التأسيس المختلفة.

3- حل الطلبين السابقين إذا كان المنبع متوازناً ونظام الممانعات متوازناً أيضاً.

الشكل (4-10) مولد يغذي نظام ممانعات ذات تأثيرات متبادلة /1.

1- بتطبيق قانون العقدة (كيرشوف الأول) على n نجد :

$$I_n = I_a + I_b + I_c$$

وبتطبيق قانون الحلقة (كيرشوف الثاني) على كل من الحلقات الثلاثة وبأخذ المغناطيسية المتبادلة بالاعتبار نجد :

$$\begin{aligned} V_a &= E_a - (Z_{aa}I_a + Z_{ab}I_b + Z_{ac}I_c) - Z_n I_n \\ V_b &= E_b - (Z_{bb}I_b + Z_{bc}I_c + Z_{ba}I_a) - Z_n I_n \\ V_c &= E_c - (Z_{cc}I_c + Z_{cb}I_b + Z_{ca}I_a) - Z_n I_n \end{aligned} \quad (4-29)$$

ومتريسيا

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (4-30)$$

أو باختصار :

$$[V] = [E] - [Z][I] - [Z_n][I]$$

وفي نظام المركبات المتناظرة تصبح المعادلة المتريسية السابقة :

$$[V_s] = [E_s] - [Z_s][I] - [Z_{ns}][I] \quad (4-32)$$

حيث :

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix}$$

وعناصره

$$Z_S = \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} = Z_{012}$$

$$Z_{00} = \frac{1}{3}[(Z_{aa} + Z_{bb} + Z_{cc}) + 2(Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ac})]$$

$$Z_{11} = \frac{1}{3}[(Z_{aa} + Z_{bb} + Z_{cc}) - 2(Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ac})]$$

$$Z_{22} = Z_{11}$$

$$Z_{01} = \frac{1}{3}[(Z_{aa} + a^2 Z_{bb} + aZ_{cc}) - (Z_{bc} + aZ_{ab} + a^2 Z_{ac})]$$

$$Z_{02} = \frac{1}{3}[(Z_{aa} + aZ_{bb} + a^2 Z_{cc}) - (Z_{bc} + a^2 Z_{ab} + aZ_{ac})] \quad (4-33)$$

$$Z_{10} = Z_{02}$$

$$Z_{12} = \frac{1}{3}[(Z_{aa} + a^2 Z_{bb} + aZ_{cc}) + 2(Z_{bc} + aZ_{ab} + a^2 Z_{ac})]$$

$$Z_{20} = Z_{01}$$

$$Z_{21} = \frac{1}{3}[(Z_{aa} + aZ_{bb} + a^2 Z_{cc}) + 2(Z_{bc} + a^2 Z_{ab} + aZ_{ac})]$$

$$[Z_{ns}] = [S][Z_n][T] = \begin{bmatrix} 3Z_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4-34)$$

وعليه يمكن كتابة المعادلة (4-32) بالشكل

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{a0} \\ E_{a1} \\ E_{a2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{00} + 3Z_n & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (4-35)$$

(2) بشكل عام:

$$V_n = -I_n Z_n = -3I_{a0} Z_n$$

آ- في حالة التأريض المباشر solid grounding
أي وصل نقطة الحياد n بالأرض بناقل لا ممانعة له (أي $Z_n=0$) نجد:

$$V_n = 0 \quad (4-36)$$

ب- في حالة التأريض بممانعة : impedance grounding

$$V_n = -3I_{a0} Z_n \quad (4-37)$$

ج- في حالة نقطة الحياد المعزولة (لا تأريض) :

تكون $Z_n = \infty$ وبالتالي :

$$V_n = 0. \infty \quad (4-38)$$

ويمكن تعيين توتر النقطة النجمية في هذه الحالة ؛ فقط عندما نعتبر نظام القدرة كدارة مغلقة (توليد + نقل + استهلاك).

3- إذا كان نظام الممانعات متوازناً أي:

$$Z_{aa} = Z_{bb} = Z_{cc} \quad (4-39)$$

$$Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ac}$$

فإن جميع الممانعات المتناظرة المتبادلة تنعدم. وتصبح المعادلة (4-35) بافتراض نظام التوليد متوازناً أيضاً :

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_{a1} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{00} + 3Z_n & 0 & 0 \\ 0 & Z_{11} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (4-40)$$

وباعتبار أن الشرط (4-39) محقق في أنظمة القدرة عن طريق تبديل مواقع أطوار خط النقل power line transposition فإن حل المسألة باستخدام نظرية المركبات المتناظرة أبسط بشكل ملحوظ من حلها كنظام ثلاثي الطور وذلك بسبب كون ماتريس الممانعات المتناظر قطريا.

ويمكن تمثيل المعادلات (4-40) بالدارات الثلاثية في الشكل (4-11) (4-12) (4-

13):

الشكل (4-12) الدارة الصفرية

الشكل (4-11) الدارة الموجبة (الموافقة)

الشكل (4-13) الدارة السالبة (المعاكسة)

الدارات الصفيرية والموافقة والمعاكسة للنظام في الشكل (4-10) حيث توترات التغذية ونظام الممانعات متوازنة .

4-5-2 مولد يغذى حملاً مسالماً عن طريق خط نقل:

نفرض مولداً نقطته النجمية مؤرضة عن طريق ممانعة Z_n^A ، يغذي حملاً $[Z^B]$ نقطة النجمية مؤرضه عن طريق ممانعة Z_n^B . وتتم تغذية الحمل عن طريق خط نقل نظام ممانعاته $[Z^A]$.

المطلوب :

(1) حساب التوترات في النقاط a , b , c وعناصر مصفوفة الممانعات المتناظرة لكامل النظام.

(2) بفرض القوى المحركة الكهربائية للمولد متوازنة احسب توتر نقطة الحياد n^A عندما تكون معزولة عن الأرض بينما n^B مؤرضة بالممانعة Z_n^B وكذلك احسب المركبات المتناظرة لتيارات الأطوار.

الشكل (4-14) مولد يغذي حمولة عن طريق خط نقل.

1) نحسب $[V_S]$ في الموقع a b c مرة من يسار الدارة ومرة من يمينها ونساوي بين النتيجة.

$$[V_S] = [E_S] - [Z_S^A][I_S] - [Z_{ns}^A][I_S] \quad (4-41)$$

$$[V_S] = [Z_s^B][I_S] + [Z_{ns}^B][I_S] \quad (4-42)$$

وبمساواة (4-41) و (4-42) نجد :

$$[E_S] = \underbrace{[Z_S^A] + [Z_{ns}^A] + [Z_s^B] + [Z_{ns}^B]}_{[Z_S]} [I_S] \quad (4-43)$$

$[Z_S]$ = مصفوفة الممانعات المتناظرة للنظام بأكمله، وعناصره:

$$\begin{aligned} Z_{00} &= Z_{00}^A + 3Z_n^A + Z_{00}^B + 3Z_n^B \\ Z_{11} &= Z_{11}^A + Z_{11}^B & Z_{12} &= Z_{12}^A + Z_{12}^B \\ Z_{22} &= Z_{22}^A + Z_{22}^B & Z_{20} &= Z_{20}^A + Z_{20}^B \\ Z_{01} &= Z_{01}^A + Z_{01}^B & Z_{21} &= Z_{21}^A + Z_{21}^B \\ Z_{02} &= Z_{02}^A + Z_{02}^B \\ Z_{10} &= Z_{10}^A + Z_{10}^B \end{aligned}$$

2- نكتب المعادلة (4-43) بشكل منشور مع الأخذ بالاعتبار التوترات المتوازية للمولد:

$$E_{a1} = \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{20} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (4-44)$$

وباعتبار n^A معزولة عن الأرض فيكون :

$$Z_n^A = \infty \rightarrow Z_{00} \approx 3Z_n^A$$

$$I_{a0} = 0$$

$$V_n^A = -3I_{a0}Z_n^A = -Z_{00}I_{a0}$$

وعليه بنشر (4-44) وملاحظة (4-45) نجد :

$$\left. \begin{aligned} 0 &= -V_n^A + I_{a1}Z_{01} + I_{a2}Z_{02} \\ E_{a1} &= I_{a1}Z_{11} + I_{a2}Z_{12} \\ 0 &= I_{a1}Z_{21} + I_{a2}Z_{22} \end{aligned} \right\} \quad (4-46)$$

العلاقات (4-46) هي معادلات بثلاثة مجاهيل حلها يعطي :

$$\left. \begin{aligned} I_{a1} &= E_{a1} \frac{Z_{22}}{Z_{11}Z_{22} - Z_{12}Z_{21}} \\ I_{a2} &= -I_{a1} \frac{Z_{21}}{Z_{22}} \\ V_n^A &= E_{a1} \frac{Z_{01}Z_{22} - Z_{02}Z_{21}}{Z_{11}Z_{22} - Z_{12}Z_{21}} \end{aligned} \right\} \quad (4-47)$$

مثال (4-3) :

منبع متوازن ($E_a=200V$) نقطته النجمية مؤرضة مباشرة، يغذي حمولة نجمية نقطتها النجمية معزولة. والمطلوب إيجاد تيارات الأطوار وتوتر النقطة النجمية للحمولة باستخدام طريقة المركبات المتناظرة.

الشكل (4-15)

الأجوبة :

$$I_a = 16.6 + j 1.335 \text{ A}$$

$$I_b = -9.24 - j 10.66 \text{ A}$$

$$I_c = -6.93 + j 9.32 \text{ A}$$

$$V_N^B = 40.75 \text{ V}$$

نكتب المعادلة العامة للنظام :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ E_{a1} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}$$

وبحل هذه المعادلة الماتريسية (باعتبار $V_n^B \approx Z_{00} I_{a0}$) نجد :

$$V_n^B = -E_{a1} \frac{Z_{01}Z_{22} - Z_{02}Z_{21}}{Z_{11}Z_{22} - Z_{12}Z_{21}}$$

$$Z_{11} = Z_{22} = \frac{1}{3}(10+15+20) = 15 \text{ ohm}$$

$$Z_{01} = Z_{12} = Z_{20} = \frac{1}{3}(10 + 15\angle 240^\circ + 20\angle 120^\circ)$$

$$= -2.5 + j4.33 = 2.887\angle 150^\circ$$

$$Z_{21} = Z_{02} = \frac{1}{3}(10 + 15\angle 120^\circ + 20\angle 240^\circ)$$

$$= -2.5 - j1.443 = 2.887\angle -150^\circ \text{ ohm}$$

$$V_n^A = -200 \frac{43.305\angle 150^\circ - 8.335\angle 60^\circ}{225 - 8.335}$$

$$= -40.707\angle 160^\circ = 40.707\angle -20^\circ$$

$$I_{a1} = E_{a1} \frac{Z_{22}}{Z_{11}Z_{22} - Z_{12}Z_{21}}$$

$$= 200 \frac{15}{216.665} = 13.846 \text{ A}$$

$$I_{a2} = -I_{a1} \frac{Z_{21}}{Z_{22}} = -13.846 \frac{2.887\angle 150^\circ}{15}$$

$$= -2.665\angle -150^\circ = 2.665\angle 30^\circ$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 13.846 \\ 2.665\angle 30^\circ \end{bmatrix}$$

$$\dots\dots\dots I_a = 16.154 + j1.3325 \text{ A}$$

$$I_b = -9.231 + j10.66 \text{ A}$$

$$I_c = -6.9 + j9.326 \text{ A}$$

6-4 الممانعات التتابعية للآلات التزامنية:

ويقصد بها الممانعات التي تبديها الآلة للمركبات الموجبة والسالبة والصفرية لتيار الثابت.

إن الفيض المغناطيسي الذي يسببه التيار الموجب (I_{a1}) يدور بالسرعة التزامنية وبنفس اتجاه الدوار؛ أي أن هذا الفيض ثابت بالنسبة لدارات الدوار. وعليه فالآلة تبدي الممانعة الموافقة Z_1 التالية:

$$(4-48) \quad Z_1 = jX_d'' \quad (\text{إذا كانت الدورة الأولى موضع الاهتمام})$$

$$(4-49) \quad = jX_d' \quad (\text{إذا كانت 3-4 دورات موضع الاهتمام})$$

$$(4-50) \quad = jX_d \quad (\text{إذا كانت الحالة الثابتة موضع الاهتمام})$$

وهكذا فُتُستَخدم المعادلتان (4-48) و (4-49) لحساب تيار العطل ويمكن استخدام المعادلة (4-50) عدد دراسة الأحمال غير المتوازنة للآلة والأحمال المتوازنة طبعاً). أما الفيض الذي يحدثه التيار المعاكس (I_{a2}) فهو يدور أيضاً بالسرعة السنكرونية ولكن بعكس اتجاه الدوار، أي أن هذا الفيض يدور بضعف السرعة السنكرونية بالنسبة للدوار، فيحرض تيارات ذات تردد 100 هرتز في ملفات الدوار. وعليه يكون تأثير الفيض الذي تولده هذه التيارات أقوى قليلاً وبالتالي تكون X_2 أكبر بقليل من X :

$$(4-51) \quad Z_2 = j \frac{X_q'' + X_d''}{2} \quad \text{بوجود ملفات أحماد}$$

$$(4-52) \quad = j \frac{X_q' + X_d'}{2} \quad \text{بدون ملفات أحماد}$$

وتُستخدم Z_2 لجميع حالات التشغيل الثابتة والديناميكية.

المفاعلة الصفرية للآلة:

غالباً ما ترتبط المولدات بالشبكة عن طريق محولات توصيلتها من جهة المولد، وعليه فإن التيار الصفري لا يمكنه الانتقال من جهة الشبكة. وحتى لو ظهر نظام صفري في جهة المولد فإن التيار الصفري سيكون مهماً لأن النقطة النجمية للمولدة تكون عادة مؤرضة بمقاومة عالية. وعلى أي حال فإذا لزمّت المفاعلة الصفريّة للمولدة فيمكن اعتبار القيم التالية لها:

$$Z_0 = j(0.01.....0.1) \quad \text{عنفية} \quad (4-53)$$

$$= j(0.03.....0.15) \quad \text{مائية} \quad (4-54)$$

ونلاحظ أنّها أصغر من المفاعلة العابرة بسرعة (فوق العابرة) لأن التيار الصفري لا يولد أي فيض على اعتبار أن التيارات الصفريّة I_{co} ، I_{bo} ، I_{ao} تشكل 120° فراغية بينها (مع أنّها كهربائياً بذات الطور). وعليه فالمنوبة تبدي مفاعلة تشتت فقط للتيارات الصفريّة.

ملاحظة:

إن نسبة التيار المعاكس I_2 إلى التيار الاسمي لها أهمية بالغة عندما تُحمل المنوبة بحمولة غير متوازنة، إذ أن التيار المعاكس يُولد في ملفات الإخماد وفي أوجه الأقطاب تيارات إضافية تسبب انتشار حرارة في الآلة. لذا تُجهز المولدات الحديثة بحماية خاصة ضد ارتفاع المركبة المعاكسة لتيار الثابت، ويسمح عادة بتيار معاكس مساوٍ للتيار الاسمي لبضع ثوان، أما بشكل دائم فلا يسمح لتيار معاكس بأكثر من 12.5% من التيار الاسمي في المولدات العنفيه، وبأكثر من 20% في المولدات ذات الأقطاب البارزة.

4-7 الممانعات والدارات التابعة للمحولات :

4-7-1 الممانعات الموافقة والمعاكسة:

الدائرة المكافئة الموافقة لمحول هي الدائرة المكافئة له عندما يطبق على دخله
نظام توترات موافق.

الشكل (4-16)

نظام توترات موافق ونظام توترات معاكس

والدائرة المكافئة المعاكسة للمحول هي الدائرة المكافئة له عندما يطبق على دخله نظام
توترات معاكس.

إن الممانعة الموافقة (ممانعة التتابع الموجب) لمحول تساوي ممانعة التسريب له. ونظراً لأن
المحول جهاز غير دوار فإن ممانعة التشتت لا تتغير بتغير تتابع الأطوار لنظام التوترات
المتوازنة المطبق عليه. وعليه فالممانعة المعاكسة (ممانعة التتابع السالب) تساوي أيضاً
ممانعة التشتت.

وعليه :

$$Z_1 = Z_2 = Z_{\text{leakage}} \quad (4-55)$$

ومن هنا فالدارات المكافئة للمحولات تصلح للنظام التتابعي الموجب والنظام التتابعي السالب.

4-7-2 تأثير نوع النظام المتناظر على تغير زاوية الطور في المحولات Y/Δ

Phase shift dependency on sequence type:

على الرغم من أن المحول ثلاثي الطور يبدي الممانعة ذاتها للنظام الموافق والنظام المعاكس مهما كانت مجموعة توصيله، فإنه (أي المحول) يؤثر بشكل مختلف على زاوية طور التيارات والتوترات.

لأجل النظام المعاكس تصح القاعدة التالية :

عندما يُغذى المحول بنظام توترات معاكس فإن كميات جهة التوتر العالي تكون متأخرة بالطور عن كميات جهة التوتر المنخفض بمقدار $K.30$ ، والأمر نفسه ينسحب على التيارات. أما لأجل النظام الموافق فيحصل تقدم بالطور بدلاً من التأخر بالطور.

*** مثال (4-4) :**

يتم توصيل ثلاث مقاومات متماثلة بشكل نجمي لتشكيل حمولة قيمتها الاسمية (100 KVA : 400 V). تُغذى هذه الحمولة من محول قيمة الاسمية Dy_3 (11/0.4 kV : 100 KVA).

كما هو مبين في الشكل (4-17). تواترات الدخل في جهة المثلث غير متوازنة وقيمها :

$$V_{AB} = 10 \text{ kV} ; V_{BC} = 11 \text{ kV} ; V_{CA} = 11.5 \text{ kV}$$

والمطلوب : حل الطلبات التالية بالقيم الواحدية:

- 1- اكتب تواترات الدخل الطبيعية عقدياً.
 - 2- أوجد المركبات المتناظرة لتواترات الدخل المركبة والبسيطة والمركبات المتناظرة لتواترات الخرج (على أقطاب الملف النجمي) البسيطة والمركبة .
 - 3 - احسب تواترات الخرج الطبيعية.
 - 4- أوجد المركبات المتناظرة للتيارات المستجرة من المنبع وتلك المستجرة من قبل الحمولة.
 - 5- احسب التيارات المتناظرة في أضلاع المثلث.
- افرض ممانعة المحولة مهملة، والنقطة النجمية للمحول معزولة عن الحمولة.

الشكل (4-17) محول Dy_3 للمثال (4-4).

* الحل :

نختار استطاعة أساس 100 MVA

توترات أساس 11 ; 0.4 .kV

∴ الحمولة تساوي 1 pu

1- توترات الدخل عقدياً:

نفرض زاوية V_{BC} هي 180° وباستخدام قانون التجب $\cosinelaw$ نجد :

$$V_{AB} = 0.909 \angle -66.2^\circ \text{ pu}$$

$$V_{BC} = 1.0 \angle 180^\circ \text{ pu}$$

شكل

$$V_{CA} = 1.045 \angle 52.8^\circ \text{ pu}$$

2- المركبات المتناظرة لتوترات الدخل والخرج البسيطة والمركبة:

بتطبيق قواعد التحويل نجد :

$$V_{AB1} = 0.424 - j0.884 = 0.982 \angle -64.45^\circ$$

$$V_{AB2} = -0.0567 + j0.0551 = 0.079 \angle 135.8^\circ$$

$$V_{AB0} = 0 \text{ up}$$

ومن الشكل (4-18) نجد :

الشكل (4-18) النظام الموافق (مخطط شعاعي نسبي)

$$V_{A1} = V_{AB1} / \sqrt{3} \angle -30^\circ = (0.982/\sqrt{3}) \angle -94.45^\circ \text{ pu}$$

$$V_{a1} = V_{A1} \angle -90^\circ = (0.982/\sqrt{3}) \angle -184.45^\circ \text{ pu}$$

$$V_{ab1} = V_{AB1} \angle -90^\circ = 0.982 \angle -154.8^\circ \text{ pu}$$

وذلك لأن الدارة المكافئة الموافقة هي بالقيم الواحدة (الشكل 4-19) :

الشكل (4-19) الدارة المكافئة الموافقة للمثال (4-4).

ومن الشكل (4-20) نجد :

الشكل (4-20) النظام المعاكس (مخطط شعاعي نسبي).

$$V_{A2} = \frac{V_{AB2}}{\sqrt{3}} \angle 30^\circ = \frac{0.079}{\sqrt{3}} \angle 165.8^\circ \quad \text{pu}$$

$$V_{a2} = V_{A2} \angle 90^\circ = \frac{0.079}{\sqrt{3}} \angle 255.8^\circ \quad \text{pu}$$

$$V_{ab2} = V_{AB2} \angle 90^\circ = 0.079 \angle 225.8^\circ \quad \text{pu}$$

$$V_{ab0} = 0$$

3- تواترات الخرج الطبيعية :

من علاقات التحويل نجد :

$$V_{ab} = V_{ab1} + V_{ab2} = 1.056 \angle -153^\circ \quad \text{pu}$$

$$V_{bc} = a^2 V_{ab1} + a V_{ab2} = 0.972 \angle 81^\circ \quad \text{pu}$$

$$V_{ca} = a V_{ab1} + a^2 V_{ab2} = 0.923 \angle -31.31^\circ \quad \text{pu}$$

4- التيارات :

الممانعة الموافقة للحمولة تساوي الممانعة المعاكسة وتساوي :

$$\frac{1}{3} (1 + 1 + 1) = 1 \quad \text{pu}$$

ومن الشكل (419) نجد :

$$I_{a1} = \frac{V_{a1}}{1 \angle 0^\circ} = \frac{0.982}{\sqrt{3}} \angle -184.45^\circ \quad \text{pu}$$

$$I_{a2} = \frac{V_{a2}}{1 \angle 0^\circ} = \frac{0.079}{\sqrt{3}} \angle 255.8^\circ \text{ pu}$$

(نقاط النجم معزولة) $I_{a0} = 0$

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} = \frac{0.998}{\sqrt{3}} \angle -179.97^\circ \text{ pu}$$

$$I_{A1} = I_{a1} \angle 90^\circ \text{ pu}$$

$$I_{A2} = I_{a2} \angle -90^\circ \text{ pu}$$

$$I_{A0} = 0$$

5- تيارات المثلث :

من المخططات الشعاعية :

$$I_{AB1} = \frac{I_{A1}}{\sqrt{3}} \angle -150^\circ$$

$$I_{AB2} = \frac{I_{A2}}{\sqrt{3}} \angle 150^\circ$$

4-7-3 الدارة المكافئة الصفرية :

الدارة المكافئة الصفرية هي الدارة المكافئة للمحول عندما يُغذى بنظام توترات صفري (أو تيارات صفرية).

الممانعة الصفرية Z_0 للمحول يمكن أن تأخذ إحدى قيمتين :

-قيمة محدودة تساوي تقريباً الممانعة التتابعية الموجبة (أو السالبة) طبعاً للمحول

$$Z_0 = Z_1 = Z_2 = Z_{ps}$$

-قيمة لا نهائية $Z_0 = \infty$

وهذا يعتمد على ثلاثة عوامل :

-مجموعة توصيل المحول $\Delta/Y; Y/Y$

-تأريض نقاط النجم أو عدمه Star point

-نوع الدارة المغناطيسية للمحول (ثلاثية النواة أو خماسية النواة).

ويبين الشكل (4-21) الدارة المكافئة العامة لمحور ثنائي الملفات حيث Z_{ps} (pu) هي الممانعة التسلسلية الموجبة للطور للملفين الأولي والثانوي، Z_{oln} (pu) هي الممانعة الصفريّة التفرعية التي تجرى عبرها تيارات ضياعات النواة والتمغط وتعتمد قيمة Z_{om} على بناء النواة:

لأجل النواة خماسية الجذوع أو المحول المؤلف من وحدات أحادية الطور تكون $Z_{om} = \infty$ (كبيرة جداً) كما هو الحال بالنسبة لـ Z_m .

أما للنواة ثلاثية الجذوع فتكون: $Z_{om} = 4 \dots 5 Z_{ps}$ وتحتوي الدارة المكافئة على أربعة قواطع: قاطع تسلسلي وقاطع تفرعي لكل جهة من المحول.

القواطع التسلسلي المغلق يعني أن نقطة النجم مؤرضة والقواطع التفرعي المغلق يعني أن الملفات موصلة على شكل دلتا Δ .

الشكل (4-21)

الدارة المكافئة الصفريّة العامة لمحور ثنائي الملفات بالقيم الواحدية

وقبل استنتاج الدارات المكافئة الصفرية لأنواع مختلفة من توصيلات المحولات نذكر الملاحظات التالية:

1- إذا أهملنا تيار التمغنط، فإن أولي المحول يحمل تياراً إذا كان هناك تيار يجري في ثانوي المحول (عام) .

2- يمكن أن تسرى تيارات صفرية في فروع التوصيلة النجمية إذا كانت النقطة النجمية مؤرضة، حيث يتوفر عندها مسار عودة للتيارات الصفرية (الشكل 4-22).

نجمة غير مؤرضة

نجمة مؤرضة

الشكل (4-22) جريان التيارات الصفرية في توصيلة نجمية.

3- لا يمكن أن تجرى تيارات صفيرية في الخطوط الواصلة إلى توصيلة مثلثية لأنه لا يوجد مسار عودة لهذه التيارات . أما في أضلاع المثلث فيمكن أن تجرى تيارات صفيرية (تدور في المثلث) متولدة من التوترات الصفيرية في التوصيلة المثلثية. وعليه فمثل هذه التوصيلة تشكل دائرة قصيرة للتيار الصفيري (الشكل 4-23):

الشكل (4-23) جريان التيارات الصفيرية في توصيلة مثلثية.

4- إذا كانت النقطة النجمية مؤرضة عن طريق ممانعة Z_n فتضاف إلى الدارة المكافئة ممانعة تسلسلية مقدارها $3Z_n$ وذلك لأن ممانعة التأريض Z_n تمرر $3I_{a0}$. ونلخص فيمايلي الدارات المكافئة لبعض مجموعات التوصيل (الشكل 4-24):



الشكل (4-24) الدارات الصفرية لمحولات ثنائية الملفات بالقيم الواحدة.

وتصلح الأفكار السابقة لرسم الدارات الصفرية للمحول ثلاثي الملفات
حيث الممانعات التسلسلية الصفرية تساوي تلك للنظام الموافق أو المعاكس.
أمثلة على ذلك يبينها الشكل (4-25):

الشكل (4-25)

* مثال (4-5) :

في الشبكة السورية يستخدم المحول ثلاثي الطور ثلاثي الملفات ذو المواصفات التالية:

$$\begin{array}{c} 230 / 66 / 15 \text{ kV} \\ p / s / t \\ 70 / 70 / 20 \text{ MVA} \end{array}$$

قيست ممانعته المتشابهة لأجل الوضع الاسمي لمبدل المآخذ rated position of tap changer فكانت :

$$Z_{ps} = 13 \% ; Z_{pt} = 19.6 \% ; Z_{st} = 4.9 \%$$

منسوبة للاستطاعة 70 MVA

أهمل جميع المقاومات .

والمطلوب :

1- احسب Z_t, Z_s, Z_p بالوحدة منسوبة للاستطاعة 70 MVA.

2- نفرض المحول ثلاثي النواة مجموعة توصيله $Y / Y/\Delta$ احسب وارسم الدارة الصفرية له.

الحل :

1- طالما أن الممانعات المتشابهة معطية بالوحدة منسوبة للاستطاعة 70 MVA ذاتها فيمكن تطبيق المعادلات مباشرة:

$$\begin{aligned} Z_p &= 0.5 \times j(13 + 19.6 - 4.9) \times \frac{1}{100} \\ &= j0.1385 \text{ pu} \dots X_p = 13.85\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Z_s &= 0.5 \times j(13 + 4.9 - 19.6) \times \frac{1}{100} \\
&= -j0.0085 \text{ pu} \dots X_s = -0.85\% \\
Z_t &= 0.5 \times j(19.6 + 4.9 - 13) \times \frac{1}{100} \\
&= j0.057 \text{ pu} \dots X_t = 5.7\%
\end{aligned}$$

2- الدارة الصفريّة مبينة في الشكل (4-26) :

الشكل (4-26) الدارة الصفريّة للمثال (5-4) .

$$\begin{aligned}
Z_{om} &= 4 \dots 5 Z_{ps} \text{ or } Z_{pt} \\
&= j4.13\% = j52\%
\end{aligned}$$

إذا كان المحول خماسي النواة أو مؤلفاً من 3 وحدات أحادية الطور: $Z_{om} = \infty$

8-4 الممانعات التتابعية (المتناظرة) لخطوط النقل :

نظراً لكون الخط ثلاثي الطور المبدل transposed بشكل كامل متناظراً فإن الممانعة الطورية التي يبدئها غير متعلقة بتتابع الأطوار لنظام تيارات متوازن. وبعبارة

أخرى، تكون الممانعات التي يبدونها خط النقل لتيارات التتابع الموجب أو السالب متساوية، أي : $Z_1 = Z_2$.
عندما تسري تيارات صفيرية فقط في خط النقل، تكون هذه متساوية في الأطوار الثلاثة قيمةً وزاويةً طور. يعود جزء من هذه التيارات عبر الأرض، والجزء المتبقي يعود عبر النواقل الأرضية. إن جريان التيارات الصفيرية عبر أطوار خط النقل والنواقل الأرضية والأرض يخلق حقلاً مغناطيسياً مختلفاً عن الحقل الذي ينجم عن مرور تيارات التتابع الموجب أو السالب التي تملك فرق طور 120° وتيار عائد يساوي الصفر (طبعاً لأنها تشكل نظاماً متوازناً). وتصدر الإشارة إلى أن الممانعة التتابعية الصفيرية تتضمن ممانعة الأرض ($Z_0 = Z_{10} + 3Z_{g0}$). وعادة تكون الممانعة الصفيرية لخطوط النقل أكبر من الممانعة التتابعية الموجبة أو السالبة وتتراوح من 2 إلى 3.5 مرة ممانعة التتابع الموجب.

4-9 تشكيل الدارات التتابعية لنظام القدرة الكهربائية:

قمنا في الفقرات السابقة بإيجاد الممانعات والدارات التتابعية لعناصر نظام القدرة – الآلات التزامنية والمحولات والخطوط، ويمكن بسهولة استخدامها لبناء الدارات التتابعية لنظام القدرة بأكمله. ونلخص فيمايلي قواعد الإنشاء:
- تشكيل الدارة التتابعية الموجبة بمساعدة مخطط الخط الواحد لنظام القدرة ويجب الانتباه إلى أن توترات التتابع الموجب موجودة فقط في الآلات التزامنية (مولدات ومحركات).
- يتم تشكيل الدارة التتابعية السالبة انطلاقاً من الدارة الموجبة مع ملاحظة أن الاختلاف الوحيد بينهما هو دارة الآلة التزامنية التي تمثل فقط بالممانعة التتابعية السالبة نظراً لأن توتر التتابع السالب لها يساوي الصفر.

- حيادي النظام System neutral هو الباس (قضيبي التجميع) المرجعي لدارات التتابع الموجب والسالب.
 - لا تتضمن دارات التتابع الموجب أو السالب أية ممانعة قد تكون موجودة بين الحيادي والأرض نظراً لأن تيارات التتابع الموجب أو السالب (المتوازنة طبعاً) لا تسري في مثل هذه الممانعة.
 - يتم تشكيل دائرة التتابع الصفري بوصل الدارات الصفريّة لعناصر النظام مع بعضها البعض.
 - لا توجد منابع توتر في دائرة التتابع الصفري.
 - في حال وجود ممانعة مربوطة إلى حيادي المولد أو المحول، تدخل هذه بثلاثة أضعاف قيمتها في دائرة التتابع الصفري للنظام.
 - يجب الانتباه بعناية إلى دائرة التتابع الصفري للمحول التي عولجت في فقرة سابقة من هذا الفصل.
- وسنوضح عملية إنشاء الدارات التتابعية من خلال الأمثلة التالية:

* مثال (4-6) :

مولد ثلاثي الطور :

$$11 \text{ KV} ; 25 \text{ MVA} ; X_0 = 6\% ; X'' = 20\% ; X_n = 2.5 \Omega$$

يُغذي محركين عبر خط نقل ومحولات كما هو مبين في الشكل (4-27) القيم الاسمية لدخل المحركات:

$$M_1 : 15 \text{ MVA} ; 10 \text{ kV} ; X_0 = 6\% ; X'' = 25\% ;$$

$$M_2 : 7.5 \text{ MVA} ; 10 \text{ kV} ; X_0 = 6\% ; X'' = 25\% ; X_n = 2.5 \text{ ohm}$$

القيم الاسمية لكل محول :

$$30 \text{ MVA} ; 10.8 / 121 \text{ kV} ; X=10\%$$

القيم العائدة لخط النقل :

مفاعلة التسلسل

$$X = 100 \text{ ohm}$$

$$X_0 = 300 \text{ ohm}$$

افرض أن المفاعلة المعاكسة للآلات (مولد+محرك) تساوي مفاعلتها العابرة بسرعة.

اهمل المقاومات. اختر القيم الاسمية للمولد كقيم أساس في دائرة المولد.

المطلوب:

احسب وارسم الدارات الموجبة والسالبة والصفيرية للنظام بالقيم الواحدية.

الشكل (4-27) النظام للمقال (6-4) .

*** الحل :**

نختار استطاعة أساس 25 MVA

توتر أساس في دائرة المولد 11 KV

$$11 \cdot \frac{121}{10.8} = 123.2 \text{ KV} \quad \text{توتر الأساس لخط النقل :}$$

$$123.2 \cdot \frac{10.8}{121} = 11 \text{ kV} \quad \text{توتر الأساس لدائرة المحركات :}$$

نحسب محددات عناصر النظام وفق الأسس الجديدة:

- المفاعلات الموافقة والمعاكسة:

$$\text{المحول Transformer reactance} = 0.1 \times \frac{25}{30} \times \left(\frac{10.8}{11} \right)^2 = 0.0805 \text{ pu}$$

$$\text{خط النقل Line reactance} = \frac{100 \times 25}{(123.2)^2} = 0.164 \text{ pu}$$

$$\text{المحرك 1 Reactance of motor 1} = 0.25 \times \frac{25}{15} \times \left(\frac{10}{11} \right)^2 = 0.345 \text{ pu}$$

$$\text{المحرك 2 Reactance of motor 2} = 0.25 \times \frac{25}{7.5} \times \left(\frac{10}{11} \right)^2 = 0.69 \text{ pu}$$

- المفاعلات الصفريّة :

$$\text{المحول Transformer zero sequence reactance} = 0.0805 \text{ pu}$$

$$\text{المولد Generator zero sequence reactances} = 0.06 \text{ pu}$$

$$\text{المحرك 1 Zero sequence reactance of motor 1} = 0.06 \times \frac{25}{15} \times \left(\frac{10}{11} \right)^2 = 0.082 \text{ pu}$$

$$\text{المحرك 2 Zero sequence reactance of motor 2} = 0.06 \times \frac{25}{7.5} \times \left(\frac{10}{11} \right)^2 = 0.164 \text{ pu}$$

$$\text{مفاعلة التآريض Reactance of current limiting reactors} = \frac{2.5 \times 25}{(11)^2} = 0.516 \text{ pu}$$

$$\text{مفاعله التآريض} = 3 \times 0.516 = 1.548 \text{ pu}$$

$$\text{خط النقل Zero sequence reactance of transmission line} = \frac{300 \times 25}{(123.2)^2} = 0.494 \text{ pu}$$

وتبين الأشكال التالية الدارات التتابعية المطلوبة:

الشكل (4-28) الدارة الموجبة للمثال (4-6)

الشكل (4-29) الدارة السالبة للمثال (4-6)

الشكل (4-30) الدارة الصفيرية للمثال (4-6)

10-4 تطبيقات باستخدام الحاسوب :

تطبيق 1 :

احسب المركبات المتناظرة لنظام تيارات غير متوازن :

$$I_{abc} = \begin{bmatrix} 10\angle 30^\circ \\ 15\angle -60^\circ \\ 18\angle 154^\circ \end{bmatrix}$$

باستخدام الحاسوب :

الحل :

يمكن للطالب أن يكتب برنامج حاسوب بلغة برمجة حسب رغبته أو باستخدام برامج جاهزة.

سنحل المسألة باستخدام البرنامج MATLAB وق المخطط التالي :

- قراءة المعطيات

- إدخال علاقات a و A

- تحويل I_{abc} من الشكل القطبي إلى المتعامد

- حساب I_{012} بالعلاقة : $I_{012r} = A^{-1} I_{abc}$

- حساب I_{012p} (شكل قطبي)

وفيما يلي البرنامج والنتائج كما يبين الشكل (4-31)

الشكل (4-31) برنامج ونتائج التطبيق 1

تطبيق 2:

المركبات المتناظرة لنظام تيارات غير متوازن:

$$I_{120} = \begin{bmatrix} 3 \angle -30^\circ \\ 5 \angle 90^\circ \\ 4 \angle 30^\circ \end{bmatrix}$$

احسب تيارات الأطوار باستخدام الحاسوب .

الحل :

- خطوات البرنامج:
- إدخال المعطيات (شعاع المركبات المتناظرة القطبي)
 - إدخال علاقات a و A
 - حساب I_{120r} بالشكل المتعامد
 - حساب $I_{abc r}$ من العلاقة : $I_{abc r} = A I_{120r}$
 - حساب $I_{abc p}$ (الشكل القطبي)
- يبين الشكل (4-32) برنامج MATLAB ونتائج الحل الحاسوبي.

الشكل (4-32) برنامج ونتائج التطبيق 2

تطبيق 3 :

نظام تواترات متوازن ثلاثي الطور ($V_a = 100 \text{ V}$) يغذي حمولة نجمية غير مؤرضة ممانعتها التسلسلية $Z_s = j12\Omega$ بالطور والممانعة المتبادلة بين الأطوار $Z_m = j4\Omega$. احسب تيارات الحمولة العقدية باستخدام المركبات المتناظرة والبيئة البرمجية MATLAB .

الحل :

حسب المعادلة (4-33) وباعتبار خصائص الشبكة المعطاة نكتب :

$$Z_{012} = \begin{bmatrix} Z_s + 2Z_m & 0 & 0 \\ 0 & Z_s - Z_m & 0 \\ 0 & 0 & Z_s - Z_m \end{bmatrix}$$

$$I_{012} = [Z_{012}]^{-1} * V_{012}$$

الخوارزمية :

- إدخال المعطيات : V_a, Z_m, Z_s

- حساب Z_{012} بواسطة العلاقة المذكورة أعلاه

- إدخال a و A

- حساب I_{012}

- حساب I_{abc} بالشكل المتعامد

ثم بالشكل القطبي

ويبين الشكل (4-33) البرنامج والنتائج.



الشكل (4-33) برنامج MATLAB ونتائج الحل للتطبيق 3

تطبيق 4:

منبع توتر ثلاثي الطور غير متوازن نقطته النجمية مؤرضة مباشرة وتوتراته الطورية (طور - حيادي) هي :

$$V_{abc} = \begin{bmatrix} 300 \angle -120^\circ \\ 200 \angle 90^\circ \\ 100 \angle -30^\circ \end{bmatrix}$$

يغذي هذا المنبع حمولة نجمية مؤرضة مباشرة بممانعاتها:

$$Z_s = 10 + j40 \text{ التسلسلية}$$

$$Z_m = j5 \text{ المتبادلة}$$

والمطلوب استخدام الحاسوب لإيجاد :

- 1- مصفوفة الممانعات المتناظرة للحمولة .
- 2- المركبات المتناظرة لتواترات المنبع .
- 3- المركبات المتناظرة لتيارات الحمولة .
- 4- تيارات الأطوار للحمولة .
- 5- الاستطاعة العقدية المسلّمة للحمولة باستخدام نظرية المركبات المتناظرة .
- 6- الاستطاعة العقدية المسلّمة للحمولة باستخدام تيارات وتواترات الأطوار مباشرة .

الحل:

يبين الشكل (4-34) البرنامج المكتوبة في بيئة MATLAB ونتائج الحل الحاسوبي.

الشكل (4-34) برنامج MATLAB ونتائج الحل للتطبيق 4 (يتبع)

تابع الشكل (4-34)

الفصل الخامس

الأعطال غير المتوازنة (غير المتناظرة) Unbalanced (Unsymmetrical) faults

5-1 مقدمة :

درسنا في الفصل الثالث من هذا الكتاب الأعطال المتوازنة حيث اعتمدنا تحليلها على أساس طور واحد نظراً لأن منظومة القدرة تبقى متوازنة أثناء العطل المتوازن. في هذا الفصل سنعالج الأعطال غير المتوازنة التي تصيب منظومات القدرة الكهربائية. ويمكن تصنيف الأعطال غير المتوازنة إلى :

- أعطال تفرعية Shunt faults :

- عطل طور مع الأرض LG.
- عطل طورين (طور مع طور) L L.
- عطل طورين مع الأرض L L G.

- أعطال تسلسلية Series faults :

- عطل انقطاع طور One open conductor.
- عطل انقطاع طورين Two open conductors.

وتجدر الإشارة إلى أن تحليل الأعطال غير المتوازنة يندرج ضمن دراسات تخطيط تشغيل النظام الكهربائي operational planning وبخاصة لعيار الريليهاث Relays، ولدراسات عمليات الفصل والوصل وحيدة الطور، ولدراسات استقرار النظام الكهربائي.

إن احتمال حدوث عطلين أو أكثر في الوقت نفسه هو احتمال قليل الحصول، لذا فقلما يُؤخذ هذا بالاعتبار لأجل تصميم منظومة القدرة في ظروف التشغيل غير النظامية.

سنستخدم طريقة المركبات المتناظرة حصراً لدراسة الأعطال غير المتناظرة، وقد أثبتت الطريقة جدارتها لتحليل مثل هذه المسائل.

2-5 الإطار العام للخوارزمية:

نفرض حدوث عطل تفرعي في النقطة F من منظومة قدرة كهربائية عامة مبينة في الشكل (5-1). نتيجة للعطل تسري التيارات I_a, I_b, I_c خارجة من المنظومة تحت التوترات V_a, V_b, V_c بين الطور والأرض.

الشكل (5-1) منظومة قدرة كهربائية عامة.

نفترض أيضاً أن المنظومة كانت تعمل في حالة لاهمل قبل أن يحصل العطل. لذلك ستكون توترات التتابع الموجب لكافة الآلات التزامنية متماثلة ومساوية للتوتر قبل حصول العطل في F ، والذي سندعوه E_a .
مرئياً من F ، تُبدي منظومة القدرة شبكات تتابعية موجبة وسالبة وصفرية يتضمنها الشكل (5-2)، حيث يتم تمثيل الباس المرجعي بخط غامق يشار فيها إلى نقطة العطل بالحرف F في جميع الشبكات التتابعية. يظهر أيضاً على الشبكات التتابعية التوترات التتابعية في F والتيارات التتابعية الجارية خارجةً من الشبكات في النقطة F . يبين الشكل (5-3) شبكات ثفنين العائدة للشبكات التتابعية.

الشكل (5-3) شبكات ثفنين للشبكات الشكل (5-2) الشبكات التتابعية مرئية من

التتابعية مرئية من نقطة العطل F نقطة العطل F

يتعين ملاحظة أن E_a موجود فقط في شبكة التابع الموجب، وأن الشبكات التتابعية مستقلة عن بعضها البعض وعلى يمكن كتابة توترات F التتابعية بدلالة التيارات التتابعية وممانعات ثفنين التتابعية :

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

حسب نوع العطل، تخضع التيارات والتوترات التتابعية لمقيّدات constraints تقود إلى ربط الشبكات التتابعية مع بعضها البعض على نحوٍ خاص. وبمساعدة مثل هذه الدارات المتحصلة يمكن بسهولة حساب التيارات والتوترات التتابعية والتيارات وتوترات العطل.

3-5 عطل طور مع الأرض LG :

معظم الأعطال (حوالي 95%) التي تحدث في الشبكات الكهربائية هي من هذا النوع وقد تكون هذه الأعطال دائمة أو لحظية وتنشأ من أسباب كثيرة منها انهيار العازل الحامل للناقل أو نتيجة اهتزازات ما... إلخ. ويمكن أن يؤدي هذا العطل إلى مرور تيار عطل أكبر من تيار العطل المتوازن في بعض الحالات الخاصة، كأن

يحدث العطل على باس محطة توليد كبيرة؛ في مثل هذه الحالة نعتد العطل طور مع الأرض LG لاختيار القاطع الآلي لباس المحطة وليس العطل المتوازن.

5-3-1 منظومة القدرة تعمل في حالة لا حمل قبل حدوث العطل :

يبين الشكل (5-4) عطل طور مع الأرض يحدث في F من منظومة القدرة عبر ممانعة عطل Z_f بين الطور a والأرض. وممانعة العطل تتضمن مقاومة القوس الكهربائي ومقاومة البرج نفسه ومقاومة قاعدة البرج.

الشكل (5-4) عطل طور مع الأرض في F.

تخضع التيارات الخارجة من F والتواترات طور-أرض إلى المقيدات التالية:

$$I_b = 0 \quad (5-2)$$

$$I_c = 0 \quad (5-3)$$

$$V_a = Z_f I_a \quad (5-4)$$

المركبات المتناظرة لتيارات العطل هي :

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

ومنه:

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = I_a / 3 \quad (5-5)$$

نكتب المعادلة (4-5) بدلالة المركبات المتناظرة:

$$V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = Z_f I_a = 3Z_f I_{a1} \quad (5-6)$$

تبين المعادلتان (5-5) و (5-6) أن جميع التيارات التتابعية متساوية ومجموع التوترات التتابعية تساوي $3Z_f I_{a1}$. لذلك تكون الدارة المكافئة للعطل عبارة عن ربط تسلسلي للشبكات التتابعية عبر ممانعة $3Z_f$ كما هو مبين في الشكل (5-5).

الشكل (5-5) الدارة المكافئة لعطل LG

من الشكل (5-5) نكتب :

$$I_{a1} = \frac{E_a}{(Z_0 + Z_1 + Z_2) + 3Z_f} \quad (5-7)$$

وعليه فتيار العطل I_a :

$$I_a = 3I_{a1} = \frac{3E_a}{(Z_0 + Z_1 + Z_2) + 3Z_f} \quad (5-8)$$

ويمكن التوصل للعلاقات السابقة ذاتها من المعادلات (5-5) و (5-6) و (5-1).

توتر الطور b بالنسبة للأرض أثناء العطل هو:

$$\begin{aligned} V_b &= V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2} \\ &= \left(-Z_0 \frac{I_a}{3} \right) + a^2 \left(E_a - Z_1 \frac{I_a}{3} \right) + a \left(-Z_2 \frac{I_a}{3} \right) \end{aligned}$$

نعوّض عن I_a من المعادلة (5-8) ونعيد ترتيب الحدود فينتج:

$$V_b = E_a \frac{Z_0(a^2 - 1) + 3a^2 Z_f + Z_2(a^2 - a)}{(Z_0 + Z_1 + Z_2) + 3Z_f} \quad (5-9)$$

نوجد V_c بشكل مشابه.

5-3-2 منظومة القدرة محملة قبل حدوث العطل :

عندما يحدث العطل تحت ظروف تحميل متوازن، تسري تيارات التتابع الموجب فقط في منظومة القدرة قبل أن يقع العطل. لذلك تبقى شبكات التتابع الصفري والتتابع السالب على حالها كما في حالة اللاحمل. يجب أن تمرر شبكة التتابع الموجب طبعاً تيار الحمل. ولحساب تيار الحمل تمثل الآلة التزامنية بالمفاعلة تحت العابرة أو العابرة أو التزامنية (وهذا يعتمد على اللحظة الزمنية التي نحسب فيها التيارات بعد حدوث العطل)، والتوترات خلف المفاعلات المناسبة. يتم حساب تيارات العطل اعتماداً على نظرية ثفنين . (الشكل 5-6). بعد ذلك يتم جمع تيار العطل في فرع ما إلى تيار الحمل في ذلك الفرع للحصول على المركبة الموجبة لتيار العطل الإجمالي أما المركبات الصفريّة والسالبة فلا تتغير لأن تيار الحمل متوازن، فلا يضيف أية مركبة غير المركبة الموجبة لتيار العطل حسب ثفنين.

عندما نرسم شبكة ثفنين (الشكل 5-5b) انطلاقاً من شبكة التتابع الموجب (الشكل 5-5a) يجب أن نضع V_f^0 (التوتر قبل العطل) بدلاً من E_a . أما ممانعة ثفنين فهي الممانعة بين F والباس المرجعي لشبكة التتابع الموجب المسالمة في الوقت الذي نقصر فيه توتر المولد. هذه العملية موضحة في الشكل (5-6) لنظام مؤلف من آلتين.

الشكل (5-6) شبكة التتابع الموجب وشبكة ثفنين لها قبل حصول العطل.

نلاحظ في الشكل أنه بينما يسري تيار قبل العطل في شبكة التتابع الموجب (الشكل 5-6a)، ليس لهذا التيار وجود في شبكة ثفنين (الشكل 5-6b). لذلك عندما نستخدم شبكة ثفنين العائدة لشبكة التتابع الموجب في حساب تيارات العطل، فإن تيارات التتابع الموجب الجارية في شبكة ثفنين هي التيارات الناجمة عن العطل فقط. لأخذ تيارات قبل العطل بالحسبان يجب أن نستخدم مبدأ التراكم لها. وتجدر الإشارة إلى أن الملاحظات المذكورة أعلاه صالحة لشبكة التتابع الموجب لكافة أنواع الأعطال.

4-5 عطل طورين (طور مع طور) LL :

يبين الشكل (5-7) عطل طورين في الموقع F من منظومة قدرة على الطورين b و c عبر ممانعة عطل Z_f .

الشكل (5-7) عطل

طورين عبر ممانعة Z_f .

التيارات والتواترات للعطل هي :

$$I_p = \begin{bmatrix} I_a = 0 \\ I_a \\ I_c = -I_b \end{bmatrix} ; V_b - V_c = I_b Z_f \quad (5-10)$$

المركبات المتناظرة للعطل هي :

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix}$$

ومنه :

$$I_{a1} = -I_{a2} \quad (5-11)$$

$$I_{a0} = 0 \quad (5-12)$$

المركبات المتناظرة للتواترات في F أثناء العطل :

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_b - Z_f I_b \end{bmatrix} \quad (5-13)$$

وبنشر هذه المعادلة نحصل على :

$$3V_{a1} = V_a + (a + a^2)V_b - a^2 Z_f I_b$$

$$3V_{a2} = V_a + (a + a^2)V_b - a Z_f I_b$$

ومنه (بطرح المعادلتين) :

$$3(V_{a1} - V_{a2}) = (a - a^2)Z_f I_b = j\sqrt{3}Z_f I_b \quad (5-14)$$

ومن علاقات التحويل نحصل على :

$$I_b = (a^2 - a)I_{a1} = -j\sqrt{3}I_{a1} \quad (5-15)$$

من المعادلتين (5-14) و (5-15) نجد :

$$V_{a1} - V_{a2} = Z_f I_{a1} \quad (5-16)$$

المعادلتان (5-11) و (5-16) تقودان إلى الدارة المكافئة لعطل طورين والمبينة في الشكل (5-8)، والتي تظهر ربطاً تفرعياً لشبكتي التتابع الموجب والسالب.

الشكل (5-8) الدارة المكافئة لعطل طورين b و c
a: ربط تفرعي لشبكتي التتابع الموجب والسالب ، b: دائرة ثنائي

من دائرة ثنائي (الشكل 5-8b) نجد :

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (5-17)$$

ومن المعادلة (5-15) نجد :

$$I_b = -I_c = \frac{-j\sqrt{3}E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (5-18)$$

إذا حسبنا I_{a1} نستطيع بعدئذٍ حساب V_{a1} و V_{a2} (بمساعدة دائرة ثفنين) ومنه حساب التوترات في نقطة العطل. إذا حصل العطل على منظومة قدرة تعمل وهي محملة، فنستخدم نفس دائرة ثفنين مع تعديل في جزء شبكة التتابع الموجب وفق القواعد التي توصلنا إليها في الفقرة: 2-3-5.

5-5 عطل طورين مع الأرض LLG :

يحصل عطل على الطورين b و c عبر ممانعة تأريض Z_f متصلة بالأرض كما هو مبين في الشكل (5-9).

الشكل (5-9) عطل طورين مع الأرض عبر ممانعة Z_f .

العلاقات الخاصة بهذا العطل هي :

$$I_a = 0 \Rightarrow I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0 \quad (5-19)$$

$$V_b = V_c = Z_f (I_b + I_c) = 3Z_f I_{a0} \quad (5-20)$$

وحسب علاقات التحويل نجد :

$$V_{a0} = \frac{1}{3}(V_a + 2V_b)$$

$$V_{a1} = V_{a2} = \frac{1}{3}[V_a + (a + a^2)V_b]$$

ب طرح العلاقتين السابقتين واعتبار المعادلة (5-20) نجد :

$$V_{a0} = V_{a1} + 3Z_f I_{a0} \quad (5-21)$$

من المعادلات أعلاه نرسم دائرة المركبات المتناظرة للعطل كما هو مبين في الشكل (5-10).

الشكل (5-10) دائرة المركبات المتناظرة المكافئة للعطل بين طورين والأرض

(a) بدلالة شبكات التتابع ، (b) بدلالة شبكات ثنائي

من الشكل (5-10b) نجد :

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 // (Z_0 + 3Z_f)} \quad (5-22)$$

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 (Z_0 + 3Z_f) / (Z_2 + Z_0 + 3Z_f)}$$

هذه المعادلة الناتجة اعتماداً على الدارة المكافئة، يمكن استنتاجها تحليلياً اعتماداً على المعادلات (5-1) و (5-19) و (5-20) ويترك للقارئ إجراء ذلك.

يمكن أخذ ظروف التحميل بالحسبان عن طريق تعديل شبكة التتابع الموجب وفق الفقرة 2-3-5 .

مثال (5-1) :

مولد تزامني ذو نقطة نجمية مؤرضة عبر مفاعلة X_n (الشكل 5-11). القوى الكهربائية المحركة (قمك) للمولد متوازنة ومفاعلاته التتابعية تحقق :
 $X_1 = X_2 \gg X_0$

الشكل (5-11) مولد تزامني مؤرض عبر مفاعله.

- (a) ارسم الشبكات التتابعية للمولد إفرادياً مرئية من خرج المولد
- (b) استخرج علاقة تعطي تيار عطل طور – أرض LG مباشر على الطور a.
- (c) برهن أنه إذا كان تأريض المولد مباشراً ($X_n=0$) فإن قيمة تيار العطل LG سيكون أكبر من قيمة العطل المتوازن (ثلاثي الطور).
- (d) توصّل إلى علاقة لمفاعلة التأريض X_n بحيث يصبح تيار العطل LG أقلّ من تيار العطل المتوازن من حيث القيمة.

الحل:

- (a) يعطي الشكل (5-12) الشبكات التتابعية للمولد. ويتعين الانتباه إلى أن المنبع يظهر في شبكة التابع الموجب فقط (كما ذكرنا في فقرة سابقة).

الشكل (5-12) شبكات التابع لمولد تزامني في مؤرض عبر ممانعة.

(b) الدارة المكافئة للعطل LG

باعتبار $Z_f=0$

مبينة في الشكل 5-13،

وعلى أساسها نكتب:

$$|I_a|_{LG} = \frac{3|E_a|}{2X_1 + X_0 + 3X_n} \quad (i)$$

الشكل (5-13) عطل LG

(c) قيمة تيار العطل المتوازن في حالة التأريض المباشر (انظر الشكل 5-14) هي:

$$|I_a|_{3L} = \frac{|E_a|}{X_1} \quad (ii)$$

الشكل (5-14)

عطل متوازن.

وقيمة تيار العطل LG في حالة التأريض المباشر هي :

$$|I_a|_{3L} = \frac{3|E_a|}{2X_1 + X_0} \quad (iii)$$

بتقسيم (iii) على (ii) نجد

$$\frac{\text{تيار LG}}{\text{تيار 3L}} = \frac{\text{قيمة}}{\text{قيمة}} = \frac{3X_1}{2X_1 + X_0} \approx \frac{3}{2}$$

وعليه :

$$|I_a|_{LG} > |I_a|_{3L}$$

وتجدر الإشارة هنا إلى الملاحظة الهامة التالية:

في حالة التأريض المباشر للمولد يكون العطل الأحادي LG على خرج محطة توليد

أقصى من العطل المتوازن لأن $X_0 < X_1 = X_2$.

أما عند حدوث العطل بعيداً عن خرج المولد (كأن يحدث العطل على خط نقل)

فيكون العطل المتوازن أقصى من العطل الوحيد الطور نظراً لأن X_0 لخط النقل أكبر

بكثير من X_1 أو X_2 له $(X_1 = X_2 >> X_0 \text{ لخط نقل})$.

(d) لكي يصبح تيار العطل الأحادي LG أصغر (قيمة) من تيار العطل الثلاثي 3L

من حيث القيمة فيجب أن تتحقق المتراجحة :

$$\frac{3|E_a|}{2X_1 + X_0 + 3X_n} < \frac{3|E_a|}{3X_1}$$

أي :

$$2X_1 + X_0 + 3X_n > 3X_1$$

أو :

$$X_n > \frac{1}{3}(X_1 - X_0)$$

مثال (5-2):

مولدان تزامنيان ثلاثيا الطور متماثلان يعملان على التفرع (الشكل 5-15) مواصفاهما:

توصيلة نجمية - 11kV و 20MVA و $Z_0 = j 1 \text{ pu}$

$Z_2 = j 0.15$ و $Z_1 = j 0.18 \text{ pu}$

المولد الأول مؤرض عبر مقاومة $R_m = 2\Omega$ والمولد الثاني معزول النقطة النجمية.

يحدث عطل طور - أرض LG على خرج أحد المولدين والمطلوب :

(a) حساب تيار العطل.

(b) حساب التيار في مقاومة التأريض.

(c) حساب التوتر عبر مقاومة التأريض.

الشكل (5-15)

الحل:

$$Z_{1eq} = \frac{j0.18}{2} = j0.09$$

$$Z_{2eq} = \frac{j0.15}{2} = j0.075$$

$$Z_{0eq} = j0.1 + 3R_n = j0.1 + 3 \times \frac{2 \times 20}{(11)^2} = 0.99 + j0.1$$

$$I_f = I_a = 3I_{a1} = \frac{3E_a}{Z_{1eq} + Z_{2eq} + Z_{0eq}}$$

(a)

$$I_f = \frac{3 \times 1}{j0.09 + j0.075 + j0.1 + 0.99}$$
$$= \frac{3}{0.99 + j0.365} = 2.827 - j0.756$$

(b)

$$I_{Rn} = I_f = 2.827 - j0.756$$

$$|I_{Rn}| = 2.926 \times \frac{20}{\sqrt{3} \times 11} = 3.07 \text{ kA}$$

(c)

$$V_{Rn} = 2 \times \frac{20}{(11)^2} (2.87 - j0.756)$$

$$= 0.932 - j0.249 \text{ pu}$$

$$= 0.965 \times \frac{11}{\sqrt{3}} = 6.13 \text{ kV}$$

وهو المطلوب

مثال (5-3) :

يبين الشكل (5-16) مخطط الخط الواحد لمنظومة قدرة بسيطة سبق وأعطينا مواصفاتها في المثال (4-6) في الفصل الرابع:

الشكل (5-16) مخطط الخط الواحد للمنظومة للمثال (5-3).

كما سبق أن رسمنا الدارات المتتابعة لهذه المنظومة على أساس 25 MVA و 11 kV في دارة المولد في الأشكال (4-27) و (4-28) و (4-29) في الفصل الرابع من هذا الكتاب.

قبل حدوث عطل LG مباشر في الباس g، كانت المحركات تسحب حمولة 5MW و 7.5 MW تحت توتر 10 kV وبعامل استطاعة متقدم 0.8. (a) إذا أهملنا تيار الحمل قبل العطل، احسب تيار العطل والتيار العابر بسرعة في جميع أجزاء المنظومة.

(b) احسب التوترات خلف المفاعلات العابرة بسرعة التي يجب استخدامها في شبكة التابع الموجب في حالة اعتبار تيار الحمل قبل العطل.

الحل:

توصّل الشبكات المتتابعة الموجودة في الأشكال (4-27)، (4-28) و (4-29) لنمذجة العطل LG في الباس g (الشكل 5-17).

(a) إذا أهملنا تيارات الحمل قبل العطل يكون:

$$\begin{aligned} E_g'' = E_{m1}'' = E_{m2}'' = V_f^0 &= \text{توتر } g \text{ قبل العطل} \\ = \frac{10}{11} = 0.909 \text{ pu} \end{aligned}$$

الشكل (5-17) الدارة المكافئة المتناظرة للمثال (5-3) مبيناً عليها التيارات فوق العابرة بالوحدة لعطل طور - أرض LG مباشر في الباس g.

وعليه نعدّل شبكة ثفنين الموجبة في الشكل (5-17) وتصبح كما هو مبين في الشكل (5-18).

الشكل (5-18)

$$Z_1 = \frac{j0.525 \times j0.23}{j0.755} = j0.16 \quad \text{pu}$$

$$Z_2 = Z_1 = j0.16 \quad \text{pu}$$

$$I_{a1} = \frac{V_f^0}{Z_1 + Z_2 + Z_0} = \frac{0.909}{j2.032} = -j0.447 \quad \text{pu}$$

$$I_{a2} = I_{a0} = I_{a1} = -j0.447 \quad \text{pu}$$

تيار العطل

$$= 3I_{a0} = 3 \times (-j0.447) = -j1.341 \quad \text{pu}$$

وباستخدام قاعدة مجزئ التيار نحسب الجزء من I_{a1} أو من I_{a2} القادم من جهة المولد إلى نقطة العطل g:

$$-j0.447 \times \frac{j0.23}{j0.755} = -j0.136 \quad \text{pu}$$

والجزء الآخر القادم من جهة المحركات:

$$-j0.447 \times \frac{j0.525}{j0.755} = -j0.311 \quad \text{pu}$$

أما I_{a0} فيسهم به المحرك الثاني لوحده.

تيارات العطل القادمة من المولد نحو g (على يمين T_1) هي:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -j0.136 \\ -j0.136 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j0.272 \\ j0.136 \\ j0.136 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j0.272 \\ j0.136 \\ j0.136 \end{bmatrix} \text{ pu}$$

وتيارات العطل القادمة من المحركات نحو g:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j1.069 \\ -j0.136 \\ -j0.136 \end{bmatrix} \text{ pu}$$

التيارات في أطوار خط النقل :

وفق قاعدة نقل المركبات المتناظرة عبر محول Δ/Y (التيار الموجب في جهة التوتر العالي يتقدم 90° في النظم الأمريكية) نجد :

$$I_{A1} = +j(-j0.136) = 0.136 \text{ pu}$$

$$I_{A2} = -0.136$$

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0.136 \\ -0.136 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.136 \\ 0.136 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -j0.236 \\ j0.236 \end{bmatrix} \text{ pu}$$

خط النقل

التيارات في دائرة المولد :

المركبات المتناظرة هنا هي ذاتها كما في دائرة g وعليه تسري في أطوار المولد التيارات:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j0.272 \\ j0.136 \\ j0.136 \end{bmatrix} \text{ pu}$$

مولد

(b) لأجل حالة التحميل قبل العطل ينبغي حساب التوترات خلف المفاعلات فوق العابرة. تيار الحمل بالوحدة للمحرك M_1 هو:

$$\frac{15}{25 \times 0.909 \times 0.8} \angle 36.86^\circ = 0.825 \angle 36.86^\circ = 0.66 + j0.495 \text{ pu}$$

وللمحرك M_2 هو (على نحو مشابه):

$$0.4125 \angle 36.86^\circ = 0.33 + j0.248 \text{ pu}$$

التيار الكلي الذي يستجره المحركان معاً هو:

$$0.99 + j 0.743 \text{ pu}$$

$$E''_{m1} = 0.909 - j0.345 \times 0.825 \angle 36.86^\circ$$

$$E''_{m2} = E''_{m1}$$

$$E''_g = 0.909 + j0.525 \times 1.2375 \angle 36.86^\circ$$

$$= 0.52 + j0.52 = 0.735 \angle 45^\circ \text{ pu}$$

شبكة ثفنين الموجبة هنا تبقى على حالها إذ تحوي المنبع V_f الذي هو التوتر الفعلي في النقطة g قبل حصول العطل. وعليه المركبات المتناظرة لتيارات العطل في كافة أجزاء المنطقة تبقى ذاتها. ونطبق مبدأ التراكم لأخذ تيارات الأحمال بالاعتبار طبعاً الذي يتغير هو I_{a1} فقط.

القيمة الراهنة لتيارات التتابع الموجب القادم من المولد إلى نقطة العطل هي:

$$0.99 + j 0.743 - j 0.136 = 0.99 + j 0.607$$

والقيمة الراهنة لتيار التتابع الموجب القادم من المحركات إلى العطل هي:

$$- 0.99 - j 0.743 - j0.311 = - 0.99 - j 1.054 \text{ pu}$$

ملاحظة:

في النظم العملية يمكن وبتقريب معقول إهمال تيار الحمل بسبب صغره مقارنة مع تيار العطل حسب نظرية ثفنين فلا حاجة لحساب "E على الإطلاق.

مثال (5-4) :

لأجل المثال (5-2) افرض المولد المؤرض هو مؤرض مباشرة. أوجد تيار العطل وتوتر الطور السليم لأجل عطل طورين على خرج المولدين. افرض $Z_f = 0$.

الحل:

$$I_{a1} = \frac{1}{j0.09 + j0.075} = -j6.06$$

$$I_f = I_b = -j\sqrt{3} I_{a1} = -10.496$$

$$V_{a1} = V_{a2} = E_a - I_{a1} X_{1eq} = 0.455$$

$$V_{a0} = -I_{a0} Z_0 = 0$$

وعليه توتر الطور السليم هو:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} = 0.91$$

مثال (5-5) :

اعتبر المثال (5-4) واحسب تيار العطل في كل طور وتوتر الطور السليم لأجل عطل طورين مع الأرض وافترض أن المولد المؤرض يتم تأريضه بشكل مباشر.

الحل:

$$I_{a1} = \frac{1 + j0}{j0.09 + \frac{j0.075 \times j0.1}{j0.075 + j0.1}} = -j7.53$$

$$V_{a1} = V_{a2} = V_{a0} = E_a - I_{a1} Z_{1eq} = 0.323$$

$$I_{a2} = -\frac{V_{a2}}{Z_{2eq}} = j4.306$$

$$I_{a0} = -\frac{V_{a0}}{Z_{0eq}} = j3.23$$

وحسب قواعد التحويل نجد:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 11.334 \angle 154.74^\circ \\ 11.334 \angle 25.28^\circ \end{bmatrix}$$

وتوتر الطور السليم :

$$V_a = 3V_{a1} = 3 \times 0.323 = 0.969$$

5-6 الأعطال غير المتوازنة التسلسلية (أعطال انقطاع النواقل) :

Series unsymmetrical faults open-conductors faults :

يمكن أن تحصل مثل هذه الأعطال نتيجة العواصف أو حوادث معينة أو عمليات فصل ووصل غير ناجحة (كأن يفصل تماس أو تماسين فقط من تماسات قاطع آلي ثلاثي الطور). عند حدوث انقطاع ناقل أو ناقلين تعمل منظومة القدرة عندها في حالة تشغيل غير متناظرة. وتتم دراسة مثل هذه الأعطال غير المتوازنة باستخدام نظرية ثفنين التي تسمح لنا ببناء الشبكات التتابعية للمنظومة في حالة العطل. يبين الشكل (5-19) مخططاً رمزياً لعطل انقطاع النواقل.

الشكل (5-19) مخطط رمزي

لعطل انقطاع النواقل لخط mn.

الخط الذي حصل عليه العطل مربوط بين قضبي التجميع m و n و F و F' نهايات الأطوار التي حصل فيها الانقطاع.

إن انقطاع الخط يمكن تمثيله بإزالة هذا الخط وإضافة ممانعات مناسبة بين m و n من جهة وممانعات مناسبة بين F و F' من جهة أخرى.

إذا فرضنا أن الممانعات المتناظرة للخط m هي Z_1 ، Z_2 ، Z_0 فيمكن تمثيل انقطاع الأطوار الثلاثة بإضافة الممانعات $-Z_1$ ، $-Z_2$ ، $-Z_0$ بين m و n في شبكات ثنيتين الموجبة والسالبة والصفيرية على الترتيب.

وتكون شبكة ثنيتين للتتابع الموجب كما هو مبين في الشكل (20-5).

ونظراً لتعدد الرموز نستخدم إشارة + ، - ، 0 في أعلى الحرف للدلالة على المركبات الموجبة والسالبة والصفيرية لعلاقات عطل انقطاع مع الاحتفاظ بالرموز المعتادة للمركبات المتناظرة للخط (Z_1, Z_2, Z_0) . في الشكل V_m و V_n هي توترات الباسين m و n للطور a قبل حصول العطل. $Z_{Th,mn}^+$ هي ممانعة ثنيتين الموجبة لكامل منظومة القدرة مرئية من m و n مع وجود Z_1 (الممانعة الموجبة للخط mn). وأيضاً

$$0 \leq K \leq 1$$

الشكل (5-20) شبكة ثفنين الموجبة للنظام.

ممانعة ثفنين الموجبة مرئية من F'F :

$$\begin{aligned} Z_{FF'}^+ &= KZ_1 + \frac{(-Z_1)(Z_{Th,mn}^+)}{Z_{Th,mn}^+ - Z_1} + (1-K)Z_1 \\ &= \frac{-Z_1^2}{Z_{Th,mn}^+ - Z_1} \end{aligned} \quad (5-23)$$

$$V_{aa'}^+ = \frac{V_m - V_n}{Z_{Th,mn}^+ - Z_1} (-Z_1) = \frac{Z_{FF'}^+}{Z_1} (V_m - V_n) \quad (5-24)$$

التيار I_{mn} في الطور a قبل أن يحصل العطل هو نفسه المركبة الموجبة لهذا التيار:

$$I_{mn} = \frac{V_m - V_n}{Z_1} \quad (5-25)$$

بتعويض (5-25) في (5-24) نجد :

$$V_{aa'}^+ = Z_{FF'}^+ I_{mn} \quad (5-26)$$

وعليه نرسم الدارة المكافئة الموجبة بين النقطتين F و F' :

الشكل (5-21)

وبنفس الطريقة نستطيع أن نستنتج علاقات مشابهة للنظام السالب والنظام الصفري كما يلي:

$$Z_{FF}^- = \frac{-Z_2^2}{Z_{Th,mn}^- - Z_2} \quad (5-27)$$

$$Z_{FF}^0 = \frac{-Z_0^2}{Z_{Th,mn}^0 - Z_0} \quad (5-28)$$

ونرسم الدارات المكافئة للنظام الصفري والسالب (الشكل 5-22)

الشكل (5-22) الدارات المكافئة السالبة والصفريّة

والآن ندرس حالتي العطل: انقطاع ناقل ثم انقطاع ناقلين.

5-6-1 عطل انقطاع الطور a:

الشروط الحدية لهذا العطل هي:

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0 \quad (5-29)$$

حيث I_{a0} ، I_{a1} ، I_{a2} هي المركبات المتناظرة للتيارات I_a ، I_b ، I_c التي تسري من F إلى F'.

$$V_{bb'} = V_{cc'} = 0 \quad (5-30)$$

$$\begin{bmatrix} V_{aa'}^0 \\ V_{aa'}^+ \\ V_{aa'}^- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{aa'} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5-31)$$

ومنه:

$$V_{aa'}^0 = V_{aa'}^+ = V_{aa'}^- = \frac{V_{aa'}}{3} \quad (5-32)$$

وهذا يعني أن عطل انقطاع الطور a يسبب هبوطات توتر متساوية بين نقطتي الانقطاع لأجل الشبكات المتناظرة .

وعليه نستطيع أن نمثل عطل انقطاع الطور a بوصل شبكات ثنتين المتناظرة على التفرع (الشكل 5-23).

الشكل (5-23) الدارة المكافئة لعطل انقطاع الطور a.

$$I_{a1} = \frac{I_{mm} \cdot Z_{FF}^+}{Z_{eq}} \quad (5-34)$$

حيث :

$$Z_{eq} = Z_{FF}^+ + (Z_{FF}^- // Z_{FF}^0) \quad (5-35)$$

$$V_{aa'}^+ = V_{aa'}^- = V_{aa'}^0 = I_{a1} (Z_{FF}^- // Z_{FF}^0) \quad (5-35)$$

وهكذا نكون قد حسبنا المركبات المتناظرة لتيارات العطل ولهبوطات التوتر بين نقطتي الانقطاع.

مثال (5-6) : (الشكل 5-24)

يغذي مولد ثلاثي الطور (100 MVA ، 20 kV ، $X_1 = X_2 = 20\%$ ، $X_0 = 4\%$ ، $X_n = 5\%$) محركاً مواصفاته مماثلة للمولد، عن طريق محولتين T_1 ، T_2 متماثلتين (100 MVA ، $20\Delta/345\text{ YKV}$ ، $X = 8\%$) وخط نقل ($X_1 = X_2 = 15\%$) ، $X_0 = 50\%$).

يستجر المحرك استطاعة 50 MVA بعامل استطاعة متأخر 0.8 وتحت توتر 345 KV في 3. احسب التغير في توتر الباس 3 إذا حصل انقطاع في الطور a على خط النقل 2-3 . اختر نظام أساس 100 MVA و 345 kV في منطقة خط النقل.

الشكل (5-24) المثال (5-6).

الحل:

مفاعلات المولد بالوحدة منسوبة إلى جهة خط النقل:

$$X_1 = X_2 = \frac{20}{100} \times \frac{(20)^2}{100} \times \frac{100}{(345)^2} \times \frac{(345)^2}{(20)^2} = 0.2 \quad \text{pu}$$

$$X_0 = 0.4 \quad \text{pu}$$

$$X_n = 0.5 \quad \text{pu}$$

مفاعلات المحرك تساوي تلك للمولد . نختار $V_3 = 1 \angle 0^\circ \text{ pu}$ قبل حصول العطل.

التيار I_{23} قبل حصول العطل يحسب كما يلي:

$$S_3 = V_3 I_{23}^* \Rightarrow I_{23} = \frac{S_3^*}{V_3^*}$$

$$I_{23} = \frac{\frac{50}{100} \times (0.8 - j0.6)}{1 \angle 0^\circ} = 0.4 - j0.3 \quad \text{pu}$$

ممانعات الخط 23:

$$Z_1 = Z_2 = j 0.15 \text{ pu}$$

$$Z_0 = j 0.5$$

ولإيجاد $Z_{Th,23}^{+, -, 0}$ ينبغي رسم شبكات ثفنين للمركبات المتناظرة المسالمة للنظام كما هو

مبين بالشكل (5-25).

شكل (5-25).

$$Z_{Th,23}^+ = \frac{(j0.15)(j0.56)}{(j0.15 + j0.56)} = j0.1183$$

$$Z_{FF'}^+ = Z_{FF'}^- = \frac{-Z_1^2}{Z_{Th} - Z_1} = \frac{-(j0.15)^2}{j0.1183 - j0.15} = +j0.712 \text{ pu}$$

$$Z_{FF'}^0 = \frac{-(j0.5)^2}{j0.5 - j0.5} = \infty$$

عطل انقطاع الطور a:

$$V_{aa'}^+ = V_{aa'}^- = V_{aa'}^0 = I_{23} \frac{Z_{FF'}^+}{Z_{eq} = Z_{FF'}^+ + Z_{FF'}^-}$$

$$V_{aa'}^+ = (0.4 - j0.3) \frac{(j0.712)^2}{2 \times j0.712} = 0.1068 + j0.1424 \text{ pu}$$

نوجد الآن ΔV_3 (شكل 5-26):

شكل (5-26).

$$\Delta V_3^+ = \Delta V_3^- = \frac{V_{aa'}^+}{\sum Z^+} \times -j(0.08 + 0.2)$$

$$= -j0.28 \frac{0.1068 + j0.1424}{j0.311} = 0.042 - j0.056$$

$$\Delta V_3^0 = -V_{aa'}^0 = -0.1068 - j0.1424$$

$$\Delta V_3 = \Delta V_3^0 + \Delta V_3^+ + \Delta V_3^- = -0.191 - j0.255$$

$$V_3' = 1 + \Delta V_3 = 0.809 - j0.255$$

$$= 0.848 \angle -17.5^\circ \text{ pu}$$

وهو توتر الطور a للباس 3 أثناء العطل.

5-6-2 عطل انقطاع طورين Two open conductor:

نفرض عطل انقطاع الطورين b و c.

الشروط الحدية :

$$V_{aa'} = V_{aa'}^0 + V_{aa'}^+ + V_{aa'}^- = 0 \quad (5-35)$$

$$I_b = 0 \quad ; \quad I_c = 0 \quad (5-36)$$

من (5-36) نجد

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = I_a / 3 \quad (5-36)$$

وهذا يعني أنه يجب توصيل شبكات ثغنين للمركبات المتناظرة على التسلسل (الشكل 5-27).

الشكل (5-27) الدارة المكافئة لعطل انقطاع طورين.

معادلات عطل انقطاع طورين هي:

$$\begin{aligned}
 V_{aa'}^+ &= I_{mn} Z_{FF'}^+ - Z_{FF'}^+ \frac{I_{mn} Z_{FF'}^+}{\sum_{+,-,0} Z_{FF'}} \\
 &= I_{mn} \frac{Z_{FF'}^+ (Z_{FF'}^- + Z_{FF'}^0)}{\sum Z_{FF'}} \\
 V_{aa'}^- &= -I_{a1} Z_{FF'}^- = I_{mn} \frac{-Z_{FF'}^+ Z_{FF'}^-}{\sum Z_{FF'}} \\
 V_{aa'}^0 &= -I_{a1} Z_{FF'}^0 = I_{mn} \frac{-Z_{FF'}^+ Z_{FF'}^0}{\sum Z_{FF'}}
 \end{aligned} \quad (5-38)$$

مثال (5-7):

أعد حل المثال (5-6) إذا حصل عطل انقطاع الطورين b و c على خط النقل 2-3.

الحل:

باعتبار أن الدارة المكافئة للعطل تسلسلية وأن $Z_{FF}^0 = \infty$ فلا يوجد نقل للاستطاعة في المنظومة المدروسة. والتفسير الفيزيائي لهذا أنه لا تُنقل الاستطاعة على طور واحد في الوقت الذي لا يوجد مسار عودة للتيار في النظام الصفري.

مسألة للحل: تُعطى منظومة القدرة الموصوفة في المثال (5-6) مع التعديلات التالية:

$$T_1, T_2 : Y \quad Y$$

يستجر المحرك حمولة 80 MVA بعامل استطاعة متأخر 0.85 وتوتر 345 kV في الباس 3. احسب التغير في توتر الباس 3 عندما يتعرض خط النقل (a) لعطل انقطاع الطور (b) لعطل انقطاع طورين b و c.

5-7 تطبيقات على الحاسوب:

التطبيق 1 :

اكتب برنامج MATLAB لتحليل العطل طور - أرض LG واستخدمه لحل المثال (5-2) بواسطة الحاسوب.

الحل :

البرنامج المنجز مبين في الشكل (5-28) ونتائج الحل الحاسوبي مبين في الشكل (5-29)

التطبيق 2:

اكتب برنامج MATLAB لتحليل العطل طور - طور LL واستخدمه لحل المثال (5-3) بواسطة الحاسوب.

الحل :

البرنامج المنجز مبين في الشكل (5-30) ونتائج الحل الحاسوبي مبين في الشكل (5-31)

التطبيق 3 :

اكتب برنامج MATLAB لتحليل العطل طورين مع الأرض LLG واستخدمه لحل المثال (5-4) بواسطة الحاسوب.

الحل :

البرنامج المنجز مبين في الشكل (5-32) ونتائج الحل الحاسوبي مبين في الشكل (5-33).



الشكل (5-28) برنامج التطبيق 1



الشكل (5-29) نتائج الحل الحاسوبي للتطبيق 1



الشكل (5-30) برنامج التطبيق 2



الشكل (5-31) نتائج الحل الحاسوبي للتطبيق 2



الشكل (5-32) برنامج التطبيق 3



الشكل (5-33) نتائج الحل الحاسوبي للتطبيق 3



الفصل السادس

نظم التأريض

Earthing Systems

1-6 مقدمة:

التأريض هو ربط التجهيزات مع الأرض بواسطة ناقل ذي مقاومة مهمة وهذا يجعل كمون هياكل التجهيزات مساوياً للصفر، وهذا يتطلب لحظ بئر أرضي يتكون من قطب أرضي (مأخذ أرضي) بأشكال مختلفة، يطمر في التربة لأعماق معينة. وينبغي أن يحقق البئر الأرضي المتطلبات التالية:

- 1- أن يكون ذا ناقلية جيدة (مقاومة ضعيفة) بحيث يؤمن حماية فعالة للأشخاص والتجهيزات وتشغياً لدارات الحواكم (ويقصد بهذا أن يكون تيار العطل الأرضي أكبر من الحد الأدنى لتيار الحاكمة (Lowest current relay setting) .
 - 2- أن يكون قادراً على تحمل وتبديد تيارات العطل والتيارات العابرة .
 - 3- أن تكون مكوناته المغمورة في الأرض مقاومة للتآكل في التربة .
 - 4- أن يكون ذا خواص ميكانيكية مناسبة (كأن يكون الوند الأرضي مثلاً مصمماً بحيث يسهل دقه ودخوله في التربة) .
- وتتعلق مقاومة التأريض بشكل رئيسي بنوع قطب التأريض (أي القسم المغمور في التربة من نظام التأريض) ونوعية التربة.
- نميز نوعين رئيسيين للتأريض في نظام قدرة كهربائية:

2-6 تأريض النظام (تأريض التشغيل):

هو وصل نقاط من نظام القدرة بشكل مقصود بالأرض، مثل تأريض النقطة النجمية (نقطة الحياد) لمنوبة أو لمحولة، تأريض مفرغات الصواعق Lightning

Arrestors، تأريض الخط الحيادي. ويطلق على هذا النوع من التأريض باللغة الانكليزية Neutral (system) grounding.

إن تأريض النقطة النجمية له أهمية بالغة، وتأثير كبير على أداء نظام القدرة في حالات الأعطال وفي مجال الاستقرار والحماية..الخ. في معظم نظم التوتر العالي الحديثة تؤرض نقط الحياد للنظام مباشرة، أي توصل النقطة الحياضية مباشرة إلى الأرض دون أية ممانعة (التأريض المباشر Solid grounding). وبشكل عام تؤرض النقطة النجمية للمنوبات عن طريق مقاومة بهدف تخفيض تيار القصر، وأداء أفضل من حيث الاستقرار.

ولتأريض النقطة النجمية الفوائد التالية:

- 1- تثبيت توتر الطور (أي التوتر بين الطور والحيادي) على قيمة التوتر بين الطور والأرض.
- 2- إمكانية استخدام حواكم الحماية الحساسة Sensitive relay لأجل عطل طور- أرض.
- 3- تفريغ التوترات الزائدة الناجمة عن البرق إلى الأرض، بينما يحصل انعكاس موجب (موجة التوتر منعكسة) عند النقطة النجمية المعزولة .
- أما فوائد العمل بنقطة حياض معزولة فهي:
- 4- من الممكن استمرار التغذية رغم وجود عطل أرضي وحيد الطور .
- 5- تقليل التداخل مع خطوط الاتصالات بسبب غياب التيارات الصفيرية .

تعريف:

آ- الأرضي المفضل أو (كمون الأرض المرجعي) :

وهي القسم من الأرض الذي ينعلم فرق التوتر بين نقطتين ما من نقاطه عند مرور تيار في الأرضي الذي يقع في المكان المجاور.

- ب- مقاومة الانتشار الأرضية (مقاومة الأرضي):
وهي المقاومة الكهربائية للقسم من التربة الذي يقع بين الأرضي وكمون الأرض المرجعي.
- ج- توتر الأرض:
وهو فرق التوتر الحاصل بين الأرضي وكمون الأرض المرجعي عند مرور التيار في الأرضي.
- د- المسار الخطي للتوتر:
وهو تدرج هبوط التوتر نحو الأرض المفضلة.
- هـ- تعديل المسار الخطي للتوتر:
بحيث يصبح التوتر أفقياً في منطقة العمل وبالتالي يمكن تخفيف خطورة توتر التماس وتوتر الخطوة، ويتطلب ذلك إجراءات خاصة.
- و- توتر التماس :
وهو التوتر الذي يمكن اختصاره من المسار الخطي للتوتر عن طريق جسم الإنسان إلى الأرض.
- ز- توتر الخطوة :
وهو القسم من التوتر الأرضي الذي يقصر عن طريق قدمي إنسان ما وهو يسير بخطا كبيرة (1m). إذ يسري التيار من إحدى القدمين ويخرج من الأخرى.
- إن تيار العطل الأرضي بمروره في القطب الأرضي يولد فرقاً في التوتر V_1 يرتفع إليه توتر الكتل المحمية بالنسبة للأرض المفضلة البعيدة عن البئر الأرضي. إن تدرج هذا التوتر حول القطب الأرضي يأخذ الشكل المتناقص حتى ينعدم تقريباً في الأرض المفضلة البعيدة (الشكل 6-1) .



الشكل (6-1) بعض التعاريف /2/.

1-2-6 نظام التأريض الفعال المباشر Effectively Grounded System:

يعتبر النظام أو جزء منه مؤرضاً تأريضاً مباشراً أو فعالاً إذا كانت نسبة المفاعلة الصفيرية إلى المفاعلة الموجبة (X_0/X_1) لا تتجاوز 3 ونسبة المقاومة الصفيرية إلى

المفاعلة الموجبة لا تتجاوز الواحد وذلك في كل نقاط النظام أو الجزء المعني من النظام مهما كانت ظروف التشغيل ومهما كانت استطاعة المولدات.

إن التأريض الفعال (المباشر) هو أقل كلفة من أنواع التأريض الأخرى ولكل مستويات التوتر لأنه في مثل هذا النظام لا يتجاوز التوتر بين الخط الحيادي في حالة العطل 80% من توتر الخط، بينما يرتفع توتر الطور في بقية أنواع نظم التأريض إلى 100% من توتر الخط.

6-2-2 النظام غير المؤرض أو المعزول Ungrounded system :

يبين الشكل (6-2) نظام ثلاثي الطور ذا نقطة حيادي معزولة مبيناً عليه السعات التفرعية. في ظروف التشغيل المتوازنة يكون كمون نقطة الحيادي قريباً من كمون الأرض وتتقدم التيارات في الأطوار على التوترات الموافقة لها بمقدار 90° ، وهذه التيارات مزاحة عن بعضها البعض بمقدار 120° وبالتالي فإن محصلتها تساوي الصفر (الشكل 6-2b).

بفرض وجود عطل طور مع الأرض على أحد هذه الأطوار وليكن الطور c، في هذه الحالة ينخفض التوتر عبر السعات التفرعية لهذا الطور إلى الصفر بينما ترتفع قيمة التوتر على الأطوار السليمة إلى قيمة توتر الخط ($\sqrt{3}V_{ph}$) وتكون مزاحة بمقدار 60° بدلاً من 120° . ويكون تيار الشحن في هذه الحالة أكبر بثلاث مرات من تيار الشحن للطور الواحد في ظروف التشغيل المتوازنة (الشكل 6-2c).

ويؤدي وجود المحارضات والسعات في النظام إلى ما يسمى بالعطل الأرضي (القوس الأرضي) حيث يمكن لتوتر النظام أن يرتفع إلى قيم خطيرة. ويمكن تجنب هذه

التوترات تربط محارضة بقيمة مناسبة بين نقطة الحيادي والأرضي، فإذا تم اختيار قيمة المفاعلة التحريضية بحيث يكون تيار العطل I_F يوازن تماماً تيار الشحن فنقول إنه لدينا في هذه الحالة تأريض طيني أو تأريض عبر وشيعة بترسون.

الشكل (6-2) النظام غير المؤرض

(a) نظام ذو نقطة حيادي معزولة ووجود عطل على الطور c ، (b) المخطط الشعاعي للنظام السليم، (c) المخطط الشعاعي بوجود العطل على الطور c

3-2-6 التأسيس الطيني Resonant Grounding:

إذا وضعنا محارضة بقيمة مناسبة بين الحيادي والأرضي بحيث يوازن I_F تيار العطل السعوي أي:

$$I_F = 3I_C$$

فإن التأسيس في هذه الحالة يعرف بالتأسيس الطيني أو وشيعة بترسون نسبة إلى مكتشفها عام 1916. نظرياً في هذه الحالة لا يوجد تيار عطل أو أنه بقيمة صغيرة بحيث أن القوس الكهربائي لن يستمر وبالتالي سيزول العطل (شكل 6-3) بفرض V_{ph} توتر الطور على النظام، وبالتالي فإن التوتر على الأطوار السليمة خلال حدوث عطل طور مع الأرض على أحد الأطوار سيكون $\sqrt{3}V_{ph}$ وإذا كانت C سعة كل طور مع الأرض فإن تيار الشحن عند ذلك سيكون $3V_{ph}\omega C$.

الشكل (6-3) التأسيس الطيني.

(a) نظام ثلاثي الطور ذو تأسيس طيني، (b) المخطط الشعاعي لنظام القدرة في الحالة a

إذا كانت L المحارضة التي سيتم ربطها بين نقطة الحيادي والأرض فيكون لدينا

$$I_F = \frac{V_{ph}}{\omega L}$$

وفي ظروف التشغيل المتوازنة:

$$I_F = 3V_{ph}\omega C = \frac{V_{ph}}{\omega L}$$

أو

$$L = \frac{1}{3\omega^2 C}$$

وهي قيمة المحارضة التي تحقق التأريض الطيني.

إن استخدام هذا النوع من التأريض سيقول من حالات انقطاع التغذية الناجمة عن الأعطال العابرة على الخطوط وهو ما لا يمكن تحقيقه باستخدام أنواع أخرى من التأريض.

أيضاً باستخدام التأريض الطيني يمكن تقليل الحالات التي يتطور فيها عطل طور مع الأرض إلى عطل طورين أو ثلاثة أطوار.

ويمكن حساب استطاعة وشيعة بيترسون من العلاقة:

$$Q_L = I_F \cdot V_{ph} \quad Mvar$$

فمثلاً استطاعة الوشيعة لشبكة 110 ك.ف، وتيار 100 أمبير، هي:

$$100 \times 110 / \sqrt{3} \times 10^{-3} = 6.3 \quad Mvar$$

للحفاظ على توازن دائم بين تيار الوشيعة والتيار السعوي لظروف متغيرة في الشبكة، فمن الضروري أن تزود الوشيعة بإمكانيات التحكم بمحارضتها. وحسب ذلك نميز نوعين للوشائع.

– الوشيعة التقليدية (الشكل 6-4 a)

يتم التحكم بمحارضتها عن طريق تغيير عدد لفاتها في حالة اللاحمل. في الغالب تستخدم وشائع بيترسون لتيارات اسمية 100، 50، 25 أمبير، ومجال التحكم لها 2:1 على 5-8 مراحل تحكم، مثلاً وشيعة 100 أمبير: 100، 85، 70، 60، 50 (مراحل تحكمها).

– الوشيعة ذات القلب الغاطس (الشكل 6-4 b)

عن طريق تغيير المقاومة المغناطيسية لها (تحريك القلب) بنسبة 1:10 يمكن التحكم المستمر والناعم بتيار الوشيعة وفي حالة الحمل، أي أثناء العطل أيضاً، وذلك لأن اللفات تبقى ذاتها موصلة. يجب الانتباه إلى مدى التحميل المسموح للنقطة النجمية للمحولات لدى استخدام الوشيعة. إذ أن بعض المحولات لا تكون نقطتها النجمية معزولة بشكل كاف. بشكل عام تناسب هذه الوشيعة المحولات الموصلة نجمي/ مثلثي والمحولات نجمي/نجمي/مثلثي (ملف التوازن)، ولا تناسب المحولات نجمي/ نجمي (دون ملف مثلثي) والمحولات الذاتية ذات نسبة التحويل الأكبر من 0.95-1.

الشكل (6-4) أنواع وشائع بيترسون حسب طريقة بنائها /12/.

لحماية الوشيعية من التيار الزائد يلحظ قاطع آلي مع مقاومة على التفرع مع الوشيعية (الشكل 5-6). القاطع مفتوح في الحالة العادية، ولكنه يغلق عندما تتحسس الحاكمة تياراً زائداً وتغلق دائرة وشيعة الإطلاق، فيمر التيار عندها في فرع المقاومة.

الشكل (5-6) وصل وشيعة بيترسون عبر قاطع آلي.

مثال (1-6):

خط نقل ثلاثي الطور 132 kV، 50Hz، طوله 192 km ويتكون من ثلاثة نواقل قطر كل منها 20 mm متوضعة على مستوي أفقي وتبعد عن بعضها البعض بمقدار 4m.

على فرض أن الخط مبدل فأوجد محارضة وشيعة بيترسون واستطاعتها بالـ KVA في هذا النظام.

الحل:

تُعطى السعة لكل طور بالعلاقة:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{d}{r}} \text{ F/m}$$

أو

$$C = 0.896 \times 10^{-11} \times 192 \times 10^3 = 172 \times 10^{-3} \text{ F} = 1.72 \text{ } \mu\text{F}$$

ومن العلاقة:

$$\omega L = \frac{1}{3\omega C}$$

لدينا

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{3\omega^2 C} = \frac{10^6}{3 \times 314^2 \times 1.72} \\ &= \frac{10^6 \times 10^{-4}}{5.16 \times 9.86} = 1.97 \text{ henry} \end{aligned}$$

أما استطاعة الوشيعة فتحسب من العلاقة

$$\frac{V^2}{3\omega L} = \frac{132 \times 132}{3 \times 314 \times 1.97} = 9.389 \text{ MVA}$$

4-2-6 طرق تأريض نقطة الحيادي Methods of Neutral Grounding:

هناك طرق مختلفة لتأريض نقطة الحيادي في نظم القدرة الكهربائية وهي:

1- التأريض المباشر .

2 - التأريض بمقاومة.

3- التأريض بمفاعلة.

4- التأريض بمحولة.

وسنستعرض بشيء من التفصيل هذه الأنواع من التأريض:

6-2-4-1 التأريض المباشر أو الفعلي :

Solid Grounding or Effective Grounding:

يبين الشكل (6-6a) نظام قدرة كهربائي ذا تأريض صلب (مباشر) ويعرف أيضاً بالتأريض الفعال، ولنفرض وجود عطل طور- أرض على الطور c. في هذه الحالة كمون نقطة الحيادي وكمون نقطة نهاية الطور c مساوٍ لكمون الأرض. ويبين الشكل (6-6b) الشعاع المعكوس عند V_c ، ويتضح من هذا الشكل أن تيار الشحن يختفي في هذه الحالة أما التوترات والتيارات على الأطوار السليمة فتبقى دون تغيير. وبما أن توتر الأطوار السليمة في هذا النوع من التأريض عند حدوث عطل طور مع الأرض لا يتجاوز 80% من توتر الخط وبقيمة أقل مما هي عليه بالمقارنة مع الأنواع الأخرى للتأريض فإن كلفة التجهيزات ولمختلف مستويات التوتر تكون أقل. واعتباراً من التوتر 115 kV وما فوق فإننا نحصل على توفير أكبر حيث أن كلفة عزل المحولات في هذه الحالة تصبح أقل.

الشكل (6-6a) نظام قدرة ذو تأريض مباشر.

الشكل (6-6b) المخطط الشعاعي للنظام (6-6a)

إضافة إلى ذلك في هذه الحالة لا يوجد قيود على طول خطوط الشبكة لأن السعات ليس لها دور في حالة العطل كما أن العطل يلحظ من قبل حمايات الشبكة الاعتيادية.

ومقابل هذه الفوائد فهناك بعض المساوئ فمثلاً كل عطل أرضي في هذه الحالة يؤدي إلى عمل القاطع الآلي أي إجهاد متكرر للقواطع وصيانة وإصلاح أكثر، كما أن العطل الأرضي المستمر على أحد الأطوار يستوجب فصل الخط وهذا يعني انقطاع التغذية، لذلك لا بد من وجود تغذية حلقة للمحافظة على ذات الوثوقية.

يتطلب تيار العطل الكبير المنساب إلى الأرض كلفة إضافية لنظام تأريض الحماية والتشغيل للمحطات والأبراج وذلك لجعل توترات التماس والخطوة ضمن حدودها المسموحة بالإضافة إلى ذلك فإنه في هذه الحالة قد تتأثر خطوط الاتصالات المجاورة للشبكة.

2-4-2-6 التأسيس بمقاومة Resistance Grounding

ويقصد به تأريض نقطة الحيادي بمقاومة أومية بحتة، وتكون قيمة المقاومة شكل (6-7) التي تربط بين نقطة الحياد والأرض عالية في الغالب بالمقارنة مع مفاعلة النظام وذلك لتخفيض الضياع الحراري فيها أثناء العطل الأرضي. وكلما ارتفعت سوية التوتر الاسمي، كلما ازدادت قيمة المقاومة المطلوبة، وذلك للحد من تيار العطل. يستخدم تأريض المقاومة عادة في الحالات التي يكون فيها تيار العطل السعوي صغيراً، مثلاً لأجل خطوط هوائية قصيرة ذات توتر منخفض.

في بعض الحالات كان تأريض المقاومة مفيداً في تحسين استقرار النظام أثناء العطل الأرضي، وتعليل ذلك هو أن الاستطاعة المستجرة من الشبكة قد انخفضت بسبب العطل (صحيح أن التيار كبير ولكن توتر شبه معدوم) بمقدار يساوي تقريباً الاستطاعة الضائعة في مقاومة التأريض، والنتيجة عدم ارتفاع مقلق لزاوية الاستقرار الضرورية لعمل المنوبات.

الشكل (6-7) نظام قدرة مؤرض بمقاومة (a)، المخطط الشعاعي (b)

3-4-2-6 التأريض بمفاعلة Reactance grounding:

يقصد به تأريض نقطة الحيادي عن طريق ممانعة تغلب عليها الصفة التحريضية. إن النسبة Z_0/Z_1 هي التي تقرر فيما إذا كان النظام ذا تأريض مباشر أم تأريض مفاعلة وفقاً للآتي:

لأجل النظام ذي التأريض المباشر $Z_0 / Z_1 < 3$

لأجل النظام ذي تأريض مفاعلة $Z_0 / Z_1 > 3$

ولتوضيح ما ذكر نفرض نظام قدرة مؤرضاً في الواقع تأريضاً مباشراً وفيه $Z_0 / Z_1 > 3$ ، فيعتبر مع ذلك أن النظام ذو تأريض مفاعلة.

إن تأريض المفاعلة هو حالة تأريض تقع بين التأريض المباشر والتأريض الطيني.

تُصمم المفاعلة بحيث تبقى تيارات العطل الأرضي ضمن الحدود المسموحة، وهذه الحدود هي:

لشبكات التوتر المتوسط 1000-1500 أمبير .

لشبكات 110 ك.ف 5 ك.آ .

وهذا يتطلب ممانعة تأريض من رتبة 20-60 أوم.

هذا النوع من التأريض يمكن أن يستعمل لتأريض نقط الحياد للمحركات والمعوضات المتواقة، وكذلك للشبكات ذات تيارات سعوية كبيرة.

6-2-4-4 التأريض بمحولات تأريض Grounding Transformers:

إذا كانت النقطة النجمية غير متوفرة (مثلاً وصلة مثلثية، باسبارات،...) يستخدم محول تعرجي zig-zag transformer هذه المحولات ليس لها ملف ثانوي الشكل (6-8) . كل ذراع في قلب المحول له ملفان متماثلان وملفوفان بشكل تفاضلي بالنسبة لبعضهما البعض بحيث أن الفيض الإجمالي في كل ذراع صغير لدرجة يمكن إهماله، وبالتالي فالمحول يسحب تيار تمغنط صغير جداً. تكون محولات التأريض مصممة لتعمل لفترات زمنية قصيرة (10 ثانية إلى دقيقة واحدة)، وبالتالي فحجمها صغير بالمقارنة مع محولات القدرة ذات المواصفات الاسمية نفسها.

الشكل (6-8) محول تعرجي لتأريض النقطة الحيادية.
إذا لم يتوفر محول تعرجي، يمكن استعمال محول نجمي مثلثي كما في الشكل
(6-9)، بدون تحميل الثانوي.

الشكل (6-9) تأريض الحياد
بمحول نجمي مثلثي.

6-2-4-5 توصيات عامة:

- 1- بين التوليد والتوزيع، يوجد سويات توتر مختلفة، ومن المرغوب والمفضل أن يكون هناك تأريض النقطة النجمية في كل مستوى توتر .
- 2- تؤرض المنوبات عادة بمقاومة، وتؤرض المحركات والمعوضات المتوافقة بمقاومة.

- 3- لأجل المنوبات الموصلة إلى باسبار حيادي مشترك، يؤرض الباسبار المشترك بجهاز تأريض وحيد، ويمكن استخدام قاطع فاصل واصل بين النقطة النجمية لكل مولد والباسبار العام لتأريض المولد المرغوب تأريضه .
- 4- لأجل المنوبات التي تعمل على التفرع، تؤرض فقط النقطة النجمية لإحدى المنوبات، وذلك لتفادي تداخل التيارات الصفرية . عادة يوجد نظاما تأريض في محطة توليد، ويستخدم أحدهما فقط والآخر يستعمل كاحتياط.
- 5- لأجل التوترات حتى 600 فولت، والتوترات الأكبر من 33 ك ف نستخدم التأريض المباشر، ولأجل التوترات المتوسطة بين 3.3 ك ف و 33 ك ف فيستخدم تأريض مقاومة أو تأريض مفاعلة.

6-2-5 تأريض الشبكات الهوائية (خط الحماية):

يقوم خط الحماية في الشبكات الهوائية بالوظائف الرئيسية التالية:

- 1- حماية الخطوط الكهربائية من العوامل الجوية وتفريغ الشحنات .
 - 2- ربط مآخذ التأريض العائد للأبراج مع بعضها وبالتالي الحصول على مقاومة إجمالية منخفضة وهذا ما يؤدي إلى تحسين ربط الأبراج مع التربة .
 - 3- حماية شبكات الاتصالات السلكية القريبة والموازية، من الشبكة الكهربائية إذ يتولد في شبكة الخطوط الهاتفية تيارات تحريض وتوترات تصل إلى درجة الخطورة .
- وهنا يأتي دور خط الحماية ليشكل غلاف وقاية يخفف من شدة السيالة المغناطيسية التي تعترض خطوط الاتصالات الهاتفية وتشكل في دارتها قوة كهربائية محركة متحيزة تتعلق بحسن ناقلية خط الحماية وضعف مقاومة التأريض فيه (يكون هذا التوتر مزعجاً أو خطراً على الشبكات الهاتفية) .
- وتستعمل خطوط الحماية :

- 1- في المناطق التي يكثر فيها سقوط الصواعق .
 - 2- في المناطق التي تمر فيها الخطوط الكهربائية قرب خطوط الشبكات الهاتفية وبصورة متوازية .
 - 3- قرب محطات التحويل وعلى الخطوط التي تدخل أو تنطلق من هذه المحطة وعلى مسافة 2 كم تقريباً منها يستعمل خط الحماية من (الفولاذ المغلفن) أو ناقل (الألمنيوم فولاذ) وإن التجارب أوضحت أن نصف الزاوية العامودية التي يحميها خط الحماية تعادل 30 درجة .
- وبصورة عامة فإن خط الحماية يساهم في تسهيل سيلان تيار الخطأ عبر مأخذ تأريض الأبراج وبالتالي تحسين مقاومة شبكة التأريض للخطوط والمحطة.
- وتشير العديد من النظم العالمية إلى أن خطوط التوتر المتوسط 20 ك ف لا تحتاج لتركيب خط حماية من الصواعق وذلك تخفيفاً للنفقات التأسيسية للخط من جهة ولأن مسألة وثوقية التغذية له تأتي في المرتبة الثالثة في شبكة خطوط النقل من جهة أخرى. الأمر الآخر هو أن عدد أيام الصواعق في سورية قليل نسبياً ويبلغ الحد الأقصى له 37 يوماً، فإذا حسبنا عدد الصواعق المحتمل وقوعها على خط طوله 30 كم وارتفاع أعلى ناقل فيه 13 م خلال عام لوجدنا:

$$2 = 10^{-4} \times 30 \times 12 \times 37 \times 1.5 \text{ صاعقة في العام}$$

أما خطوط 400 ك ف في سورية فلها ناقلاً حماية على طولها لأن وثوقيتها تأتي في المرتبة الأولى من جهة، ولأن أبراج هذه الخطوط جاذبة للصواعق.

ونشير هنا إلى أنه بالإضافة إلى أرضي التشغيل الذي يركب في مركز التحويل أو بالقرب منه، يتوجب تركيب مؤرضات إضافية في شبكة التوتر المنخفض وفق ما يلي:

- مؤرض كل 200-250 م على طول الشبكة، يوصل إليها الخط الحياضي.

- مؤرض إضافي عند علب الوصل.
- مؤرض إضافي عند علب توزيع الشبكة الأرضية.
- يجب أن لا تزيد مقاومة المؤرض الإضافي عن 10 أوم.

6-2-5-1 تأريض الأبراج:

الهدف ربط البرج المعدني كهربائياً مع الأرض لتمرير تيار العطل الأرضي والذي يمكن أن يكون مصدره:

- انخيار عوازله، من برج آخر عن طريق خط الحماية.
 - تفريغ مباشر من الجو على البرج.
- التأريض ضروري لتفادي حدوث قوس كهربائي (انخيار خارجي) في سلاسل عوازل الأطوار السليمة من الخط.
- تفادي وجود تدرج لفرق التوتر من البرج إلى الأرض المحيطة به، إذ يشكل خطراً على الكائنات الحية قرب البرج وعلى الأخص على عناصر الصيانة.

6-2-5-2 ناقل التأريض:

وبالنظر لكبر التيارات التي من الممكن أن تمر في ناقل التأريض للبرج، لذا فإنه من المفضل إعطاء هذا الناقل المقطع الملائم بحيث لا تزيد مقاومته عن 1 أوم ونظراً لصغر طول هذا الناقل، فإن هذا الأمر متيسر ويستعمل لهذه الغاية:

أ- ناقل من الحديد المغلفن: ويكون من الحديد الصافي المغلفن ذي مقطع 50 mm^2 ومن مساوئ هذا الناقل أنه يتلف في الأرض بمدة أسرع من النواقل الكلاسيكية (نحاس/المنيوم)، التي لا تستعمل غالباً في التأريض لغلاء ثمنها وتعرضها للسرقة (نحاس) أو لعدم توفر متانتها الميكانيكية وعدم تلاؤمها مع المواد العضوية في التربة (المنيوم).

ب- ناقل ارمكو (armco): ويتألف من الحديد الصافي وغير قابل للصدأ وذو نسبة عالية من الفحم وتركيبه: حديد 91.7 ، منغنيز 2.6، كبريت 2.5، فحم 2.1، فوسفور 1.1.

ويستعمل بشكل قضيب مبروم قطر 8 mm (50 mm^2).

ج- الوصلات: يجب أن تسمح نقاط الوصل بناقلية كهربائية عالية مستمرة وأن تكون مستوية ونظيفة وغير معزولة بمواد زيتية ولا تتأثر بالصدأ. ويتم وصل ناقل التأريض مع قائم البرج بواسطة وصلات خاصة غير قابلة للصدأ (وذات رنديلات خاصة) ويتفادى الوصل باللحام لتجنب تأكسد مناطق اللحام.

لذلك فإنه يعتمد في المناطق التي يخشى فيها سرقة هذه القطع إلى تعطيل سن البرغي قرب العزقة (بضربة مطرقة على إزميل مدبب). أما عند ضرورة إجراء وصل ناقل التأريض، فيمكن تأمينه بواسطة قطعات وصل خاصة أو بأجراء اللحام الكهربائي مع وضع الدهان الواقي من الصدأ أو لف منطقة اللحام بالقماش المزفت.

6-2-5-3 حلقات التأريض :

وهي الطريقة الفنية والاقتصادية لتأريض الأبراج في الأراضي العادية، ويتم طمر ناقل التأريض بشكل حلقة مغلقة في أسفل الحفرية (على عمق 325 cm) وعلى محيط القاعدة البيتونية وربط طرف هذه الحلقة إلى مرتبط قائم البرج، كما يتم طمر حلقة أخرى على عمق 150 cm وعلى محيط القاعدة البيتونية ويربط طرف هذه الحلقة أيضاً إلى مرتبط قائم البرج، وذلك لإمكانية الحصول دائماً على درجة جيدة من رطوبة التربة بمختلف الأعماق.

أما الأبراج التي يكون لكل قائم من قوائمها الأربعة قاعدة مستقلة فيوضع لكل قائم حلقتان من نواقل التأريض.

ويجب ألا تزيد مقاومة الأرضي للبرج الحديث التركيب عن 20 أوم حيث تنخفض هذه المقاومة إلى النصف بعد مضي 2-3 سنوات من التركيب، وذلك نتيجة تراص تراب الردميات حول بيتون القاعدة. وفي حال تجاوز هذه القيمة، يعتمد إلى إجراء تحسينات على الأرضي.

تحسين أرضي الأبراج:

سبق أن ذكرنا أن مجموع قيمة مقاومات التأريض لبرج يجب أن لا تزيد عن 20 أوم، وحين لا نتمكن من الحصول عليها يعتمد إلى تحسين هذه القيمة بالطريقة التالية (الشكل 6-10):

الشكل (6-10) تحسين أرضي الأبراج.

يحفّر في الأرض الرطبة والقريبة من أحد قوائم البرج خندق مستقيم بطول تقريبي 25 متراً وبعرض 0.30 متراً وعمق 0.5 متر ويوضع ضمنه ناقلان غير متلامسين يربطان بقائم البرج، ويتباعد الناقلان في النهايتين بشكل حرف V ويُطمر بالتراب الرطب، وهذه الطريقة مستخدمة عندما تكون مقاومة الأرضي في المجال (10-30) أوم.

وعندما تكون مقاومة الأرضي في المجال (100 فما فوق) أوم يتم إجراء حفرتين بهذا الشكل.

الخطر الكامن بجوار مأخذ تأريض الأبراج:

قد يفكر بعضهم أن ربط أحد القوائم بالأرض كاف ليكون البرج بنفس كمون الأرض في موقع المأخذ والأرض المحيطة وهذا غير صحيح. إذ بفرض استخدام صفيحة معدنية أو وتد أو حلقات تأريض قرب أحد القوائم، فعند مرور تيار العطل يحصل فرق في الكمون في الأرض ويتدرج هذا الفرق نحو كمون الأرض المرجعي كما في الشكل (6-11).

يلاحظ أنه من أجل تربة سيئة أو جافة فإن البرج يبقى بفرق كمون مختلف عن الأرض ذاتها ويزداد هذا الفرق بكم تيار العطل الذي يسري عبر ناقل التأريض. ويزداد فرق الكمون اعتباراً من المأخذ الأرضي حسب البعد عنه.

الشكل (6-11) المساحة المتساوية
الكمون حول المأخذ الأرضي لبرج.

- يتشكل الخطر حين اقتراب شخص من البرج ولمسه لأحد قوائمه البعيدة عن مأخذ التأريض ونتيجة لوجود فرق في الكمون بين القوائم والأرض.
- يتشكل الخطر أيضاً عندما يسير الشخص بخطى واسعة من قائم إلى آخر، لأنه يلمس بقدميه المتباعدتين نقطتين ذات تباين في التوتر ويمر عندها تيار

في الشخص يزداد حسب تدرج فرق التوتر وحسب نوع التربة وحسب قيمة مقاومة تماس القدمين مع الأرض.

- كما يمكن أن يحدث فرق في الكمون بشكل عامودي عندما تكون الأجزاء العلوية مبللة في حين تكون الأجزاء السفلية جافة ويظهر هذا الفرق عند لمس تسليح الكابلات الأرضية قرب البرج.

ولهذا يجب الانتباه جيداً عند تأريض الأبراج واعتماد الحلول التي تبعد المحاذير السابقة ومن هذه الحلول وضع الحلقات حول بيتون القوائم الأربع واختيار الأتربة الناعمة والنظيفة من الشوائب والأحجار الكبيرة قدر الإمكان، عند الردم حول القاعدة البيتونية بعد صبها.

1- ويوضع حجم من الأتربة يزيد عن حجم الحفيرة المراد ردمها وذلك للحصول على مستوى واحد للأرض بعد هبوط وتراص التربة مع الزمن، وتفادي جعل بؤرة تجمع مياه حول القاعدة.

2- كما يجب الانتباه لربط القوائم الأربعة بناقل تأريض في حال:

- وجود أبعاد كبيرة بين كل قائم وآخر.

- نوعية سيئة لتربة البرج التي يقع فيها (ذات مقاومة عالية).

3- وأخيراً قد يكون ناقل التأريض مقطوعاً عند مربطه في البرج نتيجة السرقة أو العبث، وبالتالي فإن ذلك يؤدي إلى المحاذير المذكورة أعلاه ويشكل خطراً على ورشة الصيانة أو الأشخاص الذين يمرون قرب البرج.

4- وينصح العاملون عند اقتراحهم من البرج بأن تكون خطاهم صغيرة وأن يتحققوا من وجود ناقل التأريض قبل لمس البرج وأن يستعملوا التجهيزات الخاصة التي تحقق لهم سلامة العمل.

6-2-6 التأريض في مركز التحويل (20/0.4 kV):

يشمل التأريض في هذا النوع من المراكز النواحي الأساسية التالية:

1- تأريض جميع الهياكل والكتل المعدنية للمركز، وهي تلك التي لا تدخل ضمن الدارة الكهربائية ولكنها لأسباب طارئة قد تتكهرب نتيجة (فشل عازلية أو حدوث قوس كهربائي) ويدخل ضمن ذلك:

- قواعد تجهيزات التوتر المتوسط.
 - كتل الدارات على طرف التوتر المتوسط والمنخفض (غمدة، صفائح، تسليح،... الخ).
 - أبواب الخلايا.
 - سكاكين التأريض.
 - الهيكل المعدني للمحولة.
 - أقطاب التأريض في محولات قياس التوتر المنخفض.
- 2- تأريض الخط الحيادي للمحولة (أي تأريض النقطة النجمية).
- 3- تأريض قرون التفريغ ومفرغات الصواعق.
- 4- تأريض التجهيزات المغذاة من المحولة.

مركز تحويل مركب على حامل حديدي أو بيتوني:

يتم في هذه المراكز تنفيذ نظامي تأريض منفصلين، ويبين الشكل (6-12) طريقة التنفيذ، حيث يتم تركيب أرضي الحماية عند مركز التحويل وتوصل إليه كافة الأجزاء المعدنية في المراكز بما فيها الهيكل الخارجي، ويتم عزل الحيادي عن الهيكل واللوحه وتركيب أرضي التشغيل على مسافة لا تقل عن 20 m عن مركز التحويل أو أي جزء من أرضي الحماية ويربط إلى الخط الحيادي في الشبكة.

يجب أن لا تزيد مقاومة مؤرض الحماية عن (2) أوم في فصل الجفاف ومقاومة مؤرض التشغيل عن (5) أوم.

الشكل (6-12) تأريض مركز تحويل على حامل.

– مركز تحويل بناء سقف عالي :

يتم تنفيذ نظام التأريض كما في الشكل (6-13).

الشكل (6-13) مركز تحويل ضمن بناء سقفه عال.

تابع الشكل (6-13)

حيث يتم تركيب أرضي الحماية عند مركز التحويل وتوصل إليه كل الأجزاء المعدنية والهياكل الخاصة بالتوتر المتوسط، أما ما يتعلق بالتوتر المنخفض فتوصل كل الأجزاء إلى الحيادي الخارج من المركز ويتم وضع أرضي التشغيل على مسافة لا تقل عن 20m عن مركز التحويل أو أي جزء من أرضي الحماية ويربط إلى الحيادي في الشبكة. يجب أن لا تزيد مقاومة مؤرض الحماية عن (2) أوم في الجو الجاف ومقاومة مؤرض التشغيل عن (5) أوم.

- في المناطق التي تكثر فيها الصواعق، أو في محطات الإرسال الإذاعي والتلفزيوني (حيث يستخدم هوائي عال جاذب للصواعق)، ينبغي تركيب مفرغات صواعق في جهة التوتر المتوسط، وأحياناً في جهة التوتر المنخفض أيضاً، ويبين الشكل (6-14) كيفية تأريض مركز التحويل في الحالتين. ولابد من الإشارة إلى ضرورة فصل البئر الأرضي للتوتر المتوسط عنه للتوتر المنخفض في الحالة (a)، أما في الحالة (b) حيث مفرغات الصواعق في جهة التوتر المتوسط، فيلاحظ بمران أرضيان: الأول E لتأريض

النقطة النجمية في جهة التوتر المنخفض وتأريض الهيكل، والثاني E_1 لتأريض مفرغات الصواعق والمنطقة النجمية والهيكل أيضاً.



الشكل (6-14) تأريض مركز تحويل (20/0.4 kV) مع مفرغات صواعق.
ويجب أن لا تزيد مقاومة تأريض المفرغات عن 5 أوم.

6-2-7 التأريض في محطات التحويل الخارجية:

في هذا النوع من المحطات ينبغي لحظ تأريض للأقسام التالية:

- تأريض ناقل الحماية. (1 أوم كحد أقصى) (المسافة الدنيا بين البئرين 20 متر).
- تأريض النقطة النجمية.
- تأريض مانعة الصواعق لتأمين حماية المحطة بكاملها من ضربات البرق المباشرة. ويكون لمانعة الصواعق (إن وجدت) بئر أرضي مستقل يبعد بشكل كاف عن الآبار الأخرى، ومقاومته حسب إرشادات الصانع.
- تأريض مفرغات الصواعق وقرون التفريغ كما في مراكز التوزيع. ونشير هنا إلى إمكانية استخدام بئر تأريض الحماية أو بئر النقطة النجمية لتأريض مفرغات الصواعق.

عملياً لأجل تيار قصر 20 كيلو أمبير يتم تنفيذ بئر الحماية بأن يطمر ناقل من الحديد المغلفن المبسط 40×5 مم 2 أو يطمر ناقل من النحاس العاري بمقطع لا يقل عن 70 مم 2 في التربة ويربط دون انقطاع بشكل حلقي (دخول وخروج) إلى أحد قاعدتي مختلف الحوامل المعدنية، ويوضع هذا الناقل على عمق 60-80 cm. وهذا العمق ضروري للحفاظ على تماس حسن لناقل التأريض ضمن طبقة من الأرض الرطبة وخاصة في فترة الجفاف، ويجب أن تكون مقاومة شبكة التأريض = 1 أوم على الأكثر. وذلك في شروط معتدلة لفصول السنة (ربيع- خريف). ويعتمد إلى إجراء تحسين في شبكة الأرضي حال زيادتها عن القيمة المطلوبة، وذلك بالوصول إلى التربة الجيدة الناقلية (والتي قد تكون بعيدة عن موقع المحطة) بواسطة خط الحماية (الخط الحياضي المؤرض) للخطوط الهوائية أو بواسطة رصاص الكبلات الأرضية التي تربط في المحطة مما يؤدي إلى تخفيض مقاومة التأريض بصورة كبيرة. ويتم في هذه المحطات التحقق مرة واحدة من قيمة المقاومة ويلجأ سنوياً للتحقق من سلامة واستمرار دارة التأريض.

في حال ضرورة إجراء تعديل المسار الخطي للتوتر بقصد حماية العاملين، يجب تخفيف توتر التماس والخطوة في مكان العمل، يلجأ إلى ترتيبات مختلفة منها:

- وضع حصيرة معدنية يقف عليها المختص عند العمل، وتربط هذه الحصيرة إلى شبكة التأريض، وينعدم عندها توترا التماس والخطوة (الشكل 15-6). إلا أن التوتر يكون مرتفعاً في أطراف الحصيرة مما يشكل خطراً على المختص، لذلك توضع مواد عازلة من المطاط للمحطات الداخلية ومن البحص للمحطات الخارجية.

- استخدام قطب أرضي شبكي أو مؤلف من حلقات تفرعية. إن هذا الإجراء يعدل مسار التوتر جزئياً بين نواقل التأسيس داخل منطقة العمل (الشكل 6-16).

الشكل (6-15) قطب أرضي مكون من حلقات تفرعية.

الشكل (6-16) تعديل مسار التوتر (حصيرة)

3-6 التأريض الواقي (أرضي الحماية) Protective Grounding:

يقصد به ربط القطع والكتل المعدنية غير الكهربائية (التي يُخشى أن تتكهرب بصورة مفاجئة بسبب حادث أو عطل) بواسطة ناقل يسمى بناقل التأريض (الناقل الأرضي) ليصلها إلى بئر التأريض (البئر الأرضي). والغاية من ذلك إزالة الخطر الناتج عن ارتفاع توتر هذه القطع المعدنية بالنسبة للأرض بهدف حماية التجهيزات والعاملين. ويقصد بالكتل المعدنية، الأجزاء المعدنية للتجهيزات الكهربائية القابلة للمس أو الأغلفة المعدنية التي تساهم في وقاية التمديدات الكهربائية أو القطع المعدنية العادية التي تشكل خطراً في حال تكهربها مثل، قساطل تمديدات التدفئة- حامل هوائي التلفزيون- قواعد وحوامل التجهيزات الكهربائية أغطية المحركات، جسم المحولات... الخ.

كلما كانت مقاومة نظام التأريض أقل، كلما كان التأريض أكثر أماناً وفعالية، وتتعلق مقاومة التأريض بنوعية قطب التأريض (أي القسم المطمور) ونوعية التربة. لأجل حماية الأشخاص والتجهيزات يفضل أن تكون مقاومة الأرضي أقل من 1 أوم. ولكن تحقيق هذه القيمة المنخفضة غير عملي (بشكل عام) لأجل نظام التوزيع وخط النقل وفي محطات التوزيع. ففي بعض التضاريس يمكن بسهولة الحصول على مقاومة تأريض 5 أوم أو أقل، ولكن في بعضها الآخر يصعب أحياناً تحقيق مقاومة تأريض أقل من 100 أوم.

تشتط النظام أن لا تزيد مقاومة الأرضي لمحطات النقل عن 1 أوم ومحطات التوزيع عن 5 أوم ولخطوط التوتر العالي عن 15 أوم ولخطوط التوزيع (0.4-33 kV) عن 25 أوم.

وفي الحالات التي يصعب معها تحقيق المقاومة المرغوبة، يلجأ إلى طرق مختلفة لتخفيضها مثل: مجموعة أوتاد تربط على التفرع، إدخال الوتد إلى أعماق أكثر في التربة، معالجة كيميائية للتربة، استخدام صفائح بدلاً من الأوتاد ... إلخ. إن تأريض الحماية الزامي لسويات توتر أكبر من 1000 فولط، أما لتوترات أقل من 1000 فولط فهو ضروري إذا كان الحيادي معزولاً.

ونقدم فيما يلي بعض التعاريف والمصطلحات المستخدمة في نظام التأريض

وتعود الأرقام بين الأقواس إلى الشكل (6-17)

- القطب الأرضي (Earth Electrode): هو الناقل أو مجموعة من الناقل المرتبطة معاً والتي تؤمن اتصالاً كهربائياً إلى الأرض (1).
- الأرض (Earth): هي الكتلة الناقلة من الأرض والتي يؤخذ فيها اصطلاحاً الكمون الكهربائي في أي نقطة منها مساوياً للصفر.

- الجزء الناقل المكشوف (Exposed Conductive Part): أي جزء يمكن لمسه بسهولة ولا يكون جزءاً حياً ولكن من الممكن أن يصبح حياً في حالات العطل.

- الجزء الناقل الدخيل (Extraneous Conductive Part): أي جزء ناقل لا يشكل جزءاً من التمديدات الكهربائية مثل الهياكل المعدنية الإنشائية للمباني، أنابيب الغاز المعدنية، أنابيب المياه، قساطل التدفئة... الخ والأجهزة غير الكهربائية والموصولة كهربائياً مثل المشعات، أفران الطبخ، الأحواض المعدنية.. الخ والأرضيات والجدران المعزولة (4).

- ناقل التأريض (Earthing Conductor): ناقل حماية يصل بنهايات أو بارات التأريض الرئيسية للتمديدات إلى قطب التأريض أو إلى أية وسيلة تأريض أخرى وبشكل عام يكون مقطعه لا يقل عن مقطع الناقل الحيادي الواصل إلى النهاية المطلوب تأريضها (2).

- أقطاب التأريض المستقلة كهربائياً :

(Electrically Independent Earth Electrode)

أقطاب تأريض تتوضع على مسافة من أقطاب التأريض الأخرى بحيث أن التيار الأعظمي المار بأحدها لا يؤثر بشكل فعال على كمون الأقطاب الأخرى.

- مقاومة قطب التأريض (Earth Electrode Resistance): مقاومة التماس بين القطب الأرض والأرض.

- ناقل الحماية الوقائي (Protective Conductor): ناقل يستخدم لبعض إجراءات الحماية من الصدمة الكهربائية ومعد لوصل أي من الأجزاء التالية (3):

1- الأجزاء الناقلة المكشوفة.

2- الأجزاء الناقلة الداخلية.

3- الأقطاب الأرضية.

4- نهايات أو بارات التأريض الرئيسية (قائم التأريض الرئيسي)

5- النقطة المؤضة لمنابع القدرة.

الشكل (6-17) عناصر نظام التأريض الوقائي /17/.

- وصلة تساوي الكمون (Equipotential Bonding) وصلة كهربائية لوضع الأجزاء الناقلة المكشوفة والداخلية بحالة تساوي كمون فعلي (5).

- نهايات أو بارات التأريض الرئيسية (Main Earthing Terminal on Bar): عبارة عن نهايات أو بارات تجهز لوصل نواقل الحماية بمافيها وصلات تساوي الكمون ونواقل التأريض الفعال بأنواعها إلى وسيلة التأريض وسنطلق عليها اسم قائم التأريض الرئيسي (6).

6-3-1 نظم التأريض القياسية Standardized Earthing Schemes:

تختلف نظم التأريض عن بعضها بطريقة تأريض نقطة الحيادي للمحول HV/LV (أو لأي منبع آخر)، وكذلك تأريض الأجزاء الناقلة المكشوفة لتجهيزات التوتر المنخفض.

إن اختيار نظم التأريض يحدد الإجراءات التي يجب اتخاذها لحماية الأشخاص من أخطار التماس غير المباشر، ويمكن الجمع بين عدة نظم تأريض في التركيبات الكهربائية عند الضرورة.

6-3-1-1 نظام التأريض الحيادي TT (الحيادي المؤرض)

TT Scheme (Earthed Neutral):

في هذا النظام يكون هناك نقطة واحدة في جهة المنبع مربوطة مباشرة مع الأرض وعادة تكون هذه النقطة هي نقطة النجمة لملفات التوتر المنخفض في المحول. وتكون الأجزاء الناقلة المكشوفة مربوطة إلى قطب أرضي منفصل في جهة التركيبات الكهربائية (شكل 6-18)، وهذا القطب قد يكون مستقل عن قطب المنبع وقد لا يكون كذلك ويمكن أن تتداخل منطقتي التأثير دون أن يؤثر ذلك على تجهيزات الحماية.

الشكل (6-18) نظام التأريض TT.

2-1-3-6 نظام التأريض TN Scheme :

يكون المنبع في هذا النظام مؤرضاً بالطريقة السابقة نفسها (نظام التأريض TT)، بينما تكون الأجزاء الناقلة المكشوفة في جهة التركيبات موصلة إلى ناقل الحيادي وهناك عدة أنواع من هذا النظام بينها فيما يلي:

نظام التأريض TN-C Scheme :

يستخدم الحيادي هنا كناقل حماية أرضي أيضاً ويرمز له بالرمز PEN (Protective Earth and neutral) شكل (6-19). ولا يسمح بهذا النظام في الحالات التي تكون فيها مقاطع النواقل أقل من 10 mm^2 ، وكذلك في الحالات التي تكون فيها التجهيزات محمولة.

الشكل (6-19) نظام التأريض TN-C /17/ .

ويتطلب هذا النوع من التأريض تأسيس بيئة متساوية الكمون عند التركيبات مع وجود أوتاد أرضية فعالة موزعة بانتظام قدر الإمكان.

نظام التأريض TN-S :TN-S Scheme

في هذا النظام يكون ناقل الأرضي منفصلاً عن ناقل الحيادي، وفي نظام شبكة الكابلات الأرضية تحوي فيها الكابلات على أغلفة من الرصاص يكون عادة ناقل الحماية الأرضي هو الغلاف الرصاصي (شكل 20-6) إن استخدام ناقل حماية أرضي PE مستقل عن ناقل الحيادي N (أو ما يسمى نظام خمسة النواقل) هو نظام واجب في الدارات ذات مقاطع نواقل أقل من 10 mm^2 للنحاس و 16 mm^2 للألمنيوم على التجهيزات المحمولة.

الشكل (20-6) نظام التأريض TN-S /17/.

نظام التأريض TN-C-S :TN-C-S Scheme

يمكن استخدام نظامي التأريض TN-C و TN-S معاً للتركيبات نفسها، وهو ما يعرف بنظام التأريض TN-C-S، إلا أنه في هذا النظام لا يسمح بأن يلي نظام التأريض TN-C (نظام أربعة النواقل) نظام التأريض TN-S (نظام خمسة النواقل)، أما النقطة التي يستقل فيها ناقل الحماية الأرضي PE عن ناقل الحيادي PEN فتكون في بداية التركيبات كما هو مبين بالشكل (21-6).

الشكل (6-21) نظام التأريض TN-C-S /17/.

ملاحظة :

في نظام التأريض TN-C تتمتع وظيفة الناقل PEN كناقل حماية أرضي بالأولوية، وبالتحديد فإن الناقل PEN يجب أن يوصل أولاً إلى نقطة التأريض للجهاز ثم بعد ذلك يُعمل وصلة إلى نقطة الحيادي، (الشكل 6-22).

الشكل (6-22) وصل الناقل PEN في نظام التأريض TN-C

3-1-3-6 نظام التأريض IT (نقطة الحيادي معزولة)

IT Scheme (Isolated Neutral):

في هذا النظام لا يوجد ربط بين نقطة حيادي المنبع والأرض (شكل 6-23)، بينما توصل الأجزاء الناقلة المكشوفة إلى قطب التأريض.

الشكل (6-23) نظام التأريض IT

في الواقع تتضمن كل الدارات ممانعة تسريب إلى الأرض طالما أن العزل لا يكون مثالياً، وعلى التفرع مع المسار الموزع لممانعة التسرب هناك مسار تيار سعوي، ويشكل هذان المساران ممانعة التسرب الطبيعية إلى الأرض (شكل 6-24).

الشكل (6-24) ممانعة التسرب في نظام التأريض.

مثال (6-2):

في نظام قدرة ثلاثي الطور ذي ثلاثة نواقل فإن 1 Km من الكابل سيكون له ممانعة تسريب ناجمة عن C_1, C_2, C_3 و R_1, R_2, R_3 مكافئة لممانعة أرضي حيادي Z_{ct} ذات قيمة من 3000-4000 أوم. (الشكل 6-25).

الشكل (6-25) الممانعة المكافئة لممانعة التسرب في النظام IT

4-1-3-6 نظام التأريض IT (تأريض بممانعة) :

IT Scheme (Impedance Earthed)

في هذا النظام يتم ربط ممانعة Z_s (ذات قيمة بين 1000 و 2000 أوم) بصورة دائمة بين نقطة حيادي ملفات التوتر المنخفض للمحول والأرض (شكل 6-26)، كما يتم ربط كل الأجزاء الناقلة المكشوفة والدخيلة إلى قطب التأريض. إن أسباب وجود هذا الشكل لتأريض منبع القدرة تعود إلى الرغبة أحياناً بتثبيت كمون شبكة صغيرة بالمقارنة مع الأرض (Z_s صغيرة بالمقارنة مع ممانعة التسرب)، وكذلك الحاجة إلى تخفيض مستويات التوترات المرتفعة مثل تلك التابعة من جهة ملفات التوتر العالي، الشحنات الساكنة... الخ. نسبة إلى الأرض. إلا أن ذلك يزيد قليلاً من مستوى تيار العطل الأرضي.

الشكل (6-26) نظام التأريض IT (تأريض بممانعة).

2-3-6 خصائص نظم التأريض Earthing Schemes Characteristics

يحدد كل نظام من أنظمة التأريض السابقة ثلاثة خيارات تقنية وهي:

- 1- طريقة التأريض.
 - 2- نواقل الحماية الأرضية PE.
 - 3- الحماية ضد التماس غير المباشر.
- وسنناقش فيما يلي كل من هذه الخيارات والنتائج المترتبة على كل منها، وعموماً ترتبط هذه النتائج بالنواحي التالية:
- الصدمة الكهربائية.
 - الحريق.
 - استمرارية التغذية الكهربائية.
 - ارتفاع التوتر.
 - الاضطرابات الكهرومغناطيسية.
 - التصميم والتشغيل.

1-2-3-6 نظام التأريض TN-C:

الخصائص:

• طريقة التأريض:

- نقطة حيادي المحول مربوطة مباشرة مع الأرض وناقل الحيادي مؤرض في عدد كبير من النقاط وحيث أمكن ذلك.

- الأجزاء الناقلة المكشوفة من التجهيزات وكذلك الأجزاء الدخيلة مربوطة مع ناقل الحيادي.

• نواقل الحماية الأرضية PE:

- نواقل الحماية الأرضية PE في هذا النظام تتحد مع نواقل الحيادي في ناقل واحد PEN.

• الحماية ضد التماس غير المباشر:

ينتج عن النظام تيارات عطل وتوترات تماس عالية:

- في حال حدوث عطل عازلية فإن الفصل الآلي إلزامي.
- وهذا الفصل يجب أن يتم بواسطة قواطع أو منصهرات، مع العلم أنه هنا لا يمكن استخدام تجهيزات التيار المتبقي لهذا الغرض حيث أن ناقل الحماية الأرضي وناقل الحيادي مجموعان مع بعضهما أي أن عطل العازلية الأرضي يضم أيضاً عطل طور حيادي.

النتائج:

• طريقة التأريض:

- نقطة حيادي المحول مربوطة مباشرة مع الأرض وناقل الحيادي مؤرض في عدد كبير من النقاط حيث أمكن ذلك.
- الأجزاء الناقلة المكشوفة من التجهيزات وكذلك الأجزاء الدخيلة مربوطة مع ناقل الحيادي.

• ارتفاع التوتر:

- في الظروف الطبيعية يكون للحيادي وللأجزاء الناقلة المكشوفة وللأرض فعلياً الكمون نفسه.

- يتغير الكمون تبعاً للمسافة عن القطب الأرضي، ولهذا فإنه في حالة عطل العازلية في جهة التوتر العالي HV فإن التيار سيجري من خلال القطب الأرضي إلى حيادي شبكة التوتر المنخفض LV بالإضافة إلى ظهور توتر بين الأجزاء الناقلة المكشوفة لتجهيزات التوتر المنخفض والأرض.

- استمرارية التغذية الكهربائية، الملاءمة الكهرمغناطيسية والحريق:

بما أنه لا يوجد أية ممانعة لقطب التأريض فإن تيار العطل الأرضي يكون بقيمة كبيرة (من رتبة الكيلو أمبير)، لذلك خلال عطل العازلية على التوتر المنخفض يكون هبوط توتر التغذية، الاضطرابات الكهرمغناطيسية وخطر تخريب التجهيزات (حريق، ملفات المحركات، الهياكل المغناطيسية) عالية.

- ارتفاع التوتر:

خلال عطل العازلية على جهة التوتر المنخفض LV تنزاح نقطة الحيادي للنظام الثلاثي الطور، ويصبح التوتر بين الطور والأجزاء الناقلة المكشوفة للتجهيزات أعلى من التوتر بين الطور والحيادي وتساوي $1.45 U_n$ تقريباً.

- نواقل الحماية:

ناقل الحماية الأرضي PE يتحد مع نواقل الحيادي في ناقل واحد PEN، ويجب أن يلبي الناقل PEN متطلبات كلتا الوظيفتين وفي حال التعارض فإنه يكون للوظيفة PE الأفضلية. ويحظر استخدام النظام TN-C للدارات ذات مقاطع النواقل أقل من 10mm^2 بالنسبة للنحاس و 16mm^2 بالنسبة للألمنيوم. كذلك بالنسبة للنواقل المرنة.

- الحماية من الحريق :

يحظر استخدام النظام TN-C في المنشآت التي فيها خطر عالٍ لحدوث الحريق أو الانفجار، ويعود السبب في ذلك إلى أن ربط الأجزاء الناقلة الدخيلة في

المبنى إلى الناقل PEN يؤدي إلى جريان تيار في الهيكل الفولاذي للمبنى وبالتالي خطر حدوث حريق واضطرابات كهرومغناطيسية. وتزداد قيمة هذه التيارات الدائرة بصورة ملموسة خلال أعطال العازلية.

• الملاءمة الكهرومغناطيسية :

- عند تركيب الناقل PEN في مبنى ما وبغض النظر عن طوله فإنه يؤدي إلى هبوط توتر في ظروف التشغيل الطبيعية وتشكيل فرق كمون وبالتالي جريان تيارات في أية دارة تتشكل بين الأجزاء الناقلة المكشوفة للتجهيزات وبين الأجزاء الناقلة الدخيلة للمبنى، ونظم الاتصالات .
- في بعض الحالات تؤدي هذه التيارات الدائرة إلى عدم توازن التيارات في شبكة التوزيع وبالتالي تشكيل حقل مغناطيسي يحدث اضطراباً لصمامات الأشعة، الشاشات، بعض التجهيزات الطبية... إلخ عند مستويات تيار منخفضة مثل 0.7 A/m (أي مرور 5 A في متر واحد من جهاز حساس). ويكبر تأثير هذه الظاهرة في حالة عطل العازلية.

• التآكل:

هناك مصدران للتآكل، الأول هو مركبة التيار المستمر DC التي يمكن للناقل PEN حملها. والثاني التيارات الأرضية التي تسبب صداً الأقطاب الأرضية والهيكل المعدنية في حال التأريض المتعدد.

• الحماية ضد التماس غير المباشر :

- نظراً لأن هذا النوع من التأريض يعطي تيارات عطل وتوترات تماس عالية.
- فإن الفصل الآلي إلزامي في حالة العطل.
 - وهذا العطل يجب أن يتم بواسطة قواطع آلية أو منصهرات، مع العلم أنه هنا لا يمكن استخدام التيار المتبقي لهذا الغرض حيث أن ناقل الحماية الأرضي

وناقل الحيادي متحدان مع بعضهما أي أن عطل العازلية الأرضي يضم أيضاً عطل طور - حيادي.

• التصميم والتشغيل :

- عند استخدام القواطع الآلية أو المنصهرات للحماية من خطر التماس غير المباشر فإن ممانعة المصدر وممانعات الدارات السابقة وممانعات الدارات المراد حمايتها يجب أن تكون معروفة في مرحلة التصميم ويجب أن تبقى ثابتة دون تغيير إلا إذا تغيرت الحماية. ويجب أن تقاس هذه الممانعة بعد التركيب ثم على فترات منتظمة (تبعاً للمنشأة المدروسة)، وتحدد خصائص أجهزة الحماية بناءً على هذه العناصر.
- عندما تكون التغذية قادمة من مصدرين (UPS، مجموعة توليد.. إلخ) فإن مميزات القاطع الآلي أو المنصهرات يجب أن تحدد لكل شبكة ومنبع مستخدم.
- يجب أن تصمم الدارة مرة واحدة بحيث لا تتجاوز الطول الأعظمي المشار إليه في الجداول كتابع للحماية المستخدمة، وفي حال الضرورة نقوم بزيادة مقطع الكابلات المستخدمة في بعض الحالات.

2-2-3-6 نظام التأريض TN-S

الخصائص:

• طريقة التأريض

- نقطة حيادي المحول (أو شبكة التغذية إذا كانت شبكة التوزيع تستخدم النظام TN-C والتكبيات النظام TN-S) تؤرض مرة واحدة في منطقة المحول.
- تربط الأجزاء الناقلة المكشوفة والأجزاء الداخلية من التجهيزات إلى نواقل الحماية التي تربط بدورها مع نقطة الحيادي للمحولة.

• نواقل الحماية PE

نواقل الحماية PE منفصلة عن نواقل الحيادي وتصمم مقاطعها لأجل أعلى تيار عطل يمكن حدوثه.

• الحماية من التماس غير المباشر

يعطي هذا النظام تيارات عطل وتواترات تماس عالية.

- في حال حدوث عطل عازلية فإن الفصل الآلي إلزامي.
- وهذا الفصل يجب أن يتم بواسطة قواطع آلية أو منصهرات وتجهيزات التيار المتبقي، حيث أن الحماية ضد التماس غير المباشرة يمكن أن تكون منفصلة عن الحماية ضد تيار القصر مع طور أو طور مع الأرض.

النتائج :

• طريقة التأريض

- نقطة حيادي المحول (أو شبكة التغذية إذا كانت شبكة التوزيع تستخدم النظام TN-C والتركيبات النظام TN-S) تؤرض مرة واحدة في منطقة المحول.
- تربط الأجزاء الناقلة المكشوفة من التجهيزات إلى نواقل الحماية التي تربط بدورها مع نقطة الحيادي للمحولة.

• ارتفاع التوتر :

في الظروف الطبيعية يكون للحيادي وللأجزاء الناقلة المكشوفة وللقطب الأرضي الكمون نفسه حتى بوجود ظاهرة الحالة العابرة والتي تتطلب استخدام مفرغات الصواعق على الأطوار، الحيادي والأجزاء الناقلة المكشوفة.

• استمرارية التغذية الكهربائية :

إن تأثير الأعطال على شبكة التوتر العالي والمنخفض، أعطال العازلية على التوتر العالي والمنخفض مشابهة لتلك التي تمت مناقشتها للنظام TN-C، وتحديداً فإن تيار العطل الأرضي يكون بعتبة كبيرة (من مرتبة الكيلو أمبير) نظراً لعدم وجود ممانعة لقطب التأريض.

- لا يمكن تأريض ناقل الحيادي وذلك لتجنب تشكل النظام TN-C مع ما يتضمنه من سلبيات أي هبوط التوتر وتيارات الأحمال في ناقل الحماية تحت ظروف التشغيل الطبيعية.

• نواقل الحماية PE

إن نواقل الحماية PE في هذا النظام منفصلة عن نواقل الحيادي وتصمم مقاطعها لأجل أعلى تيار عطل يمكن حدوثه.

• الملاءمة الكهرومغناطيسية

- في الظروف الطبيعية يكون الناقل PE (وعلى عكس الناقل PEN) غير معرض لهبوط التوتر لذلك فإن كل سلبيات النظام TN-C تكون هنا غير موجودة، ويشابه النظام TN-S في هذه الحالة النظام TT .
- في حال حدوث عطل عازلية فإنه يظهر توتر نبضي عالٍ على طول ناقل الحماية الأرضي PE وبالتالي حدوث مشاكل الحالة العابرة نفسها التي ظهرت في النظام TN-C.

• الحماية ضد التماس غير المباشر:

- يعطي هذا النظام تيارات عطل وتوترات تماس عالية.
- في حال حدوث عطل عازلية فإن الفصل الآلي إلزامي.

- وهذا الفصل يجب أن يتم بواسطة القواطع الآلية، المنصهرات أو تجهيزات التيار المتبقي حيث أن الحماية من التماس غير المباشر يمكن أن تكون منفصلة عن الحماية من عطل طور مع طور أو عطل طور مع الأرض.
- في الحالة التي تستخدم فيها تجهيزات الحماية من زيادة التيار للحماية من التماس غير المباشر فإنه ينطبق على هذه الحالة الخصائص نفسها المطبقة في النظام TN-C.

• الحريق:

هذا النظام لا يؤمن الحماية من الأعطال عبر ممانعة وبالتالي وجود خطر حريق.

• التصميم والتشغيل:

- يجب قياس ممانعات المنبع والدارات المراد حمايتها وفحصها بعد التركيب وعلى فترات منية دورية.
- تحديد ظروف الفصل من الجهتين في حال وجود مصدرين للتغذية (UPS، مجموعة توليد ... إلخ).
- هناك طول أعظمي للدائرة لا يمكن تجاوزه .
- أي تعديل في التركيب يتطلب إعادة تصميم وفحص ظروف الحماية. وإذا كانت الحماية من التماس غير المباشر تتم بواسطة تجهيزات التيار المتبقي لتجنب الفصل الخاطئ فإنه يكون من الممكن غالباً استخدام تيارات متبقية عالية من رتبة A أو أكثر.
- السلبيات التي تمت مناقشتها سابقاً تقريباً غير موجودة هنا، أما الإيجابيات فهي مماثلة لتلك التي في النظام TT.

- إن استخدام تجهيزات التيار المتبقي بتيارات تشغيل 500mA تساعد على تجنب التخريب الذي يحدث في حالة الأعطال ذات الممانعة أو بسبب المستويات العالية لأعطال العازلية.

3-2-3-6 نظام التأريض TT

الخصائص:

- طريقة التأريض:

- نقطة حيادي مربوطة مباشرة مع الأرض.
- الأجزاء الناقلة المكشوفة والأجزاء الدخيلة من التجهيزات مربوطة مع القطب الأرضي عبر نواقل الحماية والذي سيكون مستقلاً عن القطب الأرضي لحيادي المحول.

- نواقل الحماية PE:

نواقل الحماية PE منفصلة عن نواقل الحيادي وتصمم مقاطعها لأجل أكبر تيار عطل يمكن حدوثه.

- الحماية من التماس غير المباشر:

- في حال حدوث عطل عازلية فإن الفصل الآلي إلزامي. وعملياً يتم هذا الفصل بواسطة تجهيزات التيار المتبقي. تيارات العمل لهذه التجهيزات يجب أن تكون منخفضة بحيث تستطيع اكتشاف تيارات العطل المحدد بواسطة مقاومات قطبي تأريض على التسلسل.

النتائج:

- طريقة التأريض:

- نقطة الحيادي للمحول مربوطة مباشرة مع الأرض.

- الأجزاء الناقلة المكشوفة من التجهيزات مربوطة مع القطب الأرضي عبر نواقل الحماية والذي يكون مستقلاً عن القطب الأرضي لحيادي المحول.

- ارتفاع التوتر:

مع أن كمون الأجزاء المكشوفة هو كمون القطب الأرضي نفسه (كما هي الحالة في النظام TN) فإن هذا قد لا يكون صحيحاً بالنسبة لنقل الحيادي (والذي يكون متصلاً غلفانياً مع القطب الأرضي) والأجزاء الناقلة حيث يكون هذا الكمون مختلفاً وفي بعض الحالات مختلفاً كلياً (غالباً في حالات ضربات الصواعق في المناطق الريفية).

طبعاً هذا لا ينطبق على المراكز الصناعية والمدن حيث يلجأ إلى حل وسط يتم فيه ربط قطبي التأريض مع بعضهما البعض.

- الملاءمة الكهرمغناطيسية:

في حال حدوث عطل عازلية فإن تيار العطل يكون منخفضاً نسبياً، فمثلاً لأجل شبكة 230V/100A وذات مقاومة قطب تأريض 2.3Ω فإن تيار العطل 100A فقط. وبالنسبة فإنه في هذه الحالة يمكن تحمل هبوط التوتر الناجم عن العطل، الاضطرابات الكهرمغناطيسية المرافقة والفرق العابر في الكمون بين جهازين (مثلاً جهازي حاسوب) مربوطين مع بعض بواسطة كابل مسلح بصورة أكبر مما هو عليه في حالة النظام TN-S.

- نواقل الحماية:

تكون نواقل الحماية PE في هذا النظام منفصلة عن نواقل الحيادي وتصمم مقاطعها لأجل أكبر تيار عطل يمكن حدوثه .

- الملاءمة الكهرمغناطيسية:

- في الظروف الطبيعية لا يتعرض الناقل PE إلى هبوط توتر، وبالتالي تختفي هنا كل السليبيات الواردة في النظام TN-C . في حال عطل العازلية فإن التوتر النبضي الذي يظهر على طول الناقل الأرضي PE C يكون منخفضاً والاضطرابات الناتجة تكون مهمة.

• التصميم والتشغيل:

في هذا النظام يمكن أن تكون مقاطع نواقل الدارات وناقل الحماية PE أقل منها في حالة النظام TN-S.

• الحماية ضد التماس المباشر:

- في حال عطل العازلية فإن الفصل الآلي إلزامي، وعملياً يتم هذا الفصل بواسطة أجهزة التيار المتبقي لذلك يجب أن تكون تيارات العمل المعدة لهذه التجهيزات منخفضة بحيث نستطيع اكتشاف تيارات الأعطال، المحددة بواسطة مقاومات قطبي تأريض على التسلسل.

- وتضاف أجهزة التيار المتبقي كريلية إلى القواطع الآلية أو كقاطع تفاضلي إلى المنصهرات، ويمكنها حماية دائرة واحدة أو مجموعة من الدارات. ويتم اختيار تيارات التشغيل وفقاً للقيم العظمى للمقاومة R للقطب الأرضي.

- إن وجود تجهيزات التيار المتبقي تقلل إلى الحد الأدنى قيود التصميم والتشغيل، فمثلاً ليس من الضروري معرفة ممانعة المنبع، كما أنه ليس هناك قيود على طول الدارات (باستثناء تجنب هبوط التوتر العالي جداً). ويمكن في هذه الحالة تعديل التركيبات أو توسيعها بدون حساب أو إعادة القياسات.

• الحريق:

إن استخدام تجهيزات التيار المتبقي بتيارات تشغيل أقل أو تساوي 500 mA يساعد تجنب حدوث الحريق في التركيبات الكهربائية.

- **الملاءمة الكهرومغناطيسية:**

تستمر تيارات العطل فترة قصيرة أقل من 100 ms (أو أقل من 400 ms في دارات التوزيع) كما أنها ذات طويلة منخفضة.

6-3-2-4 النظام IT :

- **الخصائص:**

- **طريقة التأريض:**

- نقطة حيادي المحول معزولة عن الأرض أو مؤرضة عبر ممانعة ومحدد التوتر. وفي ظروف العمل الطبيعية فإن كمون هذه النقطة يبقى قريباً من كمون الأجزاء الناقلة المكشوفة بواسطة ساعات التسريب الأرضية للتمديدات والتجهيزات وتكون الأجزاء الناقلة المكشوفة من التجهيزات من البناء مربوطة إلى القطب الأرضي.

- **نواقل الحماية PE:**

تكون نواقل الحماية PE منفصلة عن نواقل الحيادي وتصمم مقاطعها لأجل أعلى تيار عطل يمكن حدوثه.

- **الحماية من التماس غير المباشر:**

- تيار العطل في حال عطل العازلية صغير للغاية ولا يشكل أي خطر، ويمكن تجنب حدوث عطل ثاني عن طريق تركيب جهاز مراقبة عازلية يكشف ويشير إلى حدوث العطل الأول وتعيين موقعه ومن ثم إلغائه.

النتائج:

- **طريقة التأريض:**

نقطة حيادي المحول معزولة عن الأرض أو مؤرضة عبر ممانعة ومحدد للتوتر. وفي ظروف العمل الطبيعية فإن كمون هذه النقطة يبقى قريباً من كمون الأجزاء الناقلة المكشوفة بواسطة ساعات التسريب الأرضية للتمديدات والتجهيزات وتكون الأجزاء الناقلة المكشوفة للتجهيزات والأجزاء الدخيلة من البناء مربوطة إلى القطب الأرضي .

• ارتفاع التوتر :

في ظروف العمل الطبيعية فإن الحيادي، الأجزاء الناقلة المكشوفة والقطب الأرضي تكون عند الكمون نفسه عملياً.

- ويجب تركيب جهاز محدد لارتفاع التوتر لتجنب ارتفاع الكمون بين الأجزاء الحية والأجزاء الناقلة المكشوفة والذي يمكن أن يتجاوز توتر الثبات لتجهيزات التوتر المنخفض في حال حدوث عطل مصدره تجهيزات التوتر العالي. مع العلم أن الحماية من ارتفاع التوتر يجب أن تكون وفقاً لمقياس عام لكل نظم التأريض.

• استمرارية التغذية الكهربائية والملاءمة الكهرمغناطيسية:

- يكون تيار عطل العازلية الأول صغيراً ناتجاً عن الساعات بين النواقل الحية والأجزاء الناقلة المكشوفة. لا ينتج توتر عطل العازلية المنخفض أي هبوط في التوتر على الدارات الرئيسية، أو أي اضطرابات كهرمغناطيسية على مجال واسع من الترددات.

• ارتفاع التوتر:

يستمر تزويد التجهيزات بالتغذية الكهربائية بعد حدوث العطل الأول ويظهر التوتر طور-طور بين الأطوار السليمة وبين الأجزاء الناقلة المعرضة للتماس، ويجب أن يتم اختيار التجهيزات وفقاً لهذه المعطيات.

ملاحظات:

- تحدد النظم IEC 950 (أو EN 60950) فئة تجهيزات المعلوماتية التي يمكن استخدامها في النظام IT.

- في حال استخدام مفرغات الصواعق فإنه يجب اختيار توتراتها الاسمية تبعاً للتوتر الخطي.

- استمرارية التغذية والملاءمة الكهرومغناطيسية.

بشكل عام يمكن أن يحدث عطل ثانٍ على أي من الأطوار وبالتالي حدوث حالة قصر وما رافق ذلك من أخطار ولذلك فإن اختيار النظام IT يعني عدم السماح بحدوث عطل ثانٍ وإن كانت النظم تسمح بهذه الإمكانية لاعتبارات الأمان.

• نواقل الحماية:

تكون نواقل الحماية PE في هذا النظام منفصلة عن نواقل الحيادي وتصمم مقاطعها لأعلى تيار عطل يمكن حدوثه .

• الملاءمة الكهرومغناطيسية:

في الظروف الطبيعية وحتى في حال حدوث عطل أرضي أول فإنه لا يظهر هبوط توتر على نواقل الحماية PE ويبقى مستوى عالٍ من تساوي الكمون بين نواقل الحماية، نواقل التأريض، الأجزاء الناقلة المكشوفة من المبنى.

• الحماية ضد التماس المباشر:

يكون تيار العطل منخفضاً في حال حدوث عطل عازلية أول ولا يمثل أي خطر، لكن يجب جعل إمكانية حدوث عطل ثانٍ مستحيلة عن طريق وضع جهاز مراقبة العازلية الذي يكتشف ويشير إلى مكان حدوث العطل الأول ومن ثم إلغاؤه. وتصمم تجهيزات الحماية لتعمل في حالة العطل المزدوج، فإذا تم استخدام القواطع الآلية أو المنصهرات فإن القواعد تكون مشابحة لتلك في النظام TN.

ويمكن استخدام تجهيزات التيار المتبقي، إلا أنه في حال حدوث العطل بعد جهاز التيار المتبقي فإن الجهاز يعتبر تيار العطل هو تيار حمل وبالتالي لا يفصل ولذلك يجب وضع جهاز على كل دائرة.

• الحريق:

إن استخدام جهاز مراقبة العازلية وتجهيزات التيار المتبقي التي تعمل بتيار أقل من 500 mA يمنع حدوث حريق في التركيبات.

• التصميم والتشغيل:

- يجب توفر عامل صيانة مدرب لتحديد مكان العطل الأول وإلغائه.
- يجب أن تكون التجهيزات مصممة بعناية: استخدام النظام IT في الأماكن التي تتطلب استمرارية تغذية، عزل الأحمال ذات تيارات التسريب العالية مثل الأفران وبعض التجهيزات الحاسوبية، فحص تأثير تيارات التسرب وخاصة على تجهيزات التيار المتبقي، تقسيم التركيبات... الخ.
- في حال استخدام تجهيزات تيار متبقٍ تعمل بتيار 30 mA لحماية دارات المآخذ فيجب مراعاة مايلي:
 - 1- يجب ألا يتجاوز إجمالي تيار التسريب السعوي 10 mA، وقد قدرت هذه القيمة باستخدام التوتر - طور بالنسبة للنقل والتوتر طور - حيادي بالنسبة للحيادي.
 - 2- إذا كان الحمل المغذى من مثل هذه الدارة ليس حدياً فإن جهاز التيار المتبقي يمكن أن يفصل عند حدوث العطل الأول على التركيبات لهذا يجب رفع الجهاز مباشرة أو عدم استخدام المآخذ أو اتخاذ إجراءات أخرى .
- يسمح في علب الدارات النهائية استخدام تجهيزات الحماية 1-Pole+neutral طالما أن عيار الطور هو نفسه عيار الحيادي أو قريب منه وأن هناك جهاز تيار متبقٍ أعلى الدارة.
- وتبين الأشكال (6-27)، (6-28)، (6-29)، (6-30)، (6-31)، (6-32)، (6-33)، (6-34) بعض النواحي المتعلقة بنظم التأريض السابقة الذكر .

الشكل (6-27) في النظام TN-S يمكن أن يكون تيار العطل كبيراً جداً بحيث لا يحد من قيمة هذا التيار سوى ممانعة ناقل وناقل التأريض

الشكل (6-28) أي عطل عازلية يحدث خارج المبنى يسبب ارتفاع سريع في فرق الكمون خارج المبنى. وهذا الشكل يبين عطل عازلية عالي التوتر لأجل النظام TN حيث نعتبر الأقطاب الأرضية مع بعضها البعض.

الشكل (6-29) إن وجود أي قطعة يؤدي إلى جريان تيارات في الأجزاء الناقلة المكشوفة والأغلفة المعدنية للتجهيزات التي تغذى من النظام TN-S

الشكل (6-30) لتحديد استطاعة القصر للقاطع الآلي C فإنه من الضروري معرفة ممانعة المنبع الطبيعي وكذلك طور الدارة C التي يحميها القاطع C.

الشكل (6-31) في نظام التأسيس TN-C تيارات الأعطال يمكن أن تكون كبيرة جداً لذلك لايسمح به للدارات التي مقاطع نواقلها أصغر من 10 mm^2

الشكل (6-32): في نظام التأريض TT يحد من قيمة تيارات الأعطال
مقاومات أقطاب التأريض وهبوط التوتر المرافق صغير للغاية.

الشكل (6-33) في نظام التأريض TT يحد من قيمة تيار العطل ممانعة التأريض
ومحددات ارتفاع التوتر.

4-6 مؤشرات اختيار نظام التأريض Choice Criteria :

1-4-6 المؤشر الأول First Criterion :

لا يوجد نظام تأريض مفضل على الآخر وعندما يكون هناك إمكانية
لاختيار نظام التأريض فإن ذلك يجب أن يتم بعد تحليل كل حالة على حدة واستناداً
إلى طبيعة التركيبات الكهربائية والقيود المحددة لها وكذلك حاجة المستثمر والقواعد
الناظمة الدولية منها والمحلية.

وغالباً ما يكون الحل الأفضل هو اختيار عدة أنواع من نظم التأريض
للأجزاء المختلفة من التركيبات الكهربائية.

2-4-6 المؤشر الثاني Second Criterion :

يجب أن تلي هذه الحلول القواعد الأساسية التالية:
- الحماية من الصدمة الكهربائية.

- الحماية من الحريق ذي المنشأ الكهربائي.
- استمرارية التغذية الكهربائية.
- الحماية ضد ارتفاع التوتر.
- الحماية ضد الاضطرابات الكهرومغناطيسية.

3-4-6 المؤشر الثالث (مقارنة بين نظم التأريض) :

Third Criterion (Comparison of Earthing Schemes)

إن المقارنة بين نظم التأريض تعطي النتائج التالية التي يمكن استخدامها عملياً:

- 1- ينصح بالنظام TT في التركيبات الكهربائية المنتشرة على مساحة محددة أو للتركيبات الكهربائية القابلة للتوسع أو التعديل، وبما أن هناك حاجة لوجود قطبين أرضيين فإنه يجب تركيب حماية من ارتفاع التوتر.
 - 2- وينصح باستخدام النظام IT في الحالات التي تتطلب استمرارية التغذية الكهربائية شريطة توفر مايلي:
 - دراسة تحليلية كافية ومفصلة لفترات استمرار ارتفاع التوتر والتيارات التسريب.
 - وجود كادر الصيانة في كل الأوقات وذلك للتخلص من العطل الأول فور حدوثه والإشراف على التركيبات الكهربائية.
 - 3- يفضل استخدام النظام TN-S للتركيبات الكهربائية التي تنتشر على مساحة كبيرة، أو للتركيبات الكهربائية غير المعرضة للتوسع أو التعديل وهذا النظام يطبق عموماً بدون تجهيزات التيار المتبقي ذات الحساسية المتوسطة.
- أما سلبيات هذا النظام فتتمثل بكبر تيارات أعطال العازلية والتي ينجم عنها اضطرابات عابرة وخطر تخريب التجهيزات ونشوء حريق، كذلك لا بد قبل تطبيق النظام من إجراء دراسة تحليلية.

وإذا تم تركيب تجهيزات تيار متبقٍ ذات حساسية متوسطة فإن ذلك سيزود النظام بحماية فعالة ضد الحريق وسيزيد من مرونة النظام في مرحلة التصميم والاستثمار.

الجدير بالذكر أنه لا ينصح باستخدام أنظمة التأريض TN-C و TN-C-S لوجود خطر الحريق والاضطرابات الكهرومغناطيسية بسبب:

- 1- هبوطات التوتر على طول نواقل الحماية PEN.
- 2- تيارات عطل العازلية العالية.
- 3- جريان تيارات في الأجزاء الناقلة المكشوفة والأجزاء الدخيلة.
- 4- الحاجة لإجراء دراسات تحليلية قبل تطبيق هذه الأنظمة.

4-4-6 المؤشر الرابع Forth Criterion :

فيما يتعلق بارتفاع التوتر والاضطرابات الكهرومغناطيسية فإن أنظمة التأريض IT, TT, TN-S تعطي نتائج جيدة إذا تم تنفيذها بشكل صحيح.

5-4-6 المؤشر الخامس Fifth Criterion :

عند إجراء مقارنة اقتصادية بين أنظمة التأريض فإن كل التكاليف يجب أن تأخذ بالحسبان بما فيها تلك المتعلقة بالتصميم والصيانة والتعديلات وضيعات الإنتاج.

5-6 البئر الأرضي (نظام القطب الأرضي):

تتكون مقاومة التيار في القطب الأرضي من ثلاث مركبات:

- 1- مقاومة الوند الأرضي نفسه مع مرابطه.
- 2- مقاومة التماس بين الوند الأرضي والأرض القريبة منه.
- 3- مقاومة الأرض المحيطة.

وعادة يكون مقطع القطب الأرضي كبيراً بحيث يمكن إهمال مقاومته الذاتية، وكذلك يمكن إهمال مقاومة التماس. إن القطب الأرضي ذا الناقلية المنتظمة، والمطمور في عمق التربة ينقل التيار في جميع الاتجاهات. لنعبر أن القطب محاط بطبقات من التربة ذات سماكة متساوية (الشكل 6-34). مقاومة الطبقة الأقرب إلى الوند تكون هي الأكبر لأن مساحة سطحها هي الأصغر، أما الطبقة الثانية فمقاومتها أصغر من الأولى لأن سطحها أكبر وهكذا.

الشكل (6-34) مكونات مقاومة القطب الأرضي.

وبعد مسافة من القطب، ندعوها منطقة المقاومة الفعالة أو المؤثرة، تصبح مقاومة الطبقات الأرضية مهمة. وتتعلق هذه المسافة بعمق الوند في التربة. إن مقاومة الأرض المحيطة بالوند هي المركبة الأكثر أهمية والأكثر صعوبة من حيث حسابها والتغلب عليها.

حساب مقاومة التأسيس: Calculating Earth Resistance

يتم استخدام هذا الحساب عادة بعلاقات تقريبية، وأوسع هذه العلاقات استخداماً هي علاقة دوايت H.B. Dwight لحساب مقاومة الأرض لأجل وتد أرضي وحيد:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) \quad (6-1)$$

حيث: ρ = المقاومة النوعية الوسطية للتربة.

L = طول الوتد الأرضي.

a = نصف قطر الوتد الأرضي

R = مقاومة الأرض

تأثير حجم الوتد الأرضي على مقاومة الأرضي :

Effect of Rod Size On Resistance

كلما أدخل الوتد الأرضي أكثر في عمق التربة، كلما قلت مقاومة التأريض.

بشكل عام فإن مضاعفة طول الوتد يقلل المقاومة بمقدار 40% (الشكل a 6-35).

أما زيادة قطر الوتد فلا يقلل مقاومة التأريض بشكل ملحوظ (الشكل b 6-35).

الشكل (6-35) تغير مقاومة التربة (a) مع العمق (b) مع القطر

مضاعفة القطر تقلل المقاومة أقل من 10%

6-6 تأثير المقاومة النوعية للتربة على مقاومة نظام التأريض

Effect of Soil Resistivity on Earth Electrode Resistance

يتضح من علاقة دوايت أن مقاومة نظام التأريض لا تتعلق فقط بعمق وقطر القطب الأرضي، بل تتعلق أيضاً بالمقاومة النوعية للتربة. والمقاومة النوعية للتربة هي مقاومة m^3 1 من التراب، بين سطحين متقابلين منه، ووحدتها أوم-متر. وتحدد الإشارة إلى مايلي:

- تتبدل المقاومة النوعية للتربة من مكان لآخر وحسب نوع الأحجار والصخور ودرجة الرطوبة فيها، وحسب التدرج الجي لها، الذي يؤثر على وجود التماس مع قطب التأريض وعدم وجود فراغات هوائية حوله.
- تتبدل المقاومة النوعية للتربة في مكان محدد حسب العمق، حيث تثبت درجة الرطوبة في العمق.
- تتبدل المقاومة النوعية للتربة السطحية حسب تبدل فصول السنة وتأثرها بعوامل (الثلج والمطر والجفاف والرطوبة..). إذ تزداد المقاومة بصورة كبيرة:
 - عند انخفاض درجة الحرارة عن الصفر.
 - عند انخفاض درجة رطوبة التربة عن 15 %.

لذلك لا تعطي الجداول قيماً محددة للمقاومة النوعية، بل تعطي قيمة دنيا وقيمة عظمى ويمكن استخدام القيمة الوسطية التالية:

نوع التربة	(أوم×متر)
الأراضي الرطبة	20
الأراضي الطينية المتماسكة	50
الأراضي التي تحوي بحص	500
الأراضي الصخرية أو الرملية الجافة	2000

على أن يتم قياس وتصحيح المقاومة لتبقى في الحدود المقبولة بعد تنفيذ الأعمال وحسب الواقع الفعلي لنتائج القياس. وبصورة عامة، يفضل إحاطة قطب التأريض بترية زراعية ناعمة لتأمين جودة التماس معها.

آ- استبدال التربة:

لا تُعاد الأتربة المبحصة أو السيئة الناقلية والناجمة عن حفريات الأراضي بل يوضع بدلاً عنها أتربة زراعية ذات مواصفات جيدة يمكن الحصول عليها من بقايا حفريات البناء أو من أرض مجاورة بعد أن تنقى من الأحجار والشوائب لتبقى ذات ذرات ناعمة لتسهيل التماس مع القطب الأرضي. وبذلك يمكن تخفيض نفقات شبكة الأراضي بوضع تربة ذات مقاومة نوعية منخفضة.

ب- إضافة مواد:

يوضع 20-40 kg من ملح الطعام أو سلفات الماغنيزيوم ضمن خندق دائري يحيط بالمأخذ الأرضي (قطر وسطي 1 m) ويجب تفادي وضع هذه المواد بتماس مباشر مع معدن الوتد أو اللوحة. وتحل هذه المواد تدريجياً بمياه الأمطار أو بمياه السقاية.

أنواع الأقطاب الأرضية Types of Earh Electrodes:

1- صفيحة معدنية:

من الحديد غير القابل للصدأ أو من النحاس الأحمر المطلي بالقصدير سماكة 3 مم للحديد و 2 مم للنحاس (السماكة لا تؤثر على مقاومة الأرضي، والحد الأدنى لها يفرضه التآكل المسموح) وطول ضلع B (في التمديدات 1م)، تظمر عامودياً في التربة على أن تكون حافتها العليا على عمق 1م من سطح الأرض. تردم الحفرة بالتراب الناعم والجيد الناقلية، ويحظر استعمال الفحم في تغطية سطح اللوحة. وينصح بترطيبها من وقت لآخر عن طريق سكب الماء بواسطة قسطل يصل إلى سطح اللوحة ويمكن أن يضاف للماء كمية من الملح حتى يصبح المحلول بنسبة 10%.

وتحسب مقاومة نظام التأريض من العلاقة العملية التالية:

$$R = \rho / 4.5B \quad (6-2)$$

حيث:

ρ - المقاومة النوعية للتربة (أوم-متر).

B - طول ضلع الصفيحة (متر).

شكل

مثال (6-3) :

لصفيحة طول ضلعها 1m، ومقاومة نوعية 50 أوم متر تكون مقاومة الأرضي =
$$10 = \frac{50}{1 \times 4.5}$$
 أوم تقريباً

ومن عقبات هذا الحل:

- ضرورة عمل حفرة كبيرة وعميقة وهذا عسير في أغلب الأحيان وكثير التكاليف.
- عدم توفر الصفائح.
- خطورة مكان اتصال الناقل الأرضي مع الصفيحة إذ أنه مطمور في التراب ومن المستحيل التحقق من جودته أو تحسينه.

2- ناقل حلقي:

من الحديد غير القابل للصدأ بمقطع 50 mm^2 أو من النحاس بمقطع 35 mm^2 ،
يطمر في الأرض على عمق 1.5-2m بحيث يشكل حلقة مغلقة أفقية بقطر مناسب.
تحتسب المقاومة من العلاقة العملية:

$$r = \text{نصف قطر الحلقة (متر)} \\ R = \rho / r \quad (6-3)$$

من مساوئ هذا الحل ضرورة عمل حفرة كبيرة إذا لم نستفد من حفريات الأساسات.
لتحسين المقاومة (تخفيضها) يمكن وضع عدة حلقات.

3- ناقل أفقي:

ناقل مبسط من الحديد المغلفن أو النحاس ، يمدد أفقياً في الأرض على عمق 1-1.5 m بحيث يبقى سطح الناقل عامودياً على التربة للحفاظ على تماس مباشر ودائم مع التربة حين تراصها. وتحسب مقاومة الأرضي كما يلي:

$$R = 2\rho / \ell \quad (6-4)$$

حيث: ℓ طول الناقل الممدد بالمتر.

حل عملي:

(يمكن استخدام ناقل نحاسي مبسط 2×20 mm أو حديد مغلفن 4×30 mm). ويمكن أن يكون الناقل على شكل قضيب أو سلك أو أنبوب مجوف، يطمر على عمق 0.8 m، وتحسب مقاومة الأرضي عندئذ من العلاقة:

$$R = \frac{\rho}{\pi \cdot \ell} \ln \frac{2\ell}{d} \quad (6-5)$$

حيث ℓ = طول القطب الأرضي ، d = قطره

4- قطب أرضي شعاعي رباعي:

يتألف من ناقلين أفقيين متناصفين مقاومة الأرضي هنا هي:

$$R = \frac{\rho}{4\pi \ell} \left(\ln \frac{4\ell}{d} + 1.755 \right) \quad (6-6)$$

ℓ = طول الشعاع d = قطر الناقل

5- الوتد الأرضي:

وهو الأكثر انتشاراً لسهولة تنفيذه وتوفر مواده. ويكون على شكل قضيب فولاذ بقطر أصغري 10mm أو على شكل قسطل بسماكة أصغرية 3 mm أو على شكل زاوية بأبعاد أصغرية 40×40×40mm. وتكون النهاية السفلية للوتد على شكل مخروط أو مشطوفة لتسهيل غرس الوتد في التربة، أما النهاية العلوية فتحتوي على قبعة من الخشب القاسي لتسهيل دق ودخول الوتد. يجب الإبقاء على النهاية العليا للوتد بدون طمر وتعمل له فتحة تفتيش بأبعاد تقريبية 40×40×40 cm، وذلك للتمكن من الكشف على وصلة الناقل الأرضي مع الوتد والتي يجب أن تنفذ جيداً بواسطة حلقة (كولييه) ذات برغي غير قابل للصدأ. تغطى فتحة التفتيش بواسطة غطاء من الحديد الفونت يبقى سطحه الخارجي بسوية الأرض المجاورة. يغرس الوتد عامودياً في الأرض لعمق معين بحيث تبقى نهايته العلوية على عمق 1-0.5 m. ويبين الشكل (36-6) توضيحاً لوتد ارضي.

شكل (6-36) وتد أرضي .

حين يتعذر الحصول على مقاومة تأريض منخفضة (وخاصة عندما تكون المقاومة النوعية للتربة عالية) يمكن ربط وتدين أو ثلاثة أوتاد أو أكثر على التفرع، ويجب أن لا تقل المسافة بين الوتد والآخر عن ضعف طول الوتد. وإذا كان البعد بين الوتد والآخر أكبر من ضعف طول الوتد فتهبط مقاومة التأريض للنصف لأجل وتدين، ولثلث في حالة ثلاثة أوتاد. أما إذا كان البعد أقل من ذلك فتحسب مقاومة التأريض لأجل الأوتاد التفرعية بالنسبة للمقاومة لأجل وتد واحد من العلاقات العملية التالية:

1- وتدان على التفرع:

$$\frac{\text{مقاومة وتدين على التفرع}}{\text{مقاومة وتد واحد}} = \frac{1+x}{2} \quad (6-7)$$

$$x = \left(\frac{\ell}{\ln 4\ell/a - 1} \right) / d \quad \text{حيث :}$$

d: البعد بين الوتدين .

2- ثلاثة أوتاد تشكل مثلثاً متساوي الأضلاع طول d:

$$\frac{\text{مقاومة ثلاثة أوتاد على التفرع}}{\text{مقاومة وتد واحد}} = \frac{1+2x}{3} \quad (6-8)$$

3- عدد من الأوتاد N مرتبة على شكل مربع مفرغ أو مليء:

$$\frac{\text{مقاومة } N \text{ وتداً على التفرع}}{\text{مقاومة وتد واحد}} = \frac{1 + kx}{N} \quad (6-9)$$

حيث: k ثابت يتعلق بعدد الأوتاد، وتؤخذ قيمته من الجدول (6-1).

الشكل (6-37) مجموعة أوتاد: a- مربع مفرغ، b- في مربع مليء

جدول (6-1)

عدد الأوتاد / ضلع	عدد الأوتاد الإجمالي	قيمة k
Hollow square مربع مفرغ		
2	4	2.7071
3	8	4.2583
4	12	5.3939
5	16	6.0072
6	20	6.4633
7	24	6.8363
8	28	7.1479
9	32	7.4195
10	36	7.6551
Solld square مربع مليء		
3	9	5.8917

4	16	8.5545
5	25	11.4371
6	36	14.0650
7	49	16.8933
8	64	19.5003
9	81	22.3069
10	100	24.9587

يجب أن تكون التوصيلات بين الأوتاد على عمق 0.5-0.75 m من سطح الأرض

6- قطب أرضي شبكي:

يتألف من قضبان متوازية مشكبة مع بعضها البعض بمسافات متساوية وتطمر على عمق 0.8 m في التربة. تحسب المقاومة وفق العلاقة العملية التالية:

$$R = \frac{\rho}{2D} \cdot k \quad (6-10)$$

حيث :

شكل

ρ المقاومة النوعية للتربة

D القطر المكافئ للشبكة

$$D = (4 \times \ell \times b / \pi)^{1/2} \quad (6-11)$$

ℓ = طول القضيب

B = عرض الشبكة

K = ثابت حسب البعد بين قضيب وآخر a، وقيمتته

$$a \leq 0.05l \quad 1.2 \text{ لأجل}$$

$$0.05l < a \leq 0.01l \quad 1.2 \text{ لأجل}$$

$$N = \frac{b}{a} + 1 \quad \text{عدد القضبان}$$

7- الأقطاب الأرضية الطبيعية:

قد يستفاد أحياناً من المؤرضات الطبيعية الموجودة بشكل دائم ضمن الأرض وبتلامس جيد معها، كأنايب المياه والهياكل المعدنية للأبنية المقامة في التربة والأغلفة المعدنية للكابلات.

ويجب الانتباه عند استخدام شبكة المياه إلى ضرورة قصر عداد المياه لحماية العاملين في مصلحة المياه أثناء صيانة وفك العداد.

وعلى العموم يجب عدم الاعتماد على هذه الحلول، وفي كل الأحوال يجب الحصول على موافقة الجهات صاحبة العلاقات قبل استخدام الشبكات المائية كمؤرض.

7-6 القياس العملي لمقاومة نظام التأريض Earth Testing

1-7-6 مبدأ القياس:

لقياس مقاومة الأرضي للقطب الأرضي E نأخذ وتداً أرضياً آخر R نغرسه في الأرض بعيداً جداً عن E ونصل القطبين بدارة كهربائية كما في الشكل (38-6).

الشكل (6-38) مبدأ قياس مقاومة نظام التأريض.

نقيس التيار بواسطة الجهاز A. نستخدم وتداً أرضياً ثالثاً P ونغرسه في الأرض في نقاط مختلفة حول E، فيقيس الفولتميتر V فرق الكمون بين E والنقاط المختلفة في التربة المحيطة و فرق الكمون هذا، حسب قانون أوم، يتناسب طردياً مع مقاومة الأرض بين E والنقطة حيث القطب P، وعليه نستطيع أن نرسم منحنيّاً يمثل العلاقة بين المقاومة والبعد عن القطب E المراد فحص تأريضه، كما هو مبين في الشكل (6-39). ونلاحظ أن المقاومة تتزايد كلما حركنا P بعيداً عن E، وتثبت المقاومة عند قيمة معينة تقريباً بعد أن يتجاوز P مسافة معينة عن E. وهذه المسافة أدعوها المسافة الدنيا لثبات مقاومة الأرض لـ E. يجب مراعاة ما يلي لدى القياس:

الشكل (6-39) مقاومة التأسيس بدلالة المسافة عن القطب E المراد فحصه.

- a- يجب أن يكون قطب التيار R بعيداً عن القطب المراد فحصه E بحيث لا تتدخل المسافات الدنيا لكلا القطبين.
- b- قطب الكمون P يجب أن يغرس في مواقع خارج المسافتين.
- d- يجب أن يغرس قطب الكمون P على المستقيم الواصل بين E و R

2-7-6 جهاز القياس Earth Tester

هذا الجهاز يستخدم لقياس مقاومة نظام التأسيس والمقاومة النوعية للتربة. النوع المفضل هو ذو أربعة المآخذ، خرج متناوب. وهو عبارة عن مقياس أوم ذي وشيعةتين، ومولد مصمم بحيث يمرر تياراً متناوباً إلى التربة وتياراً مستمراً إلى وشيعةتي مقياس الأوم. ولهذا الجهاز عادة مجال توتر V 10-110، ومجال تيار حتى 5 ميلي أمبير، تردد 92-95 هرتز، مجال أومي من 0-2 حتى 10000 أوم. يتألف مقياس الأوم من وشيعةتين تشكّلان بينهما زاوية ثابتة ومثبتتين على محور مشترك، وتتحركان ضمن حقل مغناطيسي دائم. يمر في وشيعة التيار (CC) تيار متناسب مع التيار الكي في دائرة الفحص، أما في وشيعة الكمون (PC) فيمر تيار متناسب مع مقاومة التأسيس المطلوب قياسها. إن نظام الوشيعةتين يجعل الجهاز مقياس أوم فعلي يعطي قراءات بالأوم مستقلة عن التوتر المطبق وسرعة الدوران ومقاومة التماس للأوتاد الأرضية.

يبين الشكل (6-40) توصيلات الفاحص الأرضي.

الشكل (6-40) مخطط عمل جهاز القياس الأرضي

يمر التيار المستمر الخارج من المولد خلال وشيعة التيار إلى قالب تيار دوار التيار المتناوب يصل مأخذ التيار للجهاز (C_1 و C_2) الموصلة إلى E و R . أما وشيعة الكمون لمقياس الأوم فتحصل على التغذية من مأخذ الكمون للجهاز (P_1 و P_2) الموصلة إلى P و E .

ونظراً لأن هذه التغذية مستجرة من القسم الأرضي لدارة التيار، وبالتالي متناوبة، فيجب أن تحول إلى تيار مستمر قبل عبور وشيعة الكمون. لذلك يُلاحظ مجمع يُركب على نفس محور قالب التيار الرئيسي ومتواقت معه، يعمل كمقوم بين مآخذ الكمون ووشيعة الكمون. الأجهزة الحديثة تزود بنظام مجمع ذي تواقـت الكتروني. وهكذا فإن وشيعة التيار والكمون لمقياس الأوم تغذيان بتيار مستمر، بينما يتغذى القسم الأرضي من دائرة الاختبار بتيار متناوب.

يجب مراعاة مايلي لدى استخدام الجهاز الفاحص الأرضي:

-لدى اختيار بئر أرضي مؤلف من وتد أرضي وحيد أو من صفيحة وحيدة، ينصح بأن يكون بعد وتد التيار R حوالي 30 متراً ووتد الكمون حوالي 15 متراً. تزداد هذه المسافات لأجل بئر أرضي مؤلف من قطب أرضي شبكي.

- ينصح بأخذ ثلاث قراءات بواسطة قطب الكمون وذلك بغرسه في ثلاث نقاط:

** النقطة الأولى في منتصف المسافة بين قطب الكمون المدروس E وقطب التيار R.

** النقطة الثانية تبعد عن الأولى 3 m باتجاه E.

** النقطة الثالثة تبعد عن الثانية 3 m باتجاه E.

إذا كانت القراءات الثلاث متطابقة (ضمن مجال دقة القياس بالطبع) فالقيمة الوسطية لها هي مقاومة التأريض لنظام التأريض E، إذا كان التطابق غير موجود، يجب غرس قطب التيار على مسافة أبعد، وإعادة عملية القراءات الثلاثة للعملية بأكملها (أي غرس R على مسافة أبعد + أخذ 3 قراءات) تكرر حتى نحصل على 3 قراءات لوضع معين لـ R مقبولة من حيث الدقة.

- القطب المدروس وقطب التيار وقطب الكمون يجب أن تقع على مستقيم واحد (القطب المدروس محدد، قطب التيار يحدد من قبل الفاحص، قطب الكمون يختار مكان غرسه بعد ذلك حسب التوصيات السابقة).
لقياس المقاومة النوعية لترية ما بواسطة نفس الجهاز نتبع طريقة فينر Wenner كما يلي:

- نستخدم 4 أوتاد للقياس، تغرس في التربة المدروسة على مستقيم واحد وبمسافات منتظمة (متساوية).
- تبعد الوصلة ℓ_1 بين P_1 و C_1 .
- نوصل الوتدين الخارجيين على المأخذين C_1 و C_2 ونوصل الوتدين الداخلين إلى المأخذين P_1 و P_2 .
- يعطي الجهاز قراءة معينة R نحسب منها المقاومة النوعية للتربة من العلاقة:

$$\rho = 2\pi a R \quad (6-12)$$

حيث :

ρ المقاومة النوعية ب أوم متر
 a = المسافة بين وتد وآخر متر
 R = القراءة أوم

8-6 تصميم الناقل الأرضي في الأبنية السكنية والورشات الصناعية:

يعطي الجدول (6-2) مقطع الناقل الأرضي الرئيسي، ومقطع الناقل الأرضي الفرعي انطلاقاً من مقطع أكبر ناقل نحاسي في الدارة المعنية (أي للنواقل غير الأرضية). ويقصد بالنواقل الأرضية هنا التي تصل للبئر الأرضي وتفرعاتها.

الجدول (6-2)

مقطع الناقل الأرضي المرافق للتمديدات الفرعية mm ²	مقطع الناقل الأرضي الرئيسي Mm ²	مقطع أكبر ناقل نحاسي في التمديدات mm ²
2.5	6	1.0
2.5	6	1.5
2.5	6	2.5
4.0	6	4.0
4.0	6	6.0
6.0	6	10.0
10.0	16	16.0
16.0	16	25.0
16.0	16	35.0
35.0	30	50.0
35.0	35	70.0
50	50	95
50	50	130
50	50	150
70	70	180
70	70	240
70	70	300

6-8-1 في الأبنية السكنية:

بعد اعتماد نموذج البئر الأرضي يتم تمديد الناقل الأرضي الرئيسي (أو النواقل الأرضية الرئيسية) ضمن فتحات التمديدات العامودية للبناء، وتوصل إليه نواقل التأريض الفرعية العائدة للشقق. لأجل بناء مؤلف من 5 طوابق ، على سبيل المثال،

يكون مقطع الناقل الأرضي الرئيسي 35 mm^2 نحاس على الأقل، ويكون مقطع الناقل الفرعي الواصل للشقق 6 mm^2 نحاس على الأقل.

مثال (6-4) :

معطي وحدة سكنية مؤلفة من طابقين وقبو (الشكل 6-41) .
والمطلوب:

- 1- تصميم البئر الأرضي، آ على شكل وتد، ب على شكل ناقل حلقي
- 2- تصميم النواقل الأرضية.

الحل:

- 1- آ: نحسب أولاً قيمة مقاومة التأسيس الضرورية للبناء

الشكل (6-41) مسقط أفقي للبناء العائد للمثال العملي.

$$\text{مقاومة التأريض} = \frac{\text{توتر التماس الحرج}}{\text{التيار الاسمي} \times 2.5}$$

التيار الاسمي للوحة التغذية الرئيسة = 30 أمبير.

وعليه فمقاومة التأريض = $65 = (2.5 \times 30) \div 0.866 = 1$ أوم تقريباً

لو فرضنا أن المقاومة النوعية للأرض = 40 أوم متر وطول الوند 2.5 وقطره 50mm
فنجند بتطبيق العلاقة (6-1):

$$R = \frac{40 \times 100}{2 \times 3.14 \times 250} \left(\ln \frac{4 \times 250}{2.5} - 1 \right) = 12.7 \text{ ohm}$$

ونلاحظ أنه حتى لو استخدمنا ثلاثة أوتاد تفرعية، البعد بين كل وتد وآخر 5 m
على الأقل فستكون المقاومة حوالي 4 أوم.

والحل الفني في هذه الحالة، إما أن نستخدم عدداً أكبر من الأوتاد أو نقتصر على
الأوتاد الثلاثة على أن نحسن المقاومة النوعية للتربة، بالطرق التي ورد ذكرها في هذا

البحث، بحيث تصبح 10 أوم متر إذ في هذه الحالة تصبح المقاومة الإجمالية (بإهمال مقاومة الناقل الأرضي):

$$1 = \frac{12.7}{3 \times 4} \text{ أوم تقريباً}$$

طبعاً لا بد من دراسة اقتصادية للوصول للحل المثالي.

1-ب: ناقل حقيقي: لأجل قطر حلقة 13 m ومقاومة نوعية 40 أوم متر تكون مقاومة البئر الأرضي $= 7 \div 40 = 5.7$ أوم ، وهكذا نحتاج لأكثر من حلقة على التوازي، أو نعالج التربة بهدف تخفيض مقاومتها النوعية. ونرى أن حل الأوتاد هو الأفضل.

2- مقاطع النواقل الأرضية: باعتبار أكبر مقطع نحاسي مستخدم لمثل هذا الحمل هو 10 mm^2 نختار مقطع الناقل الأرضي الرئيسي الواصل بين البئر الأرضي واللوح الرئيسية 6 mm^2 ، أو 10 mm^2 ، (أكثر أماناً). مقطع الناقل الأرضي الواصل بين اللوحة الرئيسية واللوح الفرعية (لوحة الطابق الثاني أو الأول) هو 4 mm^2 . مقطع النواقل الأرضية للشقق هو 2.5 mm^2 .

ملاحظات:

1- إذا كان جزء من الناقل الأرضي الواصل بين البئر الأرضي واللوح الرئيسية، مغروساً في التربة فتحسب مقاومة هذا الجزء من العلاقة (6-1) وتضاف إلى مقاومة البئر (تفرعياً أو تسلسياً حسب الحال).

2- إذا كان البناء متعدد الطوابق وله هوائي تلفزيون وحماية من الصواعق فيكون نظام التأريض كما في الشكل (6-42). على سبيل المثال

الشكل (6-42) نظام تأريض لبناء متعدد الطوابق.

2-8-6 في الورشات والأماكن الصناعية:

يُمدد الناقل الأرضي بحيث يمكن وصل هياكل الآلات والأجزاء المعدنية إليه وتتم حمايته من العوارض الميكانيكية والمواد الكيميائية والتي قد تؤثر على سلامته وذلك بوضعه ضمن مجرة أو يُمدد على رفوف الكبلات أو يتم تثبيته جيداً على الجدار والشكل (6-43) يبين مثلاً لتوزيع شبكة تأريض في ورشة.

9-6 القواطع الآلية التفاضلية:

بالنظر لارتباط دقة عمل أجهزة الحماية مع حسن انخفاض مقاومة شبكة التأريض، فقد تم تصنيع قواطع آلية حديثة (تفاضلية) تضمن حماية الأشخاص من عوارض التكهرب بصورة مثالية وفعالة وبسرعة فائقة، دون الاعتماد على قيم مقاومة

شبكة التأسيس. فالقاطع التفاضلي يتحسس من أجل أدق تيارات الخطأ (كأجزاء من الأمبير) التي قد تمر في هيكل الجهاز أو في جسم الإنسان، نتيجة عطل أو خطأ أو لمس لأحد القطع المكهربة، ويفصل التيار الكهربائي عن الجهاز بسرعة كبيرة تصل إلى 30 جزءاً من الألف من الثانية، وبالتالي لا يشعر الإنسان بشيء.

مواصفات القواطع الآلية التفاضلية:

إن القواطع الآلية التفاضلية تضمن خلال وقت صغير (أجزاء الثانية) فتح الدارة لتلافي:

- عطل في العازلية بداخل جهاز ما.
- التكهرب نتيجة لمس جهاز به عطل داخلي في العازلية الكهربائية ويكون ناقل التأسيس مقطوعاً أو أن مقاومة شبكة الأرضي مرتفعة أو سيئة.



الشكل (6-43) تأريض ورشة صناعية

- عند وجود عطل إلى الأرض في التمديدات الواقعة بعد القاطع ومرور تيار الخطأ.

- أو عندما يمس شخص القطع المكهربة في الجهاز أو في التمديدات (مسك ناقل سيء العازلية).
- أو الالتباس بتبديل ربط ناقل الطور بدلاً من الناقل الأرضي.

إن حساسية هذه القواطع تكون من أجل شدة تيار الخطأ، الذي يمر إلى الأرض مباشرة أو عن طريق جسم الإنسان هي 30 ميلي أمبير أو أكثر، وبالتالي فإن هذه القيمة تقع تحت - الحدود المؤذية أو الخطرة على جسم الإنسان.

مبدأ العمل:

في الحالات الطبيعية، إن المجموع الشعاعي للشدة الكهربائية في النواقل والخط الحيادي يكون معدوماً. وعند حدوث عطل يظهر تيار خطأ إلى الأرض، وبالتالي فإن مجموع الشدات لا ينعدم في النواقل التي تؤلف الدارة الأولية في المحول الحساس للقواطع، وبالتالي يحصل فرق في التوتر على طرفي الدارة الثانوية للمحول الحلقوي التفاضلي الذي تمر ضمنه النواقل.

وهذا التيار يعمل على فتح قفل إغلاق القاطع بمدة تتراوح بين 20-30 ميلي ثانية. كما هو مبين في الشكل (6-44) و (6-45) وسيرد فيما بعد المزايا لهذه القواطع التفاضلية.

الشكل (6-44) قاطع آلي
تفاضلي وحيد الطور.

الشكل (6-45) القاطع الآلي التفاضلي ثلاثي الطور

مزايا القواطع الآلية التفاضلية:

تعطي القواطع الآلية التفاضلية مزايا كبيرة تسمح بقبول قيم مقاومة الأرضي الكبيرة التي نحصل عليها بدون دفع التكاليف الكبيرة من أجل تحسينها وعلى سبيل المثال:

من أجل قاطع آلي تفاضلي بحساسية 500 ميلي أمبير، فإنه يعمل فوراً من أجل هذه الشدة، وبالتالي فإن مقاومة الأرض تكفي أن تكون:

نظام فرنسي (مبلل) = (24 فولط) $\div 0.500 = 48$ أوم

نظام فرنسي (عادي) = (50 فولط) $\div 0.500 = 100$ أوم

نظام ألماني (عادي) = (65 فولط) $\div 0.500 = 130$ أوم

ومن أجل قاطع آلي تفاضلي بحساسية 30 ميلي أمبير، فإن مقاومة الأرضي تكفي أن تكون

$$\text{نظام فرنسي (مبلل)} = (24 \text{ فولط}) \div 0.030 = 800 \text{ أوم}$$

$$\text{نظام ألماني (عادي)} = (65 \text{ فولط}) \div 0.030 = 2160 \text{ أوم}$$

$$\text{نظام فرنسي (عادي)} = (50 \text{ فولط}) \div 0.030 = 1160 \text{ أوم}$$

مجال التطبيق:

بالنظر لارتفاع ثمن القواطع الآلية التفاضلية عن مثيلاتها من القواطع الآلية التقليدية (5-7مرات) كما أن تصنيع هذه القواطع لا يزال من أجل الحدود العادية للشدة الكهربائية.

لذلك فإن استعمالات هذه القواطع بصورة جوهرية محصورة في المنازل والفنادق والمستشفيات من أجل حماية:

- آلة الغسيل.
- الدارة الكهربائية في الحمام.
- الدارة الكهربائية في غرف الأطفال.
- شبكة المآخذ الكهربائية التي قد ترتبط عليها مختلف التجهيزات الكهربائية المتحركة أو التي قد يعيث بها الأطفال الصغار لوجودها في متناول أيديهم.
- أو الحماية الكاملة للمنزل.

وبذلك يمكن الحصول على حماية كافية دون التقيد بجودة مقاومة شبكة التأريض، وبالتالي توفير التكاليف الكبيرة لتحسين شبكة التأريض.

وبالمقابل فإنه يتطلب أن تكون شبكة التمديدات - الداخلية في المنزل نظامية ومنفذة حسب الأصول الهندسية (وطبعاً هذا أمر مرغوب) لأن أية نقطة ضعف فيها

تسبب عمل القاطع الآلي التفاضلي وانقطاع التيار الكهربائي جزئياً أو كلياً حسب مكان وضع القاطع في الشبكة.

وإن كثرة الانقطاعات تسبب لدى المستثمر انزعاجاً مقلقاً ويكون القاطع التفاضلي الضحية، وبالتالي عدم الاستفادة من المزايا التي يمكن لهذا التصميم المثالي أن يقدمها في المنازل.

وقد يفكر البعض أنه بوجود القواطع الآلية التفاضلية قد لا يحتاج مطلقاً إلى شبكة التأريض. وبالعكس، فإن شبكة التأريض تفرضها نظم الأمان المعتمدة في جميع أنحاء العالم المتطور، ولا بد من وجودها لتصريف تيارات الخطأ بصورة عامة، ومن أي مصدر كانت، بسهولة إلى الأرض المفضلة (البئر الأرضي)، وعلى سبيل المثال، فإنه من الضروري تأريض القطع المعدنية الموجودة في الحمام (حنفيات - قساطل - نوافذ معدنية..) والتي قد تكون بمثابة يد المستثمر ومن الممكن أن تكتسب فرقاً في التوتر الكهربائي من الشبكة الكهربائية للبيت أو من الشبكة الكهربائية للجوار عن طريق هذه التمديدات. كما أن النظم المعتمدة للصناعة تفرض وجود شبكة التأريض.