منشورات جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

نظم القدرة الكهربائية

جريان الحمولة والأعطال الكهربائية

الدكتور
علي حمزة
أستاذ في قسم هندسة الطاقة الكهربائية

الدكتور
حسان السويدان
أستاذ مساعد في قسم هندسة الطاقة الكهربائية

جامعة دمشق

السنة الثالثة والعشرون والعشرون

العدد الثالث والعشرون والعشرون م

نظم القدرة الكهربائية

جريان الحمولة والأعطال الكهربائية

قسم هندسة الطاقة الكهربائية

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

منشورات جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

نظم القدرة الكهربائية

جريان الحمولة والأعطال الكهربائية

الدكتور
علي حمزة
أستاذ في قسم هندسة الطاقة الكهربائية

الدكتور
حسان السويدان
أستاذ مساعد في قسم هندسة الطاقة الكهربائية

جامعة دمشق

تم بحمد الله

والثلاثين والعشرين والعشرين م

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفهرس

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

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

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

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

Damascus University

مقدمة :

يغطي هذا الكتاب منهاج مقرر نظم القدرة الكهربائية في الفصل الثاني للسنة الرابعة – قسم هندسة الطاقة الكهربائية.

يتناول الفصل الأول من هذا الكتاب مواضيع تحليل جريان الحمولة وخاصة تلك المتعلقة بتشكيل مصفوفة السماحيات وحل معادلات النظام غير الخطية بالطرق الحاسوبية مثل طريقة غاوص – زايدل وطريقة نيوتن – رافسون وتعديلاتها.

ويتناول الفصل الثاني تمثيل الآلة التزامنية في الحالة العابرة، حيث يتم التركيز على محارضات الآلة وعوابر الآلة التزامنية. وكذلك حالات القصر على أقطاب هذه الآلة مثل القصر ثلاثي الطور المتوازن والقصر غير المتوازن (قصر طورين، قصر طور – أرض).

ثم ننتقل في الفصل الثالث لدراسة العطل الثلاثي الطور المتوازن في نظام القدرة الكهربائية، واستطاعة القصر وطريقة اختيار القواطع الآلية اللازمة لحماية الشبكة الكهربائية.

وكمقدمة لدراسة الأعطال غير المتوازنة نورد في الفصل الرابع دراسة للمركبات المتناظرة والممانعات التتابعية لمختلف عناصر الشبكة من حمولات وخطوط نقل وآلات تزامنية ومحولات.

ويغطي الفصل الخامس الأعطال غير المتوازنة التي يمكن أن تحدث على الشبكة الكهربائية وكيفية حساب تيار العطل في كل منها.

ويعالج الفصل السادس والأخير مواضيع التأريض مثل القطب الأرضي وأنظمة التأريض وتأريض الحماية في الأبنية السكنية والورشات الصناعية ومراكز التحويل وتأريض الأبراج وناقل الحماية في الشبكات الهوائية وتأريض نقطة النجمة.

وقد تم التركيز في هذا الكتاب على النقاط التالية:

- بالإضافة إلى التحليل الأكاديمي المتقدم فقد تعرضنا بإسهاب للجوانب العلمية في مجال الاستثمار والتشغيل والتصميم للمواضع المدروسة.
- إنجاز أمثلة عملية ودراسات وافية حول حالات التشغيل النظامية وغير النظامية للشبكة السورية، بالإضافة إلى حل بعض مسائل الشبكات الكهربائية وكتابة الألغوريتمات اللازمة لحلها على الحاسوب.

لقد تم الاعتماد في إعداد هذا الكتاب على أحدث الكتب والنشرات والبحوث العلمية.

ولنا وطيد الأمل أن يجد طلابنا الأعزاء وزملاؤنا المهندسون العاملون في قطاعات ومجالات هندسة الطاقة الكهربائية في هذا الكتاب المادة الأساسية التي يحتاجونها لمعاجلة مسائل الشبكات الكهربائية.

المؤلفان

الأستاذ الدكتور المهندس علي حمزة

الأستاذ المساعد الدكتور المهندس حسان السويدان

Damascus University

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 آحادية الطور.

وتحوي 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 سماحيات 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 إلاّ 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.

وسنتعرف في هذا الفصل على مصفوفة السماحيات لمعادلات العقد، وكذلك على الطرق المعروفة لحل المعادلات الجبرية غير الخطية مثل طريقة غاوص-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 (2-1) مخطط السماحيات للنظام المبين بالشكل (1-1).

لنعرِّف 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:

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

أو :

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

حيث : I_{bus} شعاع التيارت 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:

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

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

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

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

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

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 ألغوريتم 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 الواحدية.

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) $E_1 = 1.1\angle 0^o$ ، $E_2 = 1.0\angle 0^o$

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 :

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

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

$$f(x) = 0 \qquad (1\text{-}6)$$

ويمكن إعادة ترتيب الدالة السابقة وكتابتها بالشكل:

$$x = g(x) \qquad (1\text{-}7)$$

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

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

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

$$|x^{(k-1)} - x^{(k)}| \le \varepsilon \qquad (1\text{-}9)$$

حيث تمثل ε الدقة المرغوبة

مثال (1-2):

استخدم طريقة غاوص – 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 غاوص – 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 2.8966 , 3.3376 , 3.7398 , 3.9568 , 3.9988 , 4.000 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 Z_{ig} Z_{ag}، 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:

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

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 3.0801 , 3.1831 , 3.7238 , 4.0084 , 400005 , 3.9978.

ويبين الشكل (4-1) تأثير عامل التسريع.

الشكل (4-1) طريقة غاوص–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.

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

$$\begin{aligned} &f_1(x_1, x_2, \ldots, x_n) = c_1 \\ &f_2(x_1, x_2, \ldots, x_n) = c_2 \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ &f_n(x_1, x_2, \ldots, x_n) = c_n \end{aligned} \tag{1-11}$$

نرتب جملة المعادلات السابقة بشكل مناسب

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

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

وينتج عن المعادلات (1-12) حل تقريبي جديد $(x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \ldots\ldots, x_n^{(1)})$.

الجدير بالذكر أنه في طريقة غاوص- زايدل 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

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

1-3-2 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 غاوص–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:

$$f_i(x_1, x_2, ...x_n) = 0 \quad ; \quad i = 1,2,....,n \qquad (1\text{-}14)$$

نفرض

$x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, ..., x_n^{(0)}$ القيم الابتدائية للمجاهيل

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

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

$$f_i(x_1^o + \Delta x_1^o, x_2^o + \Delta x_2^o, ..., x_n^o + \Delta x_n^o) \qquad (1\text{-}15)$$

ننشر هذه المعادلات في سلسلة تايلور حول الفرض الابتدائي فنجد:

$$f_i(x_1^o, x_2^o, ..., x_n^o) + [(\frac{\partial f_i}{\partial x_1})^o \Delta x_1^o, (\frac{\partial f_i}{\partial x_2})^o \Delta x_2^o, ..., (\frac{\partial f_i}{\partial x_n})^o \Delta x_n^o] \qquad (1\text{-}16)$$
$$+ \text{Higher Order Terms}$$

حدود ذات درجة أعلى

حيث $(\frac{\partial f_i}{\partial x_1})^o, (\frac{\partial f_i}{\partial x_2})^o, ..., (\frac{\partial f_i}{\partial x_n})^o$ المشتقات الجزئية f_i بالنسبة لـ $x_1, x_2, ...x_n$

لأجل القيم $(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, ..., x_n^{(0)})$.

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

$$\begin{bmatrix} f_1^o \\ f_2^o \\ : \\ f_n^o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (\frac{\partial f_1}{\partial x_1})^o & (\frac{\partial f_1}{\partial x_2})^o & .... & (\frac{\partial f_1}{\partial x_n})^o \\ (\frac{\partial f_2}{\partial x_1})^o & (\frac{\partial f_2}{\partial x_2})^o & .... & (\frac{\partial f_2}{\partial x_n})^o \\ : & : & .... & : \\ (\frac{\partial f_n}{\partial x_1})^o & (\frac{\partial f_n}{\partial x_2})^o & ..... & (\frac{\partial f_n}{\partial x_n})^o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^o \\ \Delta x_2^o \\ : \\ \Delta x_n^o \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} o \\ 0 \\ : \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (1\text{-}17)$$

أو بالشكل المختصر :

$$f^o + A^o \Delta x^o \approx 0 \qquad (1\text{-}18)$$

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

ويمكن كتابة المعادلة (1-18) بالشكل:

$$f^o = [-A^o]\Delta x_0 \qquad (1\text{-}19)$$

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

$$x^1 = x^o + \Delta x^o \qquad (1\text{-}20)$$

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

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

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

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

حيث ε قيمة تحدد مسبقاً a specified value.

مثال (1-4) :

حِل 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 : $x_1^{(0)}=0 \quad ; \quad x_2^{(0)}=0$

نحسب $f^{(0)}$:

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

نشكل المتريس 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:

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

نوجد $\Delta x^{(0)}$ من المعادلة (1-12) ويمكن استخدام طريقة قلب المتريس [A°]، نظراً لصغر أبعاده في هذا المثال:

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

- 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:

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

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

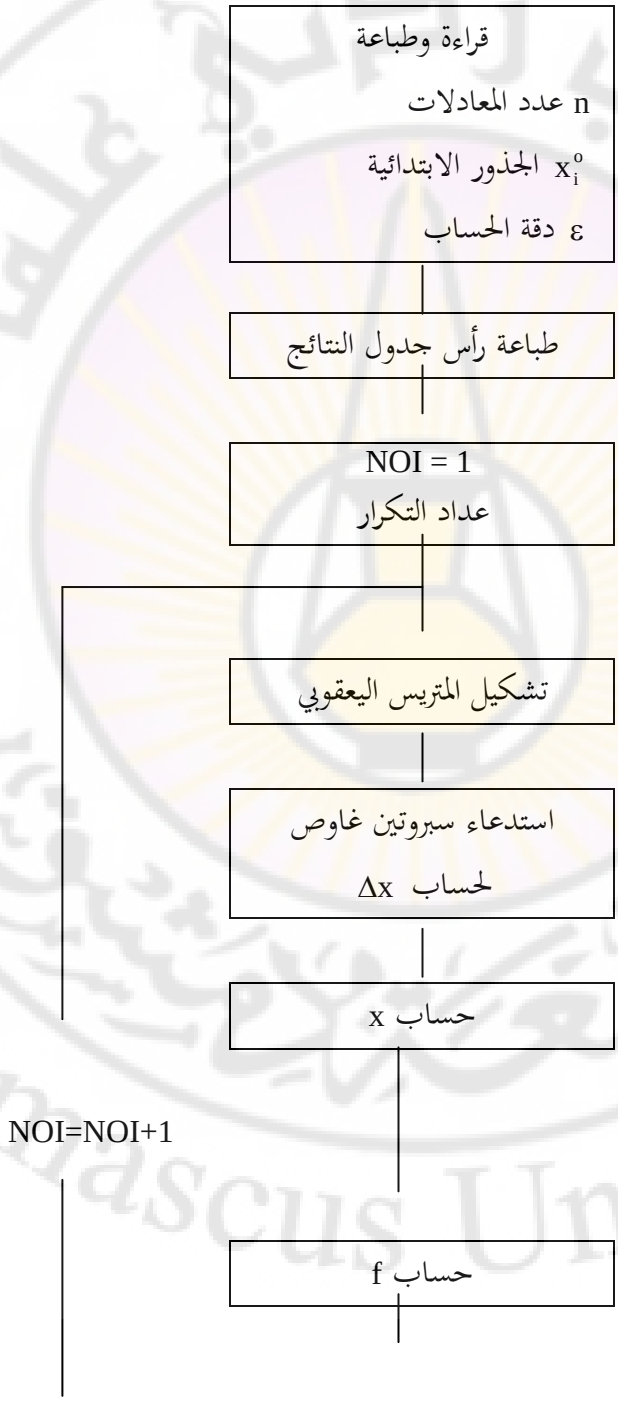
$$\Delta x^{(1)} = \begin{bmatrix} 0.75 & -0.25 \\ -0.25 & 0.75 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.25 \\ 0.25 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +0.25 \\ -0.25 \end{bmatrix}$$

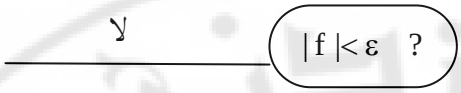
$$x^{(2)} = x^{(1)} + \Delta x^{(1)} = \begin{bmatrix} 0.75 \\ -0.75 \end{bmatrix}$$

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

وهكذا تستمر عمليات التكرار إلى أن نصل إلى الدقة المطلوبة.

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





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

4–1 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.

ولحل 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 صفر)، بينما تكون الاستطاعة الفعالة والاستطاعة الردية غير معينة.وعادةً يوجد باسبار 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 باسبار (ولنسمه باسبار 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 بالـ MVA.

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

بتطبيق قانون كيرشوف للتيارات على هذا الباسبار نحصل على

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

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

أو

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

الاستطاعة الفعالة والاستطاعة الردية عند الباسبار i.

$$P_i = jQ_i = V_i I_i^* \qquad (1\text{-}25)$$

أو

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

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

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

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

1–5 حل مسالة جريان الحمولة بطريقة غاوص– زايدل

Gauss-Seidel Power Flow Solution:

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

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

حيث y_{ij} المبينة بأحرف صغيرة هي السماحية الطبيعية بالكميات الواحدية، Q_i ، P_i الاستطاعة الفعالة والردية بالكميات الواحدية. 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:

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

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

ويعبر عادةً عن معادلات جريان الحمولة 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).

$$V_i^{(k+1)} = \frac{\dfrac{P_i - jQ_i}{V_i^{*(k)}} - \sum\limits_{j \neq i} y_{ij} V_j^{(k)}}{Y_{ii}} \qquad (1\text{-}31)$$

و

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

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

وتشمل y_{ii} السماحية بين الخط والأرض، وكذلك أية سماحية ثابتة إلى الأرض.

بما أن كلا مركبتي 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 نموج P-V تكون المعاليم وكما ذكرنا سابقاً Pi، و |Vi|، 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:

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

أو

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

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.

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

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 :

$$| e_i^{(K+1)} - e_1^{(K)} | \le \varepsilon$$
$$| f_i^{(K+1)} - f_1^{(K)} | \le \varepsilon \qquad (1\text{-}37)$$

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 Loead 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 متريسيي 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 المتراجحة:

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

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 وردية، 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 ومحردة وقطينة وبانياس، وتبين المنطقة المهشرة 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 التهييج زائداً. هذه النقطة تتحدد بارتفاع درجة حرارة ملفات الدوار.

النقطة B : تعطي الاستطاعة الردية العظمى التي ينتجها المولد عندما يحمل بـ 30% (عنفة مائية) أو 50% (عنفة بخارية) من استطاعته الاسمية الفعالة الاسمية ويكون التهييج 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:

	A	B	C	D	
الثورة	61.9	83	40	61	م ف آر
بانياس	127.5	138	25.5	54	
قطينة 64	48	52	9.6	24	
محردة	112.5	120	23	53	

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

$$\sum_{i} P_{Gi} = \sum_{1} P_{Di} + P_L$$

$$\sum_{i} Q_{Gi} = \sum_{1} Q_{Di} + Q_L$$

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

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

Damascus University

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

Damascus University

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

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

Damascus University

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

Damascus University

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:

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

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

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

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

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

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

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

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

$$S_{L\,ij} = S_{ij} = + S_{ji} \qquad (1\text{-}42)$$

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 3 , 2 هي الاستطاعات المبينة على المخطط،وممانعات الخطوط معطاة بالـ Per unit منسوبة لأساس 100 MVA والسماحيات التفرعية للخط مهملة.

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

الممانعات بالكميات الواحدية 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 الواحدية هي:

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

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

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

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

كما يلي:

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

السماحيات بالكميات الواحدية نسبة لأساس 100 MVA

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

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

$$= 0.9825 - j0.0310$$

و

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

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

$$= 1.0011 - j0.0353$$

ومن أجل التكرار الثاني لدينا

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

$$= 0.9816 - j0.0520$$

و

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

$$= 1.0008 - j0.0459$$

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

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

وبالتالي الحل ا لنهائي:

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

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

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

$$P_1 - jQ = V_1^*[V_1(y_{12} + y_{13}) - (y_{12}V_2 + y_{13}V_3)]$$

$$= 1.05\ [\ 105\ (20\text{-}j50)\text{-}(10\text{-}j20)(0.98\text{-}j0.06)\text{-}(10\text{-}j30)(1.0\text{-}j0.05)]$$

$$=4.095 - j1.980$$

أي أن الاستطاعة الفعالة والردية لباسبار المرجع

$$P_1 = 4.095 \ \ pu = 409.5 \ \ MW$$

$Q_1 = 1.980$ pu = 189 Mvar

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

$I_{12} = y_{12}(V_1 - V_2) = (10 - j20)\,[(1.05 + j0) - (0.98 - j0.06)]$

$= 1.9 - j0.8$

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

$I_{13} = y_{13}\,(V_1 - V_3) = (10 - j30)\,[(1.05 + j0) - (1.0 - j0.05)]$

$= 2.0 - j1.0$

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

$I_{23} = y_{23}\,(V_2 - V_3) = (16 - j32)\,[(0.98 - j0.06) - (1 - j0.05)]$

$= -0.64 + j4.8$

$I_{32} = - I_{23} = 0.64 - j\,0.48$

وبالتالي الاستطاعة على الخطوط

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

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

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

$S_{31} = V_3 \ I^*_{31} = (1.0 - j0.05)\ (-2.0 - j\,1.0) = -2.05 - j\,0.90$ pu
$= -205.0$ MW $+ j\,90.0$ Mvar

$S_{23} = V_2\, I^*_{23} = (0.98 - j0.06)\ (-0.656 + j0.48) = -0.656 - j0.432$ pu
$= -65.6$ MW $- j\,43.2$ Mvar

$S_{32} = V_3 \ I^*_{32} = (1.0 - j0.05)\ (0.64 + j0.48) = 0.664 + j0.448$ pu
$= 66.4$ MW $+ j\,44.8$ Mvar

وتكون ضياعات الخط

$S_{L\,12} = S_{12} + S_{21} = 8.5$ MW $+ j\,17.0$ Mvar

$S_{L\,13} = S_{13} + S_{31} = 5.0$ MW $+ j\,15.0$ Mvar

$S_{L\,23} = S_{23} + S_{32} = 0.8$ MW $+ j\,1.60$ 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 تعيير طويلة التوتر على الباسبار 1 على القيمة 1.05 pu ، وتثبت طويلة 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 بالـ 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 :

$$y_{12} = 10 - j20 \quad , \quad y_{13} = 10 - j30 \quad , \quad y_{23} = 16 - j\,32$$

استطاعات التوليد والأحمال بالكميات الواحدية:

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

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

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

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

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

$$= \frac{\dfrac{-4.0 + j2.5}{1.0 - j0} + (10 - j20)(1.05 + j0) + (16 - j32)(1.04 + j0)}{(26 - j52)}$$

$$= 0.97462 - j0.042307$$

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 (30-1).

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

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

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

$$= \frac{\dfrac{2.0-j1.16}{1.04-j0} + (10-j30)(1.05+j0) + (16-j32)(0.9742-j0.042307)}{(26-j62)}$$

$$= 1.03783 - j0.005170$$

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

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

$$= \frac{\dfrac{-4.0 + j2.5}{0.97462 + j0.42307} + (10 - j20)(1.05) + (16 - j32)(1.039987 + j0.005170)}{(26 - j52)}$$

$$= 0.971057 - j0.043432$$

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

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

$$=1.38769$$

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

$$= \frac{\dfrac{2.0 - j1.38796}{1.039987 + j0.00517} + (10 - j30)(1.05) + (16 - j32)(0.971057 - j0.042432)}{(26 - j62)}$$

$$= 1.03908 - j\ 0.00730$$

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

$$V_2 = 0.97168\angle -2.6948^o \quad pu$$

$$S_3 = 2.0 + j1.4617 \quad pu$$

$$V_3 = 1.04\angle -0.498^o \quad pu$$

$$S_1 = 2.1842 + j1.4085 \quad pu$$

ويحسب جريان الحمولة على الخطوط والضياعات 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 - 101.947
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

1–7 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 ولابد 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 ±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 تغيّر التوتر يتم من خلال إزاحة موجبة لزاوية الطور وتغيّر التيار يتم من خلال إزاحة سالبة لزاوية الطور. لذلك ومن أجل الاتجاه المفروض للتيارات يكون لدينا:

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

$$I_i = -a^* I_j \qquad (1\text{-}44)$$

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:

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

كذلك لدينا من المعادلة (1-44):

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

وبتعويض I_i من المعادلة (1-45) يكون لدينا

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

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

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

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

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

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:

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

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

حيث

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

أو

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

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

أو

$$Q_1 = V_i \sum V_k (G_{ik} \sin\delta_{ik} - B_{ik} \cos\delta_{ik}) \qquad (1\text{-}51)$$

حيث:

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

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

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

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

حيث Δx^o هنا تقابل :

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

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

(1-54)

حيث:

$$H_{im} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_m}$$

$$N_{im} = \frac{\partial P_i}{\partial |V_m|} \qquad (1\text{-}55)$$

$$J_{im} = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_m}$$

$$L_{im} = \frac{\partial Q_i}{\partial |V_m|}$$

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 لايدخل الباسبار المرجع في المتريس اليعقوبي.

– لنعتبر الآن وجود قضبان من نوع P-V

إذا كان القضيب i من نوع P-V، فإن Q_i له تكون غير معينة وبالتالي لاوجود لمعادلة مقابلة لـ (1-49) لذلك تصبح العناصر اليعقوبية للقضيب i صفاً 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 :

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

$$N_{im} = \frac{\partial P_i}{\partial |V_m|} |V_m|$$
$$L_{im} = \frac{\partial Q_i}{\partial |V_m|} |V_m| \qquad (1\text{-}59)$$

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

$$\cos e\ 1 \qquad m \neq i$$
$$H_{im} = L_{im} = a_m f_i - b_m e_i \qquad (1\text{-}60)$$
$$N_{im} = -J_{im} = a_m e_i + b_m f_i$$

حيث

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

case 2 m = i

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

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

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

وعليه

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

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

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

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)

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

مثال (1-7) :

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

الشكل (1-16) شبكة بخمسة باسبارات.

الحل:

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

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

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

الألغوريتم:

الخطوات الأساسية لحل جريان الحمولة بواسطة NR هي:

1) افرض قيما لـ: |V|، δ لقضبان P-Q

δ لقضبان P-V

ننصح باعتبار رقم |V| = 1 pu إذا لم تكن هناك معلومات أخرى متوفرة.

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

2) احسب:

ΔPi لقضبان P-V و P-Q

ΔQi لجميع قضبان P-Q

من المعادلات (1-48) و (1-49) إذا كانت جميع القيم (أي ΔPi ، ΔQi) 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 والزواية ($\Delta\delta$, ΔV).

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

ملاحظات هامة:

1- في نهاية كل خطوة تقريب، 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 (1 - 17) كل خط له ممانعة تسلسلية 0.02+j0.08pu وسماحية تفرعية كلية j0.02pu. المعطيات مبينة بالجدول التالي:

Bus	Real load demand P_D	Reactive loead demand Q_D	Real power Generation P_G	Reactive power generation Q_G	Voltage specification
1	2.0	1.0	Unspesified	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: $0 \le Q_{G3} \le 1.5$ 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:

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

العنصر غير القطري من متريس سماحيات العقد هو:

Each off-diagonal term = - 2.941 + j 11.764

والعنصر القطري هو:

Each self term = 2[(- 2.941 - j 11.764) + j 0.01]

$$= 5.882 - j23.508 = 24.23\angle -75.95^o$$

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

الخطوة الأولى 1:

الشروط الابتدائية للمجاهيل:

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

$$\delta_3^o = 0$$

الخطوة الثانية: حساب

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

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

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

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

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

وبتعويض الشروط الابتدائية نجد:

$$P_2^o = -0.23 \quad pu$$
$$P_3^o = 0.12 \quad pu$$
$$Q_2^o = -0.96 \quad pu$$

وعليه فالتوابع :

$$\Delta P_2^o = P_2(\text{specified}) - P_2^o(\text{calculated})$$
$$= 0.5 - (-0.23) = 0.73$$
$$\Delta P_3^o = -1.5 - (0.12) = -1.62$$
$$\Delta Q_2^o = 1 - (-0.96) = 1.96$$

ونلاحظ أن قيم التوابع جميعها لا تحقق الدقة المطلوبة.

الخطوة 3 والخطوة 4 والخطوة 5:

تغيرات التوابع في نهاية التكرار الأول تحسب كمايلي :

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

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:

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

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

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

S_1 = 1.031 + j (-0.791)

S_2 = 0.5 + j 1.00

S_3 = - 1.5 – j 0.15

Transmission loss = 0.031 pu

الجريان في الخطوط:

المتريس التالي يبين القسم الحقيقي لجريان الخطوط

$$\begin{bmatrix} 0.0 & 0.191312E00 & 0.839861E00 \\ -0.184229E00 & 0.00 & 0.684697E00 \\ -0.826213E00 & -0.673847E00 & 0.0 \end{bmatrix}$$

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:

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

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

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

$$Q_3 = V_3[V_1(G_{31}\sin\delta_{21} - B_{31}\cos\delta_{31}) + V_2(G_{32}\sin\delta_{32} - B_{32}\cos\delta_{32}) + V_3(G_{33}\sin\delta_{33} - B_{33}\cos\delta_{33})]$$

بتعويض الشروط الابتدائية نجد:

$$P_2^o = 1[1.04(-2.941) + 1(5.882) + 1.04(-2.941)] = -0.23528 \quad pu$$

$$P_3^o = 1.04[1.04(-2.941) + (-2.941) + 1.04(5.882)] = 0.122 \quad pu$$

$$Q_2^o = [1.04(-11.764) + (23.508) + 1.04(-11.764)] = -0.96 \quad pu$$

$$Q_3^o = 1.04[1.04(-11.764) + (-11.764) + 1.04(23.508)] = 0.4678 \quad pu$$

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.

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

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 المتريس الجزئي [H]: (*)

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

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

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 الحمولة بطريقة نيوتن – رافسون.

---

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

الشكل (18-1) 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 الجزئتين [N] و [J] من مصفوفة اليعقوبي مساوية للصفر أي:

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

وبالتالي

$$[\Delta P] = [H][\Delta\delta] \qquad (1\text{-}66)$$

$$[\Delta Q] = [L][\frac{\Delta|V|}{V}] \qquad (1\text{-}67)$$

ويمكن زيادة سرعة ألغوريتم 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 ألغوريتم الطريقة السريعة Fast Decoupled Load Flow (FDLF) على الافتراض بأنه في حالة التشغيل الطبيعي للنظام يكون لدينا ما يلي:

$$\cos\delta_{ij} \approx 1$$
$$\sin\delta_{ij} \approx 0 \qquad (1\text{-}68)$$
$$G_{ij}\mathrm{Sin}\delta_{ij} << B_{ij}$$

وأيضاً.

$$Q_i << B_{ii} \mid V_i \mid^2$$

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

$$H_{ij} = L_{ij} = -\mid V_i \mid\mid V_j \mid B_{ij} \qquad i \neq j \qquad (1\text{-}69)$$

و

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

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

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

$$[\Delta Q] = [\mid V_i \mid\mid V_j \mid B''_{ij}][\frac{\Delta \mid V \mid}{V}] \qquad (1\text{-}72)$$

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 التفريعات.

2- حذف إزاحة الطور من المصفوفة [B″] والناجمة عن تجهيزات إزاحة الطور.

3- تقسيم كل من عناصر المعادلات (1-71) و (1-72) على |Vi| 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:

$$[\Delta P / |V|] = [B'][\Delta\delta] \qquad (1\text{-}73)$$

$$[\Delta Q / |V|] = [B''][\Delta |V|] \qquad (1\text{-}74)$$

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 [Δδ] لتحسين قيمة δ، وحل الـ [Δ|V|] لتحسين قيمة |V|.

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

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

حيث: ε_Q ، ε_P هو قيمة التسامح المفروض لكل من الاستطاعة الفعالة والردية،

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

Damascus University

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

مثال (1-9):

لنعتبر نظام القدرة الكهربائي ثلاثي الباسبارات المبين في المثال (1-8) والمطلوب حساب جريان الحمولة بإنجاز عملية تكرار واحدة بالطريقة السريعة.

معادلات جريان الحمولة وفقاً لهذه الطريقة [انظر المعادلات (1-73) و (1-74)].

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

و

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

ومن ذلك ينتج

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

وبحل هذه المعادلة نحصل على:

$$\Delta\delta_2^{(1)} = -0.003 \quad \text{rad}$$
$$\Delta\delta_3^{(1)} = -0.068 \quad \text{rad}$$

$$[2.125] = [23.508][\Delta\,|\,V_2'\,|]$$
$$\Delta\,|\,V_2'\,| = 0.09$$
$$|\,V_2'\,| = 1.09 \quad \text{pu}$$

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 زايدل.

وعموماً فإن زمن عملية التكرار يزداد في كلتا الطريقتين بزيادة عدد قضبان التجميع للشبكة .

من ناحية أخرى فإن معدل التقارب بطريقة غاوص زايدل 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 اليعقوبي 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 تتقارب 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 FDFL 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 الحمولة 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.

Damascus University

تطبيقات باستخدام الحاسوب

11-1 خوارزمية (ألغوريتم) لحل مسألة جريان حمولة بطريقة غاوص زايدل:

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

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

3- الحساب المتكرر لتوترات العقد $(V_i , i = 2 , 3..., n)$: قبل البدء بعمليات التقريب نفرض قيماً أولية لتوترات جميع العقد عدا العقدة المرجع، وتفرض عادة قيم متساوية 1+j0 ويجب الملاحظة أن المعادلات المطلوب حلها هي n-1 معادلة عقدية لإيجاد التوترات العقدية $V_2, V_3, ...V_n$.

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:

$$V_1 = e_1 + jf_i = | V_i | e^{j\delta_i} \qquad (1\text{-}75)$$

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

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

$$B_{ik} = \frac{Y_{ik}}{Y_{ii}} \qquad i = 2,3,...n$$

$$k = 1,2,...n \qquad (1\text{-}77)$$

$$k \neq 1$$

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

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

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:

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

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 الألغوريتم 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:

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

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

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

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

حيث:

$$\delta_i^{(r+1)} = \angle V_i^{(r+1)}$$
$$= \mathrm{Angle\,of}[\frac{A_i^{(r+1)}}{(V_i^{(r)})^*} \sum_{k=1}^{i-1} B_{ik} V_k^{(r+1)} - \sum_{k=i+1}^{n} B_{ik} V_k^{(r)}] \qquad (1\text{-}81)$$

حيث:

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

ويبقى الألغوريتم للباسات P-Q على حاله.

إن الحدود الفيزيائية لتوليد الاستطاعة الردية تمثل في الألغوريتم بمقارنة قيمة Q_i المحسوبة مع Q_{min} و Q_{max}، فإذا كانت واقعة بينهما فنعتمد 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, ...n نموذج P-V ، الباسات m+1, ..., n نموذج P-Q بطريقة غاوص –زايدل.

مثال (1-10):

يبين الشكل (1-21) مخطط الخط الواحد لنظام بسيط رباعي القضبان. ويعطي الجدول (1-1) ممانعات الخطوط، ونفترض أن المسايرات التفرعية لكل القضبان مهملة. 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

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

Damascus University

الشكل (1-20) المخطط الانسيابي لحل معادلات جريان الحمولة بطريقة غاوص–زايدل.

د– إذا كان قضيب التجميع 2 في النظام السابق من النموذج P-V وله المعطيات التالية:

$$P_2 = 0.5 \quad pu \quad , |V_2|=1.04 \quad pu$$

والقيم الأولية للتوترات المجهولة هي:

$$\delta_2 = 0^o \quad , \quad V_3 = 1\angle 0^o \quad , \quad V_4 = \angle 0^o$$

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

1) $0.2 \le Q_2 \le 1pu$

2) $0.25 \le Q_2 \le 1pu$

Damascus University

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	-	-	$1.04\angle 0^{o}$	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

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

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

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

إذا أضفنا خطاً بين القضيبين 1 و2 فتعدل العناصر التالية:

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

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

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

ويصبح المتريس المعدل كما يلي:

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

ج)

$$V_2' = \frac{1}{Y_{22}}\{\frac{P_2 - jQ_2}{(V_2^0)^*} - Y_{21}V_1 - Y_{23}V_3^0 - Y_{23}V_3^0 - Y_{24}V_4^0\}$$

$$= \frac{1}{Y_{22}}\{\frac{0.5 + j0.2}{1 - j0} - 1.04(-2 + j6) - (-0.666 + j2) - (-1 + j3)\}$$

$$= \frac{4.246 - j11.04}{3.666 - j11} = 1.016 + j0.046 \qquad pu$$

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

$$= \frac{1}{Y_{33}}\{\frac{-1 - j0.5}{1 - j0} - 1.04(-1 + j3)$$

$$- (-0.666 + j2)(1.019 + j0.046) - (2 + j6)\}$$

$$= \frac{2.81 - j11.627}{3.666 - j11} = 1.028 - j0.087 \quad pu$$

$$V_4^1 = \frac{1}{Y_{44}}\{\frac{P_4 - jQ_4}{(V_4^0)^*} - Y_{41}V_1 - Y_{42}V_2^1 - Y_{43}V_3^1\}$$

$$= \frac{1}{Y_{44}}\{\frac{0.3 + j0.1}{1 - j0} - (-1 + j3)(1.019 + j0.046)$$

$$- (-2 + j6)(1.028 + j0.087)\}$$

$$= \frac{2.991 - j9.253}{3 - j9} = 1.025 - j0.0093 \quad pu$$

$$Q_2^1 = -I_m\{(V_2^0)^* Y_{21}V_1 + (V_2^0)^*[Y_{22}V_2^0 + Y_{23}V_3^0 + Y_{24}V_4^0]\}$$

$$= -I_m\{1.04(-2 + j6)1.04 + 1.04[(3.666 - j11)1.04$$

$$+ (-0.666 + j2) + (-1 + j3)]\}$$

$$= -I_m\{-0.0693 - j0.2079\} = 0.2079 \ pu$$

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

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

$$= \angle\{\frac{1}{3.666 - j11}[\frac{0.5 - j0.2079}{} - (-2 + j6)(1.04 + j0)$$
$$- (-0.666 + j2)(1 + j0) - (-1 + j3)(1 + j0]\}$$

$$= \angle(\frac{4.2267 - j11.439}{3.66 - j11}) = \angle(1.0512 + j0.0339)$$

or $\delta_2^1 = 1.84658^o = 0.032 rad$

$$\therefore V_2^1 = 1.04(\cos\delta_2^1 + j\sin\delta_2^1)$$
$$= 1.04(0.99948 + j0.0322)$$
$$= 1.3946 + j0.03351$$

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

$$V_4' = \frac{1}{Y_{44}}\{\frac{P_3 - jQ_4}{(V_4^0)^*} - Y_{41}V_1 - Y_{42}V_2^1 - Y_{43}V_3^0\}$$
$$= \frac{1}{3 - j9}[\frac{0.3 + j0.1}{1 - j0} - (-1 + j3)(1.394 + j0.0335)$$
$$- (-2 + j6)(1.0317 - j0.08937)]$$
$$= \frac{2.9671 - j8.9962}{3 - j9} = 0.9985 - j0.0031 \quad pu$$

2) في هذه الحالة تكون Q_2 المحسوبة أصغر من الحد الأدنى لذلك نضع $Q_2 = 0.25$ 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: $V_2^0 = 1 + j0$):

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

$$= \frac{1}{3.666 - j11}\left[\frac{0.5 - j0.25}{1 - j0} - (-2 + j6)1.04 - (-0.666 + j2) - (-1 + j3)\right]$$

$$= \frac{4.246 - j11.49}{3.666 - j11} = 1.0559 + j0.0341 \quad pu$$

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

$$= \frac{1}{3.666 - j11}\left[\frac{-1 - j0.5}{1 - j0} - (-1 + j3)1.04 - (-0.666 + j2)(1.0559 + j0.0341) - (-2 + j6)\right]$$

$$= \frac{2.8112 - j11.709}{3.666 - j11} = 1.0347 - j0.0893 \quad pu$$

$$V_4^1 = \frac{1}{Y_{44}}\left[\frac{P_4 - jQ_4}{(V_4^0)^*} - Y_{41}V_1 - Y_{42}V_2^1 - Y_{43}V_3^1\right]$$

$$= \frac{1}{3 - j9}\left[\frac{0.3 + j0.1}{1 - j0} - (-1 + j3)(1.0509 + j0.0341) - (-2 + j6)(1.0347 - j0.0893)\right]$$

$$= \frac{4.0630 - j9.4204}{3 - j9} = 1.0775 + j0.0923 \quad pu$$

12-1 برامج جريان الحمولة Power Flow Programs:

قامت عدد من ا لهيئات 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 بالـ MW والـ Mvar، ومع توترات الباسبارات بالكميات الواحدية ومع الزوايا بالدرجات، ويتم في سياق البرنامج قلب استطاعات الأحمال والتوليد إلى كميات واحدية بنسبها إلى أساس مختار بالـ 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 الألغوريتم.

3- برنامج إخراج نتائج الباسبارات:

يقوم هذا البرنامج بإخراج النتائج على شكل جداول، وتتضمن نتائج الباسبارات طويلة وزاوية التوتر، الاستطاعة الفعالة والردية للمولدات والأحمال، وكذلك الاستطاعة الردية للسعات والمفاعلات التفرعية.

كما تتضمن النتائج الاستطاعة الكلية للتوليد والأحمال.

4- برنامج إخراج نتائج الخطوط:

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

13-1 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	accuracy = 0.001
Accel = 1.6	maxiter = 80

الخطوة الأولى: في تحضير ملف بيانات الدخل هي ترقيم كل من الباسبارات، حيث يتم ترتيبها على التوالي، لكن هذا لايعني بالضرورة انه يجب إدخالها على التوالي.

بالإضافة إلى لك نحتاج إلى ملفات البيانات التالية:

13-1-1 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 طويلة التوتر بالكميات الواحدية وزاوية التوتر بالدرجات، أما العمود الخامس والسادس منها استطاعة الحمل بالـ MW والـ Mvar. وتضم الأعمدة من السابع إلى العاشر بيانات التوليد وهي الاستطاعة الفعالة بالـ MW والاستطاعة الردية بالـ M_{var} والحد الأعظمي والأصغري للاستطاعة الردية المولدة على التوالي. ويحوي العمود الأخير الاستطاعة الردية المحقونة من قبل المكثفات التفرعية، ويستخدم رمز الباسبار في العمود الثاني لتميز نوع الباسبار من حيث كونه باسبار حمولة أو باسبار منظم أو باسبار مرجع وفقاً لما يلي:

0-يستخدم هذا الرمز لباسبارات الأحمال. تدخل الأحمال بالـ MW والـ M_{var} وبإشارة موجبة، ولأجل هذا النوع من الباسبارات لابد من إعطاء قيم ابتدائية للتوتر حيث تُعطى القيمة 1 لطويلة التوتر و 0 لزاوية الطور، أما إذا كانت طويلة التوتر والزاوية محددة لهذا النوع من الباسبارات فسيتم أخذهما كقيم ابتدائية بدلاً من القيم الإبتدائية 1 و 0.

2 يستخدم هذا الرمز للباسبارات المنظمة، ولأجل هذا النوع من الباسبارات يجب تحديد طويلة التوتر واستطاعة التوليد الفعالة بالـ MW والحدود العظمى والدينا للاستطاعة الردية بالـ 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 عقدتي الخط، أما الأعمدة من الثالث وحتى الخامس فتحوي مقاومة الخط، المفاعلة، السماحية الكلية للخط بالـ pu منسوبة للأساس العام المختار. أما العمود الأخير فهو مخصص لعيار مبدل 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 تعيير التوتر فيه على القيمة $1.06\angle 0^{o}$ 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 (4-1) عيارات مبدل الوضعيات للمحولات، علماً أن الرقم اليساري للباسبار هو جهة مبدل الوضعيات للمحول.

الجدول (4-1) 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 (22-1) نظام قدرة مكون من 30 باسبار عائد للمثال (11-1).

أما استطاعات التوليد والأحمال فهي مبينة بالجدول (5-1)، 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 (5-1) بيانات العقد العائدة للمثال (11-1)

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

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

Damascus University

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

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

Damascus University

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

Damascus University

تابع الجدول (8-1)

Damascus University

تابع الجدول (8-1)

Damascus University

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

بهمافي 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 (10-1) معطيات العقد للشبكة السورية

Damascus University

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

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

Damascus University

ويبين الجدول (1-11) معطيات المولدات في محطات التوليد، حيث يشير العمود الأول رمز العقدة والعمود الثاني إلى نوع المولدة هل هي فعالة أ و 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 ع لى 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 (12-1) بيانات الخطوط للشبكة السورية

Damascus University

تابع الجدول (12-1)

Damascus University

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.

Damascus University

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

Damascus University

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

Damascus University

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

Damascus University

تابع الجدول (15-1)

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الجدول (16-1) المعطيات العامة في الحساب

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

تابع الجدول (16-1)

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

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 أساس100 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 بالـ MW و Mvar. افرض أن طويلة التوتر في العقد 3 و4 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 بالـ 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 (1–2).

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:

Damascus University

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:

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

والمطلوب استخدام طريقة نيوتن–رامن سون لإيجاد أحد جذور المعالجة 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– رامسون

$$x_1^4 - 2x_1 - x_2 = 3$$
$$x_1^4 + x_1^2 = 41$$

مع العلم أن القيمة الابتدائية

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

1–6– في نظام القدرة المبين بالشكل (1-26) لدينا الباسبار 1 هو باسبار مرجع حيث $V_1 = 1.0\angle 0^o$ بالكميات الواحدية والباسبار 2 هو باسبار حمولة $S_2 = 280\ MW + j60\ Mvar$ ، ممانعة الخط $Z = 0.02 + j\ 0.04\ pu$ 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 $V_2 = 0.90 - j\,0.10$ فالمطلوب تحديد S_1 والضياعات الفعالة والردية على الخط.

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

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

a) حساب V_2 و V_3 بإنجاز عملتي تكرار بطريقة غاوص–زايدل باستخدام القيم الابتدائية :

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

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

$$V_2 = 0.90 - j\,0.10\ pu$$

$$V_3 = 0.95 - j\,0.05\ pu$$

فالمطلوب حساب الجريان والضياعات على الخطوط، وكذلك حساب الاستطاعة الفعالة والردية لباسبار المرجع ورسم مخطط الجريان مبيناً 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 $V_1 = 1.025\angle 0^o pu$ 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 $V_3^{(0)} = 1.03 + j0$ و $V_2^{(0)} = 1.0 + j0$ وتثبيت $|V_3| = 1.03pu$.

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

$$V_2 = 1.001243\angle -2.1^o = 1.000571 - j0.0366898 \quad pu$$

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

فالمطلوب حساب الجريان والضياعات على الخطوط، وكذلك الاستطاعة الفعالة والردية 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 (1–9).

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

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

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

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

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

$$|V_2|^{(0)} = 1.0pu \quad \delta_2^{(0)} = 0^o$$

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

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

ممانعة الخط Z_{12}=0.12+0.16pu منسوبة لأساس 100 MVA والمطلوب حساب طويلة وزاوية التوتر على العقدة 2 بإنجاز عمليتي تكرار بطريقة نيوتن –رامنسون واستخدام القيم الابتدائية $\delta_2^{(0)} = 0^o$ $|V_2|^{(0)} = 1.0pu$

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

1–12–يبين الشكل (1-32) مخطط الخط الواحد لنظام قدرة بسيط مكون من ثلاثة باسبارات، الباسباران 1 , 2 هي باسبارات توليد، التوتر على الباسبار 1 $V_1 = 1.0\angle 0^o pu$ ، 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

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

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

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

b) احسب القيم الطورية للتوترات V_2 و V_3 بإنجاز عمليتي تكرار بطريقة نيوتن – ورامنسون، واستخدام القيم الأولية $V_2^{(0)} = 1.0 + j0pu$ و $V_3^{(0)} = 1.0 + j0pu$ والحفاظ على $|V_2|=1.05$ pu.

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

1–13– من أجل المسألة (1–12) المطلوب:

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

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

a) طريقة غاوص –زايدل. 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 للمكثفات التفرعية المركبة في محطات التحويل، وكذلك عيارات مبدل التفريعات معطاة كما يلي:

SHUNT CAPACTIORS	
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 الواحدية ونصف السعة الكلية بالكميات الواحدية منسوبة لأساس 100 MVA مبينة 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**).

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفصل الثاني

تحليل الآلة التزامنية في الحالة العابرة

Synchronous machine transients analysis

2–1 مقدمة :

تمَّ 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) للدائر والقمم الفعّالة للثابت ثابتة بالنسبة لبعضها البعض. وعليه يكون الفيض المتشابك مع دارة الدائر ثابتاً مع الزمن ، وبالتالي لا تتحرض توترات في دارات الدائر وتصبح الدارة المكافئة الوحيدة الطور مؤلفة من قوة محركة كهربائية (قمك) ثابتة على التسلسل مع ممانعة بسيطة هي الممانعة (المفاعلة) التزامنية X_s. وإذا كان الدائر 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 دارة قصيرة (عطل) على أقطاب المولد، يكون الفيض المتشابك مع دارات الدائر 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 للدائر. 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 تُعرَّف 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 : Transisent phenomena

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

الشكل (2-1) دارة بسيطة مؤلفة من R , L ثابتتين على التسلسل /8/.

الدارة مؤلفة من توتر جيبي $\vartheta(t) = V_m \sin(\omega t - \alpha)$ يُطبق على RL في الزمن t = 0، وتصّح العلاقة:

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

حل هذه المعادلة التفاضلية يعطي:

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

حيث:

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

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

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

لأجل $\omega L >> R$ 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

$$R = 0.125 \ \Omega \quad , \quad L = 10 \ mH$$

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

أحسب وارسم التيار لحالتين :

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

استخدام برنامج MATLAB.

الحل باستخدام الحاسوب:

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

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

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

وعليه :

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

الحالة a تتحقق عندما $\alpha = 88.1^{o}$

الحالة b تتحقق عندما $\alpha = 88.1^{o} - 9^{o} = 1.9^{o}$

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) .

Damascus University

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

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

2–3 عوابر 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. نمثل ملف الإخماد بملفين مفترضين مقصورين أحدهما على المحور المباشر والثاني على المحور العرضاني (الشكل 3-2).

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 الدائر المباشر على محور الطور a يكون :

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

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 المحارضات تتغير مع الوضع الزواي للدائر. نفترض أن الإشباع المغناطيسي مهمل وأن التوززيع المكاني للقمم جيبي. ويبين الشكل (2-4) مجموعة الدارات تخطيطياً.

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

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

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

وهي المعادلات التفاضلية التي تصف أداء المولد التزامني .

نكتب هذه المعادلة متريسياً مع التجزيء فنجد:

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

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

نكتب الفيوض المتشابكة كتوابع للمحارضات الذاتية والمتبادلة:

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

وبشكل مختصر

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

2–3–2 محارضات الآلات بارزة الأقطاب :

Inductances of salient-pole machines

تتغير قيمة المحارضة 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 $\theta=0^o$ وصغرى لأجل $\theta=90^o$، وعظمى ثانية لأجل $\theta=180^o$ وهكذا. وعليه فإن دور L_{aa} هو 180°، مما يسمح بتمثيلها تقريباً بواسطة تجب cosine التوافقية الثانية. ونظراً للبناء المتناظر للدائر، تحسب العناصر القطرية للمتريس الجزئي $[L_{SS}]$ كما يلي:

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

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:

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

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

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

المحارضة المتبادلة بين أية وشيعتين 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:

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

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

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

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 المتوازية ($i_a + i_b + i_c = 0$) 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:

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

أو بشكل متريسي مختصر:

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

وبالتشابه نجد للتواترات والفيوض :

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

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

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

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

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:

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

حيث :

$$L_0 = L_s - 2\,M_s \qquad (2\text{-}20)$$

$$L_d = L_s + M_s + 3/2\,L_m \qquad (2\text{-}21)$$

$$L_q = L_s + M_s - 3/2\,L_m \qquad (2\text{-}22)$$

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

وتصبح المعادلات التفاضلية للآلة في نظام الإحداثيات المتحرك كما يلي:

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

$$- \begin{bmatrix} L_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 & kM_F & kM_D & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 & 0 & kM_Q \\ 0 & kM_F & 0 & L_F & M_R & 0 \\ 0 & kM_D & 0 & M_R & L_D & 0 \\ 0 & 0 & kM_Q & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \qquad (2-23)$$

ومن هذه المعادلات نلاحظ الآتي:

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

$$\vartheta_0 = -ri_0 - L_0 \frac{di_0}{dt}$$

غير مقترنة بالمعادلات الأخرى، مما يسمح بمعالجتها لوحدها. نسمي المتحولات ϑ_0 , L_0 , i_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

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

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

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

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

$r_a = 0.0031\quad \Omega$

$r_F = 0.0715\quad \Omega$

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 :

$L_s = 3.2758\quad mH$

$L_m = 0.0458\quad mH$

$M_s = 1.6379\quad mH$

وعليه:

$$L_d = 32.2758 + 1.6379 + \frac{3}{2} \times 0.0458$$
$$= 4.9825 \quad mH$$
$$L_q = L_s + M_s - \frac{3}{2} L_m$$
$$= 3.2758 + 1.6379 - \frac{3}{2} \times 0.0458$$
$$= 4.8451 \quad mH$$

2)

$$L_0 = Ls - 2\, M_s$$
$$= 3.2758 - 2 \times 1.6379 = 3.2758 - 3.2758 = 0$$
$$\vartheta_0 = -ri_0 - L_0 \frac{di_0}{dt} = -ri_0 = -0.003 i_0$$

3)

$$L_a F = M_F \cos\theta \Rightarrow M_F = 40 \quad mH$$

وهو المطلوب.

2–5 عطل متوازن:

نفترض حدوث عطل متوازن (أي ثلاثي الطور) على أقطاب مولد تزامني ثلاثي الطور يدور بسرعة تزامنية ثابتة وتهيج 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:

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

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

نكتب هذه المعادلة بشكل متريسي مختصر:

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

أو:

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

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

المعادلة التفاضلية غير خطية ويتعّين حلها بطرق التحليل العددي بعد أن نضيف إليها معادلة الحركة للمولد والتي تسمى معادلة التأرجح.

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_q , i_d , i_0 ومنها نحصل على تيارات الأطوار باستخدام تحويل بارك:

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

وبالنشر، وملاحظة أن $i_o = 0$ نجد :

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

يمكن حل جملة المعادلات التفاضلية (2-26) باستخدام بعض البرامج الجاهزة التي تتيحها نظم برامجية مختلفة. فمثلاً MATLAB يقدّم 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:

$L_a = 0.0072$ H	$L_q = 0.0070$ H	$L_F = 2.500$ H

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

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

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

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

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

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

الخوارزمية:

- إدخال البيانات : $\delta, \omega, f, r_F, V_F \ldots.$
- تحديد زمن الحساب.
- إدخال القيم الابتدائية للمتحولات (تيارات بارك).
- استدعاء البرنامج Ode45 الذي يستدعي بدوره برنامج حساب المشتقات الذي يجب أن يكتبه المبرمج نفسه.
- حساب تيارات الأطوار وتيار التهييج 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 والتهييج أثناء العطل.

Damascus University

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

Damascus University

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

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.

6–2 الأعطال غير المتوازنة :

معظم الأعطال التي تحدث للآلات 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:

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

$$i_b = -\, i_c$$

$$i_a = 0$$

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 :

$$\vartheta_d \sin\theta - \vartheta_q \cos\theta = 0 \qquad (2\text{-}29)$$

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

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

نشتق المعادلتين (2-30) و (2-31) :

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

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

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:

$$\begin{bmatrix} -v_F \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} =$$

$$-\begin{bmatrix} \sqrt{2}k\omega M_F\cos\theta & r_F & 0 & 0 \\ \sqrt{2}k\omega M_D\cos\theta & r_D & 0 & 0 \\ \sqrt{2}k\omega M_Q\cos\theta & 0 & 0 & r_Q \\ \sqrt{2}[r+\omega(L_d-L_q)\sin 2\theta & k\omega M_F\cos\theta & k\omega M_D\cos\theta & k\omega M_Q\cos\theta \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

$$-\begin{bmatrix} \sqrt{2}kM_F\sin\theta & L_F & M_R & 0 \\ \sqrt{2}kM_D\cos\theta & M_R & L_D & 0 \\ -\sqrt{2}kM_Q\cos\theta & 0 & 0 & L_Q \\ \sqrt{2}(L_d\sin^2\theta+L_q\cos^2\theta) & kM_F\sin\theta & kM_D\sin\theta & kM_Q\cos\theta \end{bmatrix}\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_d \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

(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 تهييج 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 $\omega = const$.

الحل:

النموذج الرياضي المعتمد هو المعادلة:

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

حيث

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

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

الخوارزمية:

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

$$i_d(0) = 0 \; ; \; i_F = \frac{\vartheta_F}{r_F} \; ; \; i_D(0) = 0 \quad ; \quad i_Q(0) = 0$$

- 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: Llfault.

البرنامج LLFault:

- بينات الدخل : f ، δ ، بيانات محارضات 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 $\vartheta_f = 04\,KV$ (وهو ثابت دوماً حسب نص المسألة).

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

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 التهييج i_F أثناء عطل الطورين b و c مع الأرض كما يبين الشكل (2-8) جزءاً من النتائج الحاسوبية الجدولية كما أظهرها الحاسوب.

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

Damascus University

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

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

2–6–2 عطل طور مع الأرض:

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

$$\vartheta_a = 0$$
$$i_b = i_c = 0$$

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

$$
\begin{bmatrix} 0 \\ -v_F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} =
$$

$$
-\begin{bmatrix} r-2\omega L_m \sin 2\theta & -\omega M_F \sin\theta & -\omega M_D \sin\theta & \omega M_Q \cos\theta \\ -\omega M_F \sin\theta & r_F & 0 & 0 \\ -\omega M_D \sin\theta & 0 & r_D & 0 \\ \omega M_Q \cos\theta & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}
$$

$$
-\begin{bmatrix} L_s + L_m \cos 2\theta & M_F \cos\theta & M_D \cos\theta & M_Q \sin\theta \\ M_D \cos\theta & L_F & M_r & 0 \\ M_D \cos\theta & M_R & L_D & 0 \\ M_Q \sin\theta & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \qquad (2-35)
$$

حيث :

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

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

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 $\delta = 0^o$ باستخدام MATLAB. أعد الحل عندما تكون $\delta = 30^o$ وقارن النتائج مع التعليل.

النموذج الرياضي:

المعادلة التفاضلية هي:

$$\frac{d}{dt}i = -L^{-1}R_i - L^{-1}\vartheta$$

حيث :

$$i = \begin{bmatrix} i_a \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \; ; \; v = \begin{bmatrix} 0 \\ -v_F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \; ; \; R = \left[\begin{array}{c} \text{متريس معاملات } i \\ \text{في} \\ (35\text{-}2) \end{array} \right]$$

$$L = \left[\text{مترس معاملات } \frac{di}{dt} \text{ في المعادلة } (35\text{-}2) \right]$$

الخوارزمية :

تشابه الخوارزمية في المثال (2-4) ماعدا أن برنامج المشتقات (نسميه LGfaultt) وهو برمجة للمعادلة التفاضلية الواردة في النموذج الرياضي.

يبين الشكل (2-9) النتائج البيانية الحاسوبية للتيارات i_a و i_F و i_D و i_Q لأجل $\delta = 0^o$ والشكل (2-10) لأجل $\delta = 30^o$.

الشكل (2-9) نتائج المثال (2-5) لأجل $\delta = 0^o$

الشكل (2-10) نتائج المثال (2-5) لأجل $\delta = 30^o$

2–7 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 تغيّر 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 للتمغنط مما يؤدي إلى تزايد مفاعلة الآلة إلى المفاعلة التزامنية للمحور المباشر.

ومن المفيد التصوّر 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 عندئذٍ 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:

$$X''_d = X_\ell + \left(\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_f} + \frac{1}{X_{kd}}\right)^{-1} \qquad (2\text{-}38)$$

حيث :

X_ℓ : مفاعلة التسريب.

X_{ad} : مفاعلة المتحرض المباشرة.

X_f : مفاعلة المحرض.

X_{kd} : مفاعلة الإخماد.

إذا أضفنا مقاومة ملف المخمد R_k إلى الشكل (2-11) وأوجدنا محارضة ثفنين مرئية من نهايات R_k يصبح الثابت الزمني للدارة τ''_d (الثابت الزمني تحت العابر للمحور المباشر):

$$\tau''_d = \frac{X_{kd} + (\frac{1}{X_\ell} + \frac{1}{X_f} + \frac{1}{X_{ad}})^{-1}}{R_k} \qquad (2\text{-}39)$$

المفاعلات في (2-39) مقدّرة بالوحدة (pu) ولذلك فإن لها ذات القيم العددية للمحارضات بالوحدة. المفاعلة X''_d تأخذ قيماً بين 0.07 و 0.12 بالوحدة للمنوبات العنفية 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).

$$X'_d = X_\ell + (\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_f}) \qquad (2\text{-}40)$$

نضيف مقاومة المحرض R_f للدارة المكافئة، ونوجد مفاعلة ثفنين مرئية من نهايات R_f، فنحصل على الثابت الزمني للدارة τ'_d (الثابت الزمني العابر للمحور المباشر) كما يلي:

$$\tau'_d = \frac{X_f + (\frac{1}{X_\ell} + \frac{1}{X_{ad}})^{-1}}{R_f} \qquad (2\text{-}41)$$

$$X'_d \approx 0.1 - 0.25 \quad pu$$

$$\tau_d \approx 1 - 2 \quad sec$$

الثابت الزمني للمحرض τ'_{do} والذي يمثل تلاشي العوابر لأجل متحرض مفتوح الدارة يسمى الثابت الزمني العابر لدارة مفتوحة للمحور المباشر ويعطى بالعلاقة:

$$\tau'_{d0} = \frac{X_f}{R_f} \qquad (2\text{-}42)$$

$$\tau'_{d0} \approx 5 \quad sec$$

$$\tau'_d = \frac{X'_d}{X_d}\tau'_{d0} \qquad (2\text{-}43)$$

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:

$$X_d = X_\ell + X_{ad} \qquad (2\text{-}44)$$

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:

$$i_{ac}(t) = \sqrt{2}E_0\left[\left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d}\right)e^{-t/\tau''_d} + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d}\right)e^{-t/\tau'_d} + \frac{1}{X_d}\right]\sin(\omega t + \delta) \qquad (2\text{-}45)$$

يجب التذكر 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 لملفات 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. يُعيّر جهد التهييج بحيث يكون جهد خرج المتحرض هو الجهد الاسمي (أي 1.0 pu).

مفاعلات المولد وثوابته الزمنية، هي:

$$X''_d = 0.15 \quad pu \qquad T''_d = 0.35 \quad sec$$
$$X'_d = 0.40 \quad pu \qquad T'_d = 1.0 \quad sec$$
$$X_d = 1.20 \quad pu$$

والمطلوب :

(a) أحسب تيارات القصر (العطل) للحالات الثابتة والعابرة وتحت العابرة.

(b) 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:

قيمة التيار الدائم $$I_d = \frac{E_0}{X_d} = \frac{1.0}{1.2} = 0.8333 \quad pu$$

قيمة التيار العابر $$I'_d = \frac{E_0}{X'_d} = \frac{1.0}{0.4} = 2.5 \quad pu$$

قيمة التيار تحت العابر $I''_d = \frac{E_0}{X''_d} = \frac{1.0}{0.15} = 6.666 \quad pu$

(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 : $\Delta t \approx \frac{1}{60} \times \frac{1}{8} \quad sec$
- فتح حلقة لأجل الزمن : $t = 0 \rightarrow t_{final}$.
- المعادلة (2-45).
- معادلة المغلّف 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):

يبدي 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:

$$|I'_d| = \frac{|E_0|}{X'_d} \quad ; \quad X'_d > X''_d$$

– التيار الدائم (الثابت) ومطاله ثابت وأصغر من مطال التيار العابر لأن مفاعلة المنوبة في الفترة الثابتة هي المفاعلة التزامنية X_d .

$$|I_d| = \frac{|E_0|}{X_d} \quad ; \quad X_d > X'_d > X''_d$$

الشكل (2-14) تيار العطل المتناوب (المتناظر) للآلة التزامنية /15/.

إذا مدّدنا المغلّف 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 الملغف العابر والملغف الدائم وفق الثابت الزمني لملف التهييج (ملف المحرض).

وبالرغم من أن مفاعلات الآلة التزامنية تتعلق بالإشباع المغناطيسي فيمكن إعطاء قيم مرشدة لها كما يبين الجدول التالي (الجدول 1-2)

الجدول (2-1) قيم عملية لمفاعلات الآلات التزامنية

(جميع القيم بالوحدة منسوبة للاستطاعة الاسمية للآلة)

	المنوبات ذات الدائر الاسطواني	المنوبات ذات الأقطاب البارزة	المعوضات المتواقتة	المحركات المتواقتة *
X_s (orX_d)	1.00-2.0	0.6-1.5	1.5-2.5	0.8-1.10
X_q	0.9-1.5	0.4-1.0	0.95-1.5	0.65-0.8
X'_d	0.12-0.35	0.2-0.5	0.3-0.6	0.3-0.35
X''_d	0.1-0.25	0.13-0.35	0.18-0.38	0.18-0.2
X_2	$=X''_d$	$=X''_d$	0.17-0.37	0.19-0.35
X_0	0.04-0.14	0.02-0.2	0.025-0.16	0.05-0.07

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 الحسبان في المعادلة (2-45). كما كان واضحاً من تحليل دارة RL في الشكل (2-1)، ستوجد بشكل عام مركبة مستمرة (Undirectional) 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 للمتحرض 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:

$$\tau_a = \frac{X''_q + X''_d}{2R_a} \qquad (2\text{-}45)$$

$$\tau_a \approx 0.05 - 0.17 \quad \text{sec}$$

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:

$$I_{dc} = \sqrt{2}\frac{E_0}{X''_d}\sin\delta e^{-t/\tau_a} \qquad (2\text{-}47)$$

إذا ركبنا هذه المركبة على المركبة المتناوبة المتناظرة I_{ac} نحصل على التيار غير المتناظر I_{asy} asymmetrical current :

$$i_{asy}(t) = \sqrt{2}E_0\left[\left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d}\right)e^{-t/\tau''_d} + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d}\right)e^{-t/\tau'_d} + \frac{1}{X_d}\right]\sin(\omega t + \delta)$$
$$+ \sqrt{2}\frac{E_0}{X''_d}\sin\delta e^{-t/\tau_a} \qquad (2\text{ - }48)$$

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:

$$I_{dc_{(max)}} = \sqrt{2}\frac{E_0}{X''_d} \qquad (2\text{-}49)$$

وعليه فإن أعظم قيمة وسطية rms لتيار القصر (ac و dc) في بداية القصر هي:

$$I_{asy} = \sqrt{I''_d + I^2_{dc}} = \sqrt{(\frac{E_0}{X''_d})^2 + (\sqrt{2}\frac{E_0}{X''_d})^2} \qquad (2\text{-}50)$$

ومنه

$$I_{asy} = \sqrt{3}\frac{E_0}{X''_d} \qquad (2\text{-}51)$$
$$= \sqrt{3}I''_d$$

وتُعطى 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 $\tau_a = 0.15\sec$.

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 (100 MVA, 13.8 kV , 60 Hz) موصّل إلى محول $\Delta - Y$ (13.8/220 kV , 100 MVA). 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:

$$\tau_a = 0.25 \ \text{sec} \quad \tau''_d = 0.4 \ \text{sec} \quad \tau'_d = 1.1 \ \text{sec}$$

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 منحني i(t).

الحل :

(a)

تيار الأساس في جهة المولد

$$I_{B1} = \frac{S_B}{\sqrt{3}V_{B1}} = \frac{100\times10^3}{\sqrt{3}\times13.8} = 4184 \quad A$$

تيار الأساس في ثانوي المحول

$$I_{B2} = \frac{13.8}{220}(4184) \quad A$$

$$I''_d = \frac{1.0}{0.12+0.2} = 3.125 \quad pu = 13075 \ \ A \ \ \text{on the generator side}$$

$$= 820 \text{ A on the 220- kV side}$$

$$I'_d = \frac{1.0}{0.25+0.2} = 2.22 \quad pu = 92885 \ \ A \ \ \text{on the generator side}$$

$$= 852.5 \text{ A on the 220- kV side}$$

$$I_d = \frac{1.0}{0.1+0.2} = 0.833 \quad pu = 3486.6 \ \ A \ \ \text{on the generator side}$$

$$= 218.6 \text{ A on the 220- kV side}$$

(b)

في جهة المولد

$$I_{asy} = \sqrt{3}I''_d = \sqrt{3}(3.125) = 5.4 \ \ pu = 22646 \quad A$$

(c)

$$i(t) = \sqrt{2}\left[(I''_d - I'_d)e^{-t/0.4} + (I'_d - I_d)e^{-t/1.1} + I_d\right]\sin(377t+\pi/2) + \sqrt{2}I''_d e^{-t/0.25}$$

$$i(t) = \left[1.28e^{-2.5t} + 1.96e^{-0.91t} + 1.18\right]\sin(377t+\pi/2) + 4.42e^{-4t} \quad pu$$

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 محمّل (الشكل 2-17a). التوترات الداخلية لهذا المولد المبينة في الشكل (2-17b):

الشكل (2-17)

(a)مخطط الخط الواحد لمولد محمل. (b) المخطط الشعاعي.

$$E'' = V + jX''_d I_L$$
$$E' = V + jX'_d I_L \qquad (2\text{-}52)$$
$$E = V + jX_d I_L$$

مثال (2-9) :

نعتبر الشبكة الكهربائية في المثال (2-8) . نوصّل 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) .

$$S_L = \frac{100\angle 36.87^o}{100} = 1\angle 36.87^o \quad pu$$

$$V = \frac{220}{220} = 1\angle 0^o \quad pu$$

$$Z_L = \frac{|V^2|}{S^*} = \frac{1}{1\angle -36.87^o} = 0.8 + j0.6 \quad pu$$

يكون تيار الحمل قبل العطل:

$$I_L = \frac{V}{Z_L} = \frac{1.0\angle 0^o}{0.8 + j0.6} = 0.8 - j0.6 = 1\angle -36.87^o \quad pu$$

القوة المحركة الكهربائية خلف المفاعلة العابرة :

$$E' = V + j(X'_d + X_t)I_L$$
$$= 1.0\angle 0^o + j(0.25 + 0.2)(0.8 - j0.6) = 1.27 + j0.36 = 1.32\angle 15.83^o \quad pu$$

حدوث العطل يمثل بوصل القاطع S تيار القصر العابر:

$$I'_g = \frac{E'}{j(X'_d + X_t)} = \frac{1.32\angle 15.83^o}{j(0.25 + 0.2)} = 0.8 - j2.822 = 2.93\angle -74.17^o \quad pu$$

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 التغّير.

تتألف شبكة ثفنين من قمك توضع على التسلسل مع الممانعة المضافة وممانعة ثفنين مرئية من العقدتين (الشكل 19-2).

الشكل (2-19) شبكة ثفنين بشكل عام مرئية من العقدتين 1 و 2.

E_{th} = التوتر بين العقدة 1 و 2 مثلاً قبل إضافة Z_f .

Z_{th} = 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 = 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.

$$Z_{th}=j0.25+j0.2=j0.45 \quad pu$$

حسب نص المسألة (المثال 9-2) فرق التوتر بين 1 و 2 على أقطاب الحمل هو 220 kV وعليه:

$$E_{th} = V_{th} = \frac{220}{220} = 1 \quad pu$$

$$I'_f = \frac{V_{th}}{Z_{th}} = -j2.222 \quad pu$$

وهو التيار الذي يسري في نقطة العطل والناجم فقط عن العطل.

التيار الذي يقدمه المولد I'_g فعلاً هو تيار العطل + تيار الحمل وعليه:

$$I'_g = I'_f + I_L = -j2.222 + (0.8 - j0.6) = 2.93\angle -74.17^o \quad pu$$

وهو الجواب نفسه كما في المثال (9-2).

الفصل الثالث

تحليل العطل المتوازن (المتناظر) في منظومات القدرة الكهربائية

Balanced (Symmetrical) Fault Analysis in Power Systems

3–1 مقدمة:

تؤلف دراسة الأعطال جزءاً هاماً من تحليل نظم القدرة. والمتطلبات الأساسية لهذه المسألة هو إيجاد توترات العقد وتيارات الفروع أثناء العطل بأنواعه المختلفة. وقد تحصل الأعطال بسبب التوترات الزائدة (العابرة) Overvoltages الناجمة عن التأثيرات الخارجية كضربات ا لبرق 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 انهياراً داخلياً أو انهياراً 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 المنابع 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.

3–2 خوارزمية حساب العطل المتوازن الثلاثي الطور باستخدام نظرية ثفرين:

يُعرَّف هذا العطل بأنه قِصَرٌ آني للأطوار الثلاثة معاً. وحسب الإحصاءات فإن هذا العطل قليل الحدوث إلاّ أنه أقسى أنواع الأعطال الكهربائية على الشبكة. ونظراً لأن منظومة القدرة متناظرة (متوازنة) الهيكلية والبناء فيمكن تحليل هذا العطل على أساس الطور الواحد. الطوران الآخران يحملان تيارات مماثلة تختلف عن بعضها البعض بزاوية الطور.

3–2–1 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 Interupting 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 صفراً 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 لمنظ ومة قدرة بسيطة ذات 3 بارسبارات. يُمثل كل مولد بواسطة قمك خلف المفاعلة العابرة. جميع الممانعات معطية بالوحدة على استطاعة أساس MVA 100 ومهملة المقاومة. اعتبر الافتراضات التالية:

1 -تهمل السعات التفرعية ونفرض أن النظام يعمل على اللاحمل.

2 -تعمل المولدات تحت التوتر الاسمي والتردد الاسم ي علماً أن قواها المحركة الكهربائية لها ذات الطور.

احسب تيار العطل، توترات البارسبات، وتيارات الخطوط خلال العطل عندما يحدث عطل ثلاثي الطور متوازن عبر ممانعة عطل Z_f = jo.16 pu على البارسبات 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 ثفرين.

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 ثفرين 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 مهملة والقمك للمولدات مساوية للتوتر الاسمي، تكون توترات الباسبارات مساوية 1pu أي:

$$V_1(0) = V_2(0) = V_3(0) = 1.0 \ \ pu$$

Z_{33}= ممانعة ثفرين مرئية من الباسبار المعطل.

ولإيجاد ممانعة ثفرين نحول Δ_{123} إلى نجمة مكافئة كما هو مبين في الشكل (3-3a).

الشكل (3-3) اختزال شبكة ثفنين.

$$Z_{1S} = Z_{2S} = \frac{(j0.4)(j0.8)}{j1.6} = j0.2$$

$$Z_{3S} = \frac{(j0.4)(j0.4)}{j1.6} = j0.1$$

$$Z_{33} = \frac{(j0.4)(j0.6)}{j0.4 + j0.6} + j0.1$$

$$= j0.24 + j0.1 = j0.34$$

من الشكل (3-2c) نجد:

$$I_3(F) = \frac{V_3(F)}{Z_{33} + Z_f} = \frac{1.0}{j0.34 + j0.16} = -j2.0 \qquad pu$$

من الشكل (3-3a)، وبتطبيق قاعدة مجزئ التيار نجد:

$$I_{G1} = \frac{j0.6}{j0.4 + j0.6} I_3(F) = -j1.2 \qquad pu$$

$$I_{G2} = \frac{j0.4}{j0.4 + j0.6} I_3(F) = -j0.8 \qquad pu$$

نحسب تغيرات توتر الباسبار من الشكل (3-3) :

$$\Delta V_1 = 0 - (j0.2)(-j1.2) = -0.24 \quad pu$$

$$\Delta V_2 = 0 - (j0.4)(-j0.8) = -0.32 \quad pu$$

$$\Delta V_3 = 0 - (j0.2)(-j1.2) = -0.68 \quad pu$$

نوجد توترات الباسبارات أثناء العطل بتراكم توترات الباسبارات قبل العطل مع تغيرات توترات الباسبارات الناجمة عن توتر ثفنين في الشبكة (3-3b):

$$V_1(F) = V_1(0) + \Delta V_1 = 1.0 - 0.24 = 0.76 \quad pu$$

$$V_2(F) = V_2(0) + \Delta V_2 = 1.0 - 0.32 = 0.68 \quad pu$$

$$V_3(F) = V_3(0) + \Delta V_3 = 1.0 - 0.68 = 0.32 \quad pu$$

تحسب تيارات الخطوط أثناء العطل كما يلي:

$$I_{12}(F) = \frac{V_1(F) - V_2(F)}{Z_{12}} = \frac{0.76 - 0.68}{j0.8} = -j0.1 \quad pu$$

$$I_{13}(F) = \frac{V_1(F) - V_3(F)}{Z_{13}} = \frac{0.76 - 0.32}{j0.4} = -j1.1 \quad pu$$

$$I_{23}(F) = \frac{V_2(F) - V_3(F)}{Z_{23}} = \frac{0.68 - 0.32}{j0.4} = -j0.9 \quad pu$$

(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 ثفرين للعطل في 2

نحسب ممانعة ثفرين 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:

$$I_2(F) = \frac{V_Z(0)}{Z_{22} + Z_f} = \frac{1.0}{j0.24 + j0.16} = -j2.5 \quad pu$$

الشكل (3-5) اختزال شبكة ثفرين.

ومن الشكل (3-5a) وباستخدام مجزئ تيار العطل بين المولدين نجد:

$$I_{G1} = \frac{j0.4}{j0.4 + j0.6} I_2(F) = -j1.0 \quad pu$$

$$I_{G2} = \frac{j0.6}{j0.4 + j0.6} I_2(F) = -j1.5 \quad pu$$

ومن الشكل (3-5a) نحسب تغير التوتر في البارسبات الثلاثة والناجم عن العطل:

$$\Delta V_1 = 0 - (j\,0.2)\,(-j\,1.0) = -0.2 \quad pu$$

$$\Delta V_2 = 0 - (j\,0.4)\,(-j\,1.5) = -0.6 \quad pu$$

$$\Delta V_3 = -0.2 - (j\,0.4)\,(\frac{-j1.0}{2}) = -0.4 \quad pu$$

التوتر الجديد للبارسبا رات الثلاثة أثناء العطل هو التوتر قبل العطل مضافاً إليه تغير التوتر في الباسبار المعني والناجم عن العطل:

$$V_1(F) = V_1(0) + \Delta V_1 = 1.0 - 0.2 = 0.8 \quad pu$$

$$V_2(F) = V_2(0) + \Delta V_2 = 1.0 - 0.6 = 0.4 \quad pu$$

$$V_3(F) = V_3(0) + \Delta V_3 = 1.0 - 0.4 = 0.6 \quad pu$$

تيارات العطل في الخطوط:

$$I_{12}(F) = \frac{V_1(F) - V_2(F)}{Z_{12}} = \frac{0.8 - 0.4}{j0.8} = -j0.5 \quad pu$$

$$I_{13}(F) = \frac{V_1(F) - V_3(F)}{Z_{13}} = \frac{0.8 - 0.6}{j0.4} = -j0.5 \quad pu$$

$$I_{32}(F) = \frac{V_3(F) - V_2(F)}{Z_{32}} = \frac{0.6 - 0.4}{j0.4} = -j0.5 \quad pu$$

(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 ثفرين للعطل في 1

الشكل (3-7) اختزال شبكة ثفرين لأجل العطل في الباسبار 1

$$Z_{11} = \frac{(j0.2)(j0.8)}{j0.2 + j0.8} = j0.16$$

$$I_1(F) = \frac{V_1(0)}{Z_{11} + Z_f} = \frac{1.0}{j0.16 + j0.16} = -j3.125 \quad pu$$

$$I_{G1} = \frac{j0.8}{j0.2 + j0.8} I_2(F) = -j2.50 \quad pu$$

$$I_{G2} = \frac{j0.2}{j0.2 + j0.8} I_2(F) = -j0.625 \quad pu$$

$$\Delta V_1 = 0 - (j\,0.2)\,(-j\,2.5) = -\,0.50 \quad pu$$

$$\Delta V_2 = 0 - (j\,0.4)\,(-j\,0.625) = -\,0.25 \quad pu$$

$$\Delta V_3 = -\,0.5 + (j\,0.4)\,(\frac{-j0.625}{2}) = -\,0.375 \quad pu$$

$$V_1(F) = V_1(0) + \Delta V_1 = 1.0 - 0.5 = 0.50 \quad pu$$

$$V_2(F) = V_2(0) + \Delta V_2 = 1.0 - 0.25 = 0.75 \quad pu$$

$$V_3(F) = V_3(0) + \Delta V_3 = 1.0 - 0.375 = 0.625 \quad pu$$

$$I_{21}(F) = \frac{V_2(F) - V_1(F)}{Z_{21}} = \frac{0.75 - 0.5}{j0.8} = j0.3125 \quad pu$$

$$I_{31}(F) = \frac{V_3(F) - V_1(F)}{Z_{31}} = \frac{0.625 - 0.5}{j0.4} = j0.3125 \quad pu$$

$$I_{23}(F) = \frac{V_2(F) - V_3(F)}{Z_{23}} = \frac{0.75 - 0.625}{j0.4} = j0.3125 \quad pu$$

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 نعتمد التوتر قبل العطل للبارسبارات من نتائج جريان الحمولة للمنظومة قبل العطل، وأن

نمثل الحمولات بممانعات ثابتة وبالتالي نحصل على نموذج رياضي خطي لمعادلات العقدة . ويمكن أن نلخص خوارزمية الحل بالخطوات التالية:

نعتمد التوتر قبل العطل للباسبارات من دراسة جريان الحمولة للمنظومة قبل العطل.

نمثل الحمولات بسرإحيات ثابتة باستخدام توترات الباسبارات قبل العطل.

نرسم شبكة الممانعات للمنظومة المعطلة.

نرسم شبكة ثفرين مرئية من الباسبار المعطل ونحسب منها تغير التوتر للباسبارات المختلفة والناجم عن العطل فقط.

نطبق مبدأ التراكم لإيجاد توتر الباسبارات أثناء العطّل وذلك بجمع التوتر قبل العطل لكل باسبار مع تغير التوتر 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 K (SCC MVA) 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 للق اطع 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. وتجدر 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 باسبا ر 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:

$$SCC = \sqrt{3}\ V_{LK}\ I_K(F) * 10^{-3} \quad MVA \qquad (3\text{-}1)$$

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:

$$I_k = \frac{V_k(0)}{X_{kk}} \qquad (2\text{-}3)$$

حيث:

$V_K(0)$= قيمة التوتر قبل العطل بالوحدة Pu

X_{KK}= مفاعلة ثفرين مرئية من الباسبار K بالوحدة.

نفرض مقاومة ثفرين مهملة وبالتالي يبقى الحساب في جانب الأمان.

$$I_B = \frac{S_B * 10^3}{\sqrt{3}V_B} \qquad (3\text{-}3)$$

حيث:

S_B= استطاعة الأساس [MVA]

V_B= توتر الأساس بين الطورين [KV]

وعليه فتيار العطل بالأمبير:

$$I_K(F) = I_K(F)_{Pu} * I_B$$

$$= \frac{V_k(0) * S_B * 10^3}{X_{kk} * \sqrt{3}V_B} \qquad (3\text{-}4)$$

$$SCC = \frac{V_k(0)S_B}{X_{kk}} \frac{V_L}{V_B} \qquad (3\text{-}5)$$

إذا كان ا لتوتر الأساس مساوياً للتوتر الاسمي

$$SCC = \frac{V_k(0)S_B}{X_{kk}} \qquad (3\text{-}6)$$

عادة تكون $V_K(0) = 1.0$ pu وعليه:

$$SCC = \frac{S_B[MVA]}{X_{kk}[pu]} \quad [MVA] \qquad (3\text{-}7)$$

مثال (3-2):

احسب سعة القصر لباسبار القامشلي 230 Kv في الشبكة السورية إذا علمت أن :

$$SB = 100 \text{ MVA} \quad , \quad X_{\text{قامشلي}} = 0.18$$

$$SCC = \frac{100}{0.189} = 529 \quad MVA$$

واحسب سعة القصر لباسبار تشرين 230 KV إذا علمت :

$$SB = 100 \qquad , \qquad X_{\text{تشرين}} = 0.044$$

$$SCC = \frac{100}{0.044} = 2273 \quad MVA$$

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 دارة 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 الهوء أو الزيت أو SF_6 أو في الفراغ.

في هذه الفقرة لاننوي 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) للآلات التزامنية، ثم نضرب التيار الناتج بالعامل (1.6) الذي يجسد تأثير المركبة المستمرة (DC-ofset). 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 :

سرعة القاطع الآلي (دورات	العامل
8 أو أكثر	1
5	1.1
3	1.2
2	1.4

وإذا كانت SCC > 500 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 دارة الإطلاق Energizing the trip circuit ولحظة انطفاء القوس. يسبق هذه الفترة زمن تأخر الإطلاق Tripping delay الذي يكون عادة حوالي نصف دورة للحاكمة حتى تستجيب.

يتم تحديد المواصفات للقاطع الآلي ونذكر بعضها:

- التوتر 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 التوتر K Voltage range factor.
- تيار القصر الاسمي لأجل التوتر الأعظمي الاسمي (kV).

$$K = \frac{\text{التوتر الأعظمي الإسمي}}{\text{الحد الأدنى لمجال توتر التشغيل}} \qquad (8\text{-}3)$$

K يحدد مجال التوتر الذي يكون فيه الجداء : «تيار العطل × توتر التشغيل» ثابتاً.

لا يجوز للقاطع الآلي أن يتجاوز مقدرته على فصل العطل. يتعيّن على القاطع أن يمتلك مقدرة فصل متناظرة عظمى مساوية لـ:

$$\text{تيار العطل الإسمي} \times K \qquad (9\text{-}3)$$

في المجال بين التوتر الأعظمي الاسمي و $\frac{1}{K}\times$ التوتر الأعظمي الإسمي تُعرف مقدرة الفصل المتناظرة على أنها الجداء:

$$\text{تيار العطل الاسمي} = \frac{\text{التوتر الأعظمي الإسمي}}{\text{توتر التشغيل}} \qquad (10\text{-}3)$$

مثال (3-3) :

قاطع آلي 69 kV مواصفاته: K = 1.21

التيار المستمر = 1200 A

تيار العطل الاسمي = 19000 A تحت التوتر الأعظمي الإسمي

التوتر الأعظمي الإسمي = 72.5 kV

احسب مقدرة الفصل المتناظرة الأعظمية للقاطع واشرح 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:

الحد الأدنى لتوتر التشغيل = $\frac{72.5}{1.21} = 60\text{kV}$

وعليه فإن القاطع يمكن أن يفصل تيار عطل أعظمي 22990 (أي أكبر من19000) لأجل توترات تشغيل من 60 إلى 72.5 kV.

فمثلاً لأجل توتر تشغيل 66 kV يكون تيار الفصل:

$$\frac{72.5}{66} * 19000 = 20871 \quad \text{A}$$

يكون K = 1.0 لقواطع 115 kV وأكبر.

مثال (4-3) :

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 بالآمبير.

2 التيار العابر بسرعة المار في القاطع B بالآمبير.

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

$$X''_{dM} = 0.2 * \frac{25}{5} = 1.25 \quad pu$$

شبكة ثفرين

اختزال شبكة ثفنين

الشكل (3-9).

من الشكل (3-9) نجد:

$$I_F(F) = \angle 0^o (3 * \frac{1}{j1.25} + \frac{1}{j0.55}) = -j4.22 \quad pu$$

تيار الأساس في منطقة المحركات :

$$\frac{25*1000}{\sqrt{3}*6.6} = 2187 \quad A$$

$$\therefore I_F(F) = 4.22*2187 = 9229 \quad A$$

-2

$$I_B(F) = 1\angle 0^o(2*\frac{1}{j1.25} + \frac{1}{j0.55}) = -j3.42$$

=3.42 * 2187 = 7479.5 A

-3

I_B (F) total = 1.6 * 7479.5 = 11.967 A

4- نعيد حساب تيار العطل المتناوب باعتبار X'_d للمحركات. نحسب X'_d للمحرك حسب نظام النسب الجديد:

$$X'_{dM} = j0.3*\frac{25}{5} = j1.5 \quad pu$$

$$I_B(F) = 1\angle 0^o(2*\frac{1}{j1.5} + \frac{1}{j0.55}) = -j3.1515 \quad pu$$

ومن الجدول نأخذ قيمة عامل المركبة المستمرة 1.1 فنجد تيار الفصل:

1.1*3.1515 * 2187 = 7581 A

وهو المطلوب.

مثال (3-5) :

نظام قدرة مؤلف من 4 باسبارات (الشكل 3-10)، الباسباران 1 و2 توليد والباسباران 3 و 4 محولات . المولدان متماثلان (X'_d = 10 % , 11 kV , 100 MVA) والمحولان متماثلان (X_T= 5% , 100 MVA , 11/110 kV). ممانعات الخطوط مبينة على الشكل بالوحدة على أساس 100 MVA , 110 kV . 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 ثفن ين لأجل العطل في 4 (الشكل 3-11)، ونجري اختزالاً منهجياً (الشكل 3-12) ونحسب تيار العطل مباشرة من الشكل (3-12e) فنجد :

$$Z_{th} = Z_{44} = j\,0.13560 \quad pu$$

$$I_4(F) = \frac{1}{j0.13560} = -j7.37463 \quad pu$$

الشكل (3-11) شبكة ثفرين للعطل في 4

Damascus University

الشكل (3-12) اختزال شبكة ثفرين.

من الشكل (3-12) نحصل على مساهمة كل مولد من تيار العطل :

$$I_{G1} = I_4(F) * \frac{j0.19583}{j0.37638} = -j3.83701 \quad pu$$

$$I_{G2} = I_4(F) * \frac{j0.18055}{j0.37638} = -j3.53762 \quad pu$$

$$\Delta V_1(F) = 0 - (j0.15)(-j3.83701) = -0.57555 \quad pu$$

$$\Delta V_2(F) = 0 - (j0.15)(-j3.53762) = -0.53064 \quad pu$$

$$V_1(F) = 1 + \Delta V_1(F) = 0.42445 \quad pu$$

$$V_2(F) = 1 + \Delta V_2(F) = 0.46936 \quad pu$$

$$\therefore I_{12}(F) = \frac{V_1(F) - V_2(F)}{j0.2} = j0.22455 \quad pu$$

$$I_{13}(F) = \frac{V_1(F) - V_2(F)}{j0.15 + j0.1} = j0.17964 \quad pu$$

ومن

$$\Delta \quad V_3\,(F) = 0-[(j0.15)(-j3.83701)+(j0.15)(j0.17964)]$$

$$= -\,0.54860 \quad pu$$

$$\therefore\ V_3\,(F) = 1-0.54860 = 0.4514 \quad pu$$

$$V_4\,(F) = 0$$

ويترك إيجاد تيارات بقية الخطوط كتمرين للقارئ

سعة القصر للباسبار 4:

$$SCC = \frac{100MVA}{Z_{44}[pu]} = 737.463 \quad MVA$$

مسألة للقارئ: أعد حل المثال إذا حل العطل على الباسبار 2.

تعليق: نلاحظ أن عملية اختزال شبكة ثفن ين غير عملية ومتعبة وتأخذ زمناً طويلاً يطول مع زيادة عدد باسبارات المنظومة. لذلك من الضرروي اعتماد خوارزمية منهجية مناسبة للحل بواسطة الحاسوب وهو مضمون الفقرة التالية.

5-3 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 لمنظومات قدرة بسيطة استخدمنا فيها نظرية ثفرين لرسم شكبة ثفنين واتبعنا في ذلك خوارزمية تم تنفيذها يدوياً، وكان ذلك ممكناً نظراً للعدد القليل لباسبارات المنظومات المدروسة. في هذه الفقرة سنستخدم متريس ممانعات العقد ونظرية ثفنين 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 متواز نة مما يسمح لنا بتمثيلها على أساس طور واحد. نمثل الآلة بقمك ثابتة خلف مما نعة مناسبة X''_d أو

X'_d . نمثل 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 .

نعتمد التوتر قبل العطل للباسبارات من نتائج جريان الحمولة (أو نفرضها 1 pu) فنحصل على الشعاع:

الشكل (3-13) منظومة قدرة ذات n باسباراً

$$V_{bus}(0) = \begin{bmatrix} V_1(0) \\ : \\ V_k(0) \\ : \\ V_n(0) \end{bmatrix} \qquad (3\text{-}11)$$

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 :

$$Z_{iL} = \frac{|V_i(0)|^2}{S_L^*} \qquad (3\text{-}12)$$

إن تغيرات توتر باسبارات المنظومة الناجمة عن العطل (الممثل ببإضافة Z_f بين الباسبار المعطل K والأرض) تكافئ توترات باسبارات شبكة ثفنن التي تحوي توتر ثفن ين $V_K(0)$ فيما تكون جميع القمك للآلات التزامنية مقصورة، ومما نعات جميع عناصر المنظومة والحمولات (الشكل 3-14). نمثل جميع تغيرات التوتر الناجمة عن العطل في هذه الدارة بالشعاع:

$$\Delta V_{bus} = \begin{bmatrix} V_1 \\ : \\ V_k \\ : \\ V_n \end{bmatrix} \qquad (3\text{-}13)$$

الشكل (3-14) شبكة ثفرين للعطل في K.

بتطبيق مبدأ التراكم نحصل على التوتر أثناء العطل للباسبارات:

$$V_{bus}(F) = V_{bus}(0) + \Delta V_{bus} \qquad (3\text{-}14)$$

ومن فصل جريان الحمولة حصلنا على المعادلة المتريسية لمنظومة كهربائية ذات n باسبار.

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \qquad (3\text{-}15)$$

حيث:

I_{bus} = شعاع التيارات المحقونة في الباسبارات.

Y_{bus} = متريس سماحيات العقد، حيث عناصره القطرية :

$$Y_{ii} = \sum_{j=0}^{n} y_{ij} \qquad j \neq i \qquad (3\text{-}16)$$

وعناصره غير القطرية:

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -\, y_{ij} \qquad (17\text{-}3)$$

حيث:

y_{ij} (حرف صغير)= المسايرة الطبيعية للخط i-j .

يجب الانتباه إلى أن جميع التيارات المحقونة في باسبارات شبكة ثفنين (الشكل 3-14) تساوي صفر ماعدا التيار المحقون في البارسبار المعطل (k)، والذي يساوي إلى$-I_k(F)$ (لأن العطل يغادر الباسبار المعطل) .

يعطي تطبيق المعادلة (3-15):

$$\begin{bmatrix} 0 \\ : \\ -I_k(F) \\ : \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{1k} & \dots & Y_{1n} \\ : & : & : & : & : \\ Y_{k1} & \dots & Y_{kk} & \dots & Y_{kn} \\ : & : & : & : & : \\ Y_{n1} & \dots & Y_{nk} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ : \\ \Delta V_k \\ : \\ \Delta V_n \end{bmatrix} \qquad (3\text{-}18)$$

أو باختصار :

$$I_{bus}(F) = Y_{bus} \Delta V_{bus} \qquad (3\text{-}19)$$

$$\Delta V_{bus} = Z_{bus} I_{bus}(F) \qquad (3\text{-}20)$$

حيث :

$$Z_{bus} = Y_{bus}^{-1} \qquad (3\text{-}21)$$

Z_{bus} = متريس ممانعات العقد.

نجد بتعويض (3-20) في (3-14)

$$V_{bus}(F) = V_{bus}(0) + Z_{bus} I_{bus}(F) \qquad (3\text{-}22)$$

نكتب المعادلة الأخيرة بدلالة عناصرها فنجد:

$$\begin{bmatrix} V_1(F) \\ : \\ V_k(F) \\ : \\ V_n(F) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1(0) \\ : \\ V_k(0) \\ : \\ V_n(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1k} & \dots & Z_{1n} \\ : & : & : & : & : \\ Z_{k1} & \dots & Z_{kk} & \dots & Z_{kn} \\ : & : & : & : & : \\ Z_{n1} & \dots & Z_{nk} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ : \\ -I_k(F) \\ : \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (3\text{-}23)$$

ونظراً لاحتواء شعاع التيارات على عنصر واحد مغاير للصفر نجد:

$$V_k(F) = V_k(0) - Z_{kk} I_k(F) \qquad (3\text{-}24)$$

وأيضاً من الشكل (3-13) توتر الباسبار المعطل يساوي من جهة أخرى:

$$V_k(F) = Z_f\, I_k(F) \qquad (3\text{-}25)$$

لأجل عطل صلب مباشر يكون $Z_f = 0$ و $V_k(F) = 0$.

بتعويض (3-25) في (3-24) نحصل على :

$$I_k(F) = \frac{V_k(0)}{Z_{kk} + Z_f} \qquad (3\text{-}26)$$

وعليه لأجل عطل في k نحتاج فقط العنصر Z_{kk} من مصفوفة ممانعات العقد، وهذا العنصر هو في الواقع ممانعة ثفنين مرئية من البارسبار المعطل (k).

نكتب المعادلة i من المعادلة المتريسية (3-23) فنحصل على توترات الباسبارات أثناء العطل:

$$V_i(F) = V_i(0) - Z_{ik} I_k(F) \qquad (3\text{-}27)$$

أو :

$$V_i(F) = V_i(0) - \frac{Z_{ik}}{Z_{kk} + Z_f} V_k(0) \qquad (3\text{-}28)$$

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):

$$I_{ij}(F) = \frac{V_i(F) - V_j(F)}{z_{ij}} \qquad (3\text{-}29)$$

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 ثفنين ثم نقوم بحساب مقلوب المصفوفة Y_{bus}. يجب أن ننتبه إلى أن المصفوفة Y_{bus} لشبكة ثفنين 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:

- تُهمل الحمولات العادية normal loads سعات الخطوط وأية عناصر تفرعية مع الأرض.
- يُمثل المولد بمنبع توتر على التسلسل مع مفاعلته العابرة، العابرة بسرعة.
- تُعتبر كافة الحمولات المجهزة بمبدل مآخذ، في الوضع الاسمي.
- تهمل مقاومة الخط إذا كانت أصغر من مفاعلته 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 ثفنين للعطل على الباسبار 3 (الشكل 3-2b) مع تحويل الممانعات إلى سماحيات (الشكل 3-15).

الشكل (3-15) مخطط المسايرة للشكل (3-2b).

نوجد Y_{bus} لشبكة ثفنين المسالمة :

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} -j8.75 & j1.25 & j2.5 \\ j1.25 & -j6.25 & j2.5 \\ j2.5 & j2.5 & -j5.0 \end{bmatrix}$$

$$Y_{bus}^{-1} = Z_{bus} = \begin{bmatrix} j0.16 & j0.08 & j0.12 \\ j0.08 & j0.24 & j0.16 \\ j0.12 & j0.16 & j0.34 \end{bmatrix}$$

$$I_3(F) = \frac{V_3(0)}{Z_{33} + Z_f} = \frac{1.0}{j0.34 + j0.16} = -j2.0 \quad pu$$

ومن المعادلة (3-27) نجد توترات الباسبارات أثناء العطل:

$$V_1(F) = V_1(0) - Z_{13}I_3(F) = 1.0 - (j0.12)(-j2.0) = 0.76 \quad pu$$

$$V_2(F) = V_2(0) - Z_{23}I_3(F) = 1.0 - (j0.16)(-j2.0) = 0.68 \quad pu$$

$$V_3(F) = V_3(0) - Z_{33}I_3(F) = 1.0 - (j0.34)(-j2.0) = 0.32 \quad pu$$

ومن المعادلة (3-29) نحسب تيارات الخطوط :

$$I_{12}(F) = \frac{V_1(F) - V_2(F)}{z_{12}} = \frac{0.76 - 0.68}{j0.8} = -j0.1 \quad pu$$

$$I_{13}(F) = \frac{V_1(F) - V_3(F)}{z_{13}} = \frac{0.76 - 0.32}{j0.4} = -j1.1 \quad pu$$

$$I_{23}(F) = \frac{V_2(F) - V_3(F)}{z_{23}} = \frac{0.68 - 0.32}{j0.4} = -j0.9 \quad pu$$

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 المسالمة 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).

$$I_4(F) = \frac{V_4(0)}{Z_{44}} = \frac{1.0}{j0.1356} = -j7.37463 \quad pu$$

ومن المعادلة (3-27) نحسب توترات الباسبارات أثناء العطل:

$$V_{bus}(F) = \begin{bmatrix} V_1(F) \\ V_2(F) \\ V_3(F) \\ V_4(F) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4248 \\ 0.4698 \\ 0.4521 \\ 0.0 \end{bmatrix} \quad Pu$$

ومن المعادلة (3-29) نحسب تيارات الخطوط أثناء العطل:

$I_{13}(F) = j0.182$ pu ; $I_{12}(F) = j0.225$ pu

$I_{14}(F) = -j4.248$ pu ; $I_{24}(F) = -j3.132$ pu

$I_{23}(F) = -j0.177$ 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 :

$$I_1(F) = \frac{1.0}{Z_{11}} = \frac{1}{j0.0903} = -j11.074197 \quad pu$$
$$= I_2(F)$$

6–3 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 نمثل شبكة التوتر المغذية بقمك قيمتها $1.05\ V_n$ على التسلسل مع ممانعة Z_N تحسب كما يلي:

$$Z_N = \frac{1.1V_n^2}{SCC} \quad \Omega/\text{طور} \qquad (3\text{-}30)$$

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 مخمد 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/Xفي 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.

$$\hat{I}_S = C.\sqrt{2}I''(F) \qquad (3\text{-}31)$$

$\hat{I}_s$ = 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 سعات المكثفات التفرعية وسعات 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 :

$$\hat{I}_{sM} = 8-11 \ \ I_{nM} \qquad (3\text{-}32)$$

$\hat{I}_{sM}$ = 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:

$$I''_M(F) = \frac{0.9V_{nM}}{\sqrt{3}Z_M} \qquad (3\text{-}33)$$

$$Z_M = \frac{V_{nM}}{\sqrt{3}I_{st}} \qquad (3\text{-}34)$$

حيث :

V_{nM} = التوتر الاسمي بين طورين على أقطاب المحرك.

Z_M = ممانعة الإقلاع للمحرك.

I_{st} = تيار الإقلاع للمحرك.

$$I_{st} = 4\text{-}8 \ \ I_{nM} \qquad (3\text{-}35)$$

مثال (3-8) :

مجموعة محركات تحريضية استطاعتها الإجمالية 15MW $\cos\varphi = 0.85$ تعمل تحت توتر 6kV. احسب ممانعة الإقلاع Z_M لها والمستخدمة في حساب الأعطال علماً أن تيار الإقلاع يساوي 5 أضعاف التيار الإسمي.

الحل :

للمحرك المكافئ

$$I_n = \frac{15}{\sqrt{3}*6*0.85} = 1.7 \quad kA$$

$$Z_M = \frac{6}{\sqrt{3}*5*1.7} = 0.407 \quad \Omega/phase$$

وسنوضح في المثال (3-9) طريقة الحساب وفق النظم القياسية الألمانية.

مثال (3-9) :

تغذى شبكة توتر منخفض 380 V من شبكة 6 kV سعة القصر لها 230 MVA عبر محول(Dy5، 6/0.4 kV ، Z_T =6% ، 1MVA ضياعات القصر= 11.3 kW). محددات عناصر الشبكة (الشكل 3-17).

X mΩ/phase	R mΩ/phase	
-	0.017	القاطع الآلي 2000 A
0.02	0.01	محول التيار 2000/5 A
-	0.049	قاطع عزل 2000 A`
0.7	-	5 mt باسبار aℓ 10 ×1000×1
-	0.032	8 وصلات مع الباسبار

منصهرة 200 A	0.5	-
قاطع حمل 200 A	0.18	0.06
محول تيار 200/5 A	0.84	0.16
1mt باسبار aℓ 10 ×40×1	-	0.07
5 وصلات مع الباسبار	0.032	-

والمطلوب احسب تيارات العطل لأجل العطلين F_1 و F_2 على شبكة التوتر المنخفض.

Damascus University

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:

$$Z_N = \frac{1.1*6^2}{230}(\frac{0.4}{6})^2*10^3 = 0.77 \qquad m\Omega/Phase$$

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:

$$Z_T = \frac{6}{100} * \frac{(0.4)^2}{1} * 10^3 = 9.6 \qquad m\Omega/phase$$

$$X_T = \frac{P_{Loses}}{S_T} = \frac{11}{1000} \frac{(0.4)^3}{1} * 10^3 = 1.82 \qquad m\Omega/phase$$

$$X_T = \sqrt{(9.6)^3 - (1.82)^2} = 9.42 \qquad m\Omega/phase$$

الممانعات الإضافية :

$$R_{add} = 1.73 \ m\Omega/phase \quad ; \quad X_{add} = 1.33 \ m\Omega/phase$$

الكابل :

$$R_C = 39.8 \ m\Omega/phase \quad ; \quad X_C = 11.3 \ m\Omega/phase$$

$$I''_{F1} = \frac{1.05 * 380}{\sqrt{3}\sqrt{(0.15 + 1.82 + 1.73)^2 + (0.76 + 9.42 + 1.33)^2}} = 19.054 \quad kA$$

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:

$$I_s(F_1) = 1.37 * \sqrt{2} * 19.054 = 36.92 \qquad kA$$

العطل F_2 :

$$I''(F_2) = \frac{1.05 * 380}{\sqrt{3}\sqrt{43.5^2 + 22.81^2}} = 4.69 \qquad kA$$

$$\frac{R_2}{X_2} = \frac{43.42}{22.44} = 1.9 \ \Rightarrow C = 1$$

$$I_s(F_2) = \sqrt{2} * 4.69 = 6.633 \quad kA$$

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 $3(3\times1000mm^2)$ بطول 10m. وعبر لوحة المبنى M المتصلة باللوحة T عن طريق كابلات :

$3\ (3 \times 240\ mm^2)$ بطول 180. تتصل اللوحة M باللوحة S في المنزل عن طريق كابل $3\times25\ mm^2$ بطول 25m.

يبين الشكل (3-18) مخططاً رمزياً للشبكة.

والمطلوب ادرس العطل المتوازن الذي يحصل في اللوحات الثلاثة وقدِّر 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):

$$Z_N = \frac{1.1 - 400^2}{500 * 10^3} = 0.352 \quad m\Omega/phase$$

نفرض $R_N / X_n = 0.1$ ومنه :

$$R_N = 0.035 \;\; ; \;\; X_N = 0.350 \quad m\Omega/phase$$

المحول :

$$Z_T = \frac{6}{100}\frac{(0.4)^2}{1.6} * 10^3 = 6 \quad m\Omega/phase$$

$$R_T = \frac{1.05}{100}\frac{(0.4)^2}{1.6} * 10^3 = 1.05 \quad m\Omega/phase$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = 5.407 \quad m\Omega/phase$$

$$R_c = \frac{\ell\rho}{A.n} * 10^3 = \frac{10 * \frac{1}{56}}{1000 * 3} * 10^3 = 0.06 \quad m\Omega/phase$$

$$X_C = X'\frac{1}{n} = 0.08 * \frac{10}{3} = 0.267 \quad m\Omega/phase$$

$$R_{total} = 1.145 \quad m\Omega/phase$$

$$X_{total} = 6.524 \quad m\Omega/phase$$

$$\frac{R_t}{X_t} = \frac{1.145}{6.524} = 0.176$$

$$Z_t = 6.624 \quad m\Omega/phase$$

$$I''(F_1) = \frac{1.05 * 400}{\sqrt{3} * 6.624} = 36.61 \quad kA$$

من المخطط (3-16) نجد C = 1.58 .

$$\hat{I}_s(F_1) = 1.58 * \sqrt{2} * 36.61 = 81798 \quad kA$$

إذا فرضنا أن القاطع يفصل بعد 5 دورات يكون تيار الفصل (rms):

$$I(F_1) = 1.1 * 36.61 = 40.27 \quad kA$$

وبنفس الطريقة نوجد تيار العطل للوحتين M و S فنجد:

$$I''(F_2) = \frac{1.05 * 400}{\sqrt{3} * 12.637} = 19.19 \quad kA$$

$$I''(F_3) = \frac{1.05 * 400}{\sqrt{3} * 26.985} = 9 \qquad kA$$

ونلخص فيما يلي النتائج :

	$F_1(T)$	$F_2(M)$	$F_3(S)$
R $m\Omega/phase$	1.145	5.609	23.466
X $m\Omega/phase$	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
$\hat{I}_s(F)$ kA	81.798	32.57	12.73
$I(F)_{rms}$ kA تيار الفصل	40.27	21.12	9.9

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 خانقة 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:

تعاني النواقل الحاملة للتيار من إجهادات انعطاف (انحناء) وتعاني 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:

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{\ell}{D} I_a I_b \qquad (3\text{-}36)$$

حيث :

$\mu_0 = 4\pi.10^9 H/cm =$ نفوذية الفراغ الحر.

ℓ = طول الناقل.

D = البعد بين الناقلين.

وإذا قدرنا التيار بالآمبير و ℓ و D بواحدة الطول نفسها فنحصل على القوة بـ Kp :

$$F = 2.04 * 10^{-8} I_a I_b \qquad (3\text{-}37)$$

ويؤثر F على كامل طول الناقل بانتظام، في حالة تيارين بذات الاتجاه تكون القوة تجاذبية وإلاّ فالقوة تدافعية.

في حالة نظام ثلاثي الطور تحمل نواقله التيارات اللحظية i_a و i_b و i_c تكون القوى متغيرة مع الزمن.

$$f_a = \underbrace{2.04*10^{-8}\frac{\ell}{D}\hat{I}^2}_{F_{max}}(3/8\cos 2\omega t - \frac{\sqrt{3}}{8}\sin\omega t - \frac{3}{8})$$

$$f_b = F_{max}(\frac{3}{4}\cos 2\omega t - \frac{\sqrt{3}}{4}\sin 2\omega t) \qquad (3\text{-}38)$$

$$f_c = F_{max}(\frac{\sqrt{3}}{8}\sin 2\omega t - \frac{3}{8}\cos 2\omega t - \frac{3}{8})$$

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.

$$F_{b\,max} = 0.866F_{max} \qquad (3\text{-}39)$$

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 مطالها 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 :

$$F_{max} = 2.04*10^{-8}\hat{I}_s \frac{\ell}{D} \qquad (3\text{-}40)$$

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 تختزن 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:

$$dQ = I^2 R\, dt \qquad (3\text{-}41)$$

وترتفع درجة حرارة الناقل بمقدار $d\theta$ حيث :

$$dQ = MCd\theta \qquad (3\text{-}42)$$

حيث:

M = كتلة الناقل = $LA\gamma$

C = الحرارة النوعية لمادة الناقل.

γ = كثافة مادة الناقل .

ولكن مقاومة الناقل تزداد مع درجة الحرارة:

$$R = \frac{L}{\chi A}[1+\alpha(\theta-\theta_0)] \qquad (3\text{-}43)$$

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:

$$\theta = \theta_0 + \frac{1}{\alpha}(e^{\frac{I_\alpha^2}{A^2 c\chi\gamma}} - 1) \qquad (3\text{-}44)$$

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 S/mm^2	35.5	57	8.3	36.4
عوامل درجة الحرارة α 10^{-3} / C^o	4.0	3.92	4.5	4.0
الكثافة g/cm^3	2.7	8.9	7.7	7.4-8.9
الحرارة النوعية Kcal/kgC^o	0.213	0.093	0.13	0.084

لو وضعنا في المعادلة (3-44) $t = 1$ 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، إلاّ أنه ثبت أن الحرارة المتولدة أكبر من الحرارة المحسوبة على أساس I_f.

ويستخدم حالياً للحسابات الحرارية تيار I_m يحسب من العلاقة التجريبية :

$$I_m = I''_f \sqrt{(m+n)t} \qquad (3\text{-}45)$$

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 C^o
ناقل عار ومدهون	نحاس	200
	ألمنيوم	180
أسلاك		
(إجهاد الشد أكبر من $1Kp/mm^2$)	Al/st	200
أسلاك	نحاس	170
(إجهاد الشد أقل من $1Kp/mm^2$)	ألمنيوم	170
	Al/st	160
	فولاذ	200
كوابل		
1 ك. ف معزول بالبلاستيك		180
1 ك. ف معزول بالورق	ألمنيوم	200
10 ك.ف		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 يولّد 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، يؤذي القوس العاملين في المحطة بسبب غيمة الغازات أو غبرة المعادن المتولدة والمعدن المنصهر المتبعثر والتوهج المضر 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 لتحقق فصلاً سريعاً للعطل.

وتُعتبر قدرة القوس المتولدة التي تقل عن 500 kWs غير خطرة. ولكن لا يمكن ضمان هذه القيمة الحدية بواسطة أجهزة الحماية العادية (حواكم حماية وقواطع آلية). لذلك لابد من استخدام طفايات قوس كهربائي لتحقيق الحماية شبه الكاملة.

وتجدر 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 (5-3) 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 (قضيب 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.

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الشكل (3-21a)

Damascus University

الشكل (3-21b)

تطبيق 2 :

نفرض حصول العطل على باس (قضيب 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 - انهيار 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.

Damascus University

الشكل (3-22).

3– مسائل للحل:

Damascus University

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 3.1 KV. أوجد التيارات العابرة بسرعة في المولد والمحرك عندما يحدث عطل على بار المولد.

الشكل (3-23) للمسألة 3-1.

3-2) محركان متوافقيان 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 باسبارها 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 3–2.

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:

(a) تيار العطل العابر بسرعة (فوق العابر) المتناظر المار في القاطع.

(b) أعظم قيمة للمركبة المستمرة لتيار العطل المارة في القاطع.

(c) التيار العابر بسرعة (فوق العابر) الإجمالي الاسمي للقاطع.

(d) 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) :

$$80\ \text{MVA}\ ,\ 12/66\ \text{kV}\ ,\ X = 0.08\ \ \text{pu}$$

الخط : $X = 12\Omega$

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 (قضيب تجميع) 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%

3–7) 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 : 100 MVA , X' = 10%
- 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، وتيارات ما قبل العطل معدومة.

الشكل (3-28) للمسألة 3–8.

بعض أجوبة المسائل:

3–1) 8.87 KA ; 4.93 KA

3–2) 26.96 KA

3–3) 6.97 KA

3–4) a) 0.9277 KA (b) 1.312 KA (c) 1.4843 KA
(d) 1.0205 KA , 53.03 MVA (e) 0.1959 KA

3–5) 8.319 KA

3–6) 2.39 pu

3–7) 132.1 ; 47.9 ; 136.9 ; 45.6 MVA

3–8) $I^f = -j8.006$ pu ; $I^f_{13} = -j4.004$ pu

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفصل الرابع

المركبات المتناظرة

Symmetrical components

4–1 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 ممانعاته متماثلة وتواترته وتياراته الثلاثية الطور تشكل نظماً 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 :

–تعرّض النظام لعطل بين طور والأرض.

–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 (السالب). 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_c, V_b, V_a غير متوازنة. يمكن تعريف هذه التواترات كمايلي :

$$\left.\begin{aligned}
V_a &= \frac{1}{3}(V_a + V_a + V_a) + \frac{1}{3}(V_b + aV_b + a^2V_b) \\
&\quad + \frac{1}{3}(V_c + aV_c + a^2V_c) \\
V_b &= \frac{1}{3}(V_b + V_b + V_b) + \frac{1}{3}(V_a + aV_a + a^2V_a) \\
&\quad + \frac{1}{3}(V_c + aV_c + a^2V_c) \\
V_c &= \frac{1}{3}(V_c + V_c + V_c) + \frac{1}{3}(V_a + aV_a + a^2V_a) \\
&\quad + \frac{1}{3}(V_b + aV_b + a^2V_b)
\end{aligned}\right\} \qquad (4\text{-}1)$$

ولنتفق على المصطلحات التالية:

$$\left.\begin{array}{lll} V_{a0}=\frac{1}{3}(V_a+V_b+V_c) & V_{b0}=V_{a0} & V_{c0}=V_{b0}=V_{a0} \\ V_{a1}=\frac{1}{3}(V_a+aV_b+a^2V_c) & V_{b1}=a^2V_{a1} & V_{c1}=aV_{a1} \\ V_{a2}=\frac{1}{3}(V_a+a^2V_b+aV_c) & V_{b2}=V_{a2} & V_{c2}=a^2V_{a2} \end{array}\right\} \quad (4\text{-}2)$$

بمقارنة (4-1) و (4-2) نحصل على :

$$\left.\begin{array}{l} V_a=V_{a0}+V_{a1}+V_{a2} \\ V_b=V_{b0}+V_{b1}+V_{b2} \\ V_c=V_{c0}+V_{c1}+V_{c2} \end{array}\right\} \quad (4\text{-}3)$$

تدل المعادلات (4-3) أنه يمكن تحويل الأشعة الأصلية V_c, 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 (1-4) المخططات الشعاعية للأنظمة الثلاثة:

النظام الصفري (V_{a0}, V_{a0}, V_{a0})

النظام الموافق $(V_{a1}, a^2V_{a1}, aV_{a1})$

النظام المعاكس $(V_{a2}, aV_{a2}, a^2V_{c2})$

(نظام التتابع السالب)	(نظام التتابع الموجب)	(نظام التتابع الصفري)
(النظام المعاكس)	(النظام الموافق)	
(النظام السالب)	(النظام الموجب)	(النظام الصفري)

الشكل (1-4) المخططات الشعاعية لأنظمة المركبات المتناظرة.

وتجدر الإشارة إلى أن تحديد ثلاثة مركبات من المركبات التسعة يكفي لتحديد المركبات كلها (المعادلات 2-4). وجرت العادة أن نركز على مركبات الطور a وعليه نستطيع أن نكتب ماتريسيا (أنظر العلاقات 2-4):

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \qquad (4\text{-}4)$$

وباختصار

$$[V_s] = [S][V] \qquad (4\text{-}5)$$

حيث :

S = ماتريس التحويل

$$S = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \qquad (4\text{-}6)$$

وإذا أجرينا عملية التحويل المعاكس (أو من المعادلة 3-4) فنحصل :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \qquad (4\text{-}7)$$

وباختصار :

$$[V] = [T][V_S] \qquad (4\text{-}8)$$

حيث :

$$[T] = [S^{-1}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \qquad (4\text{-}9)$$

ويرمز لـ T في بعض المراجع بالرمز A كما يرمز لـ S بالرمز A^{-1} ويبين الشكل (2-4) التحصيل التخطيطي للمركبات المتناظرة:

المركبة المعاكسة

المركبة الصفرية

المركبة الموافقة

الشكل (2-4): تحصيل المركبات المتناظرة تخطيطياً.

حالات خاصة :

أ- نظام ثلاثي الطور متوازن: (توترات أو تيارات متوازنة)

بتطبيق العلاقة (4-4) نجد :

$$V_{a0} = 0 \quad ; \quad V_{a1} = V_a \quad ; \quad V_{a2} = 0$$

أي أنه يوجد نظام موافق فقط.

ب- نظام ثلاثي الطور : $V_a \; ; \; V_b = V_c = 0$

في هذه الحالة تكون المركبات كلها متساوية:

$$V_{a0} = V_{a1} = V_{a2} = V_c = 0$$

جـ- ليكن النظام ثلاثي الطور مع ناقل حيادي المبين في الشكل (4-3) والمطلوب:

- إيجاد المركبة الصفرية للتواتر المركبة V_{ca}, V_{bc}, V_{ab}
- إيجاد العلاقة بين المركبة الصفرية 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.

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_a - V_b \\ V_{bc} &= V_b - V_c \\ V_{ca} &= V_c - V_a \\ + \quad & \\ V_{ab} + V_{bc} + V_{ca} &= 0 \end{aligned} \qquad (4\text{-}10)$$

$\therefore V_{ab0} = 0$ المركبة الصفرية صفر دوماً

الشكل (4-3)

$$I_{a0} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) = \frac{1}{3} I_n \qquad (4\text{-}11)$$

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 للتواترات 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.

* يولّد 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 فتنقل 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_a, V_b, V_c التواترت البسيطة على الأطوار الثلاثة.

$\underline{I}_a, \underline{I}_b, \underline{I}_c$ التيارات في الأطوار الثلاثة.

ووفق نظرية المركبات المتناظرة نكتب للتيارات:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \qquad (4\text{-}12)$$

$$[I_S] = [S][I] \tag{4-13}$$

$$[I] = [T][I_S] \tag{4-14}$$

الاستطاعة العقدية لنظام ثلاث الطور:

$$S = V_a I_a^+ + V_b I_b^+ + V_c I_a^+ \tag{4-15}$$

وماتريسيا:

$$S = [V_a \ V_b \ \ V_c]\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}^* = [V][I]^* \tag{4-16}$$

t تعني منقول

+ تعني مرافق

$$S = \left[T \ \ V_S\right]^t \left[T.I_S\right]^* = V_S^t T^t T^* I_S \tag{4-17}$$

$$T^t T^+ = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

$$= 3\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4-18}$$

$$S = 3V_S^t \ I_S^+$$

$$= 3\underline{V}_{a0}\underline{I}_{a0}^+ + 3\underline{V}_{a1}\underline{I}_{a1}^+ + 3\underline{V}_{a2}\underline{I}_{a2}^+ \tag{4-19}$$

أمثلة حول نظرية المركبات المتناظرة:

*** مثال (4-1) :**

حمولة أومية متوازنة تغذى عن طريق نظام تيارات غير متوازن الشكل (5-4)

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 (5-4).

الحل :

-1

$$I_A + I_B + I_C = 0$$

$$10\angle 30^0 + 15\angle -60^0 + I_C = 0$$

$$\therefore I_C = -16.2 + j8.0 = 18\angle 154^o \quad A$$

-2

$$I_{A1} = \frac{1}{3}(10\angle 30^0 + 15\angle(-60^0 + 120^0) + 18\angle(154^0 + 240^0))$$

$$= 10.35 + j9.3 = 14\angle 42^0 \quad A$$

$$I_{A2} = \frac{1}{3}(10\angle 30^0 + 15\angle(-60^0 + 240^0) + 18\angle(154^0 + 120^0))$$

$$= -1.7 - j4.3 = 4.65\angle 248^0 \quad A$$

$$I_{A0} = \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C) = 0$$

$$I_{B1} = 14\angle 282^o \quad A \qquad I_{C1} = 14\angle 162^o \quad A$$

$$I_{B2} = 4.65\angle 8^o \quad A \qquad I_{C2} = 4.65\angle 128^o \quad A$$

$$I_{B0} = 0 \quad A \qquad I_{C0} = 0 \quad A$$

check

$$I_A = I_{A1} + I_{A2} + I_{A0} = 8.65 + j5 = 10\angle 30^o$$

3- نكافئ مثلث الحمولة بنجمة (الشكل 6-4):

$$V_{AB} = \frac{1}{3}R(I_A - I_B)$$

$$I_{AB} = V_{AB}/R = \frac{1}{3}(I_A - I_B)$$

$$I_{BC} = \frac{1}{3}(I_B - I_C)$$

$$I_{CA} = \frac{1}{3}(I_C - I_A)$$

الشكل (6-4)

$$I_{AB} = \frac{1}{3}(10\angle 30^0 - 15\angle -60^0) = 6\angle 86^0 \quad A$$

$$I_{BC} = \frac{1}{3}(15\angle -60^0 - 18\angle 154^0) = 10.5\angle -41.5^0 \quad A$$

$$I_{CA} = \frac{1}{3}(18\angle 154^0 - 10\angle 30^0) = 8.3\angle 173^0 \quad A$$

-4

$$I_{AB1} = \frac{1}{3}(6\angle 86^0 + 10.5\angle(-41.5^o + 120^0) + 8.3\angle(173^o + 240^o))$$

$$= 8\angle 72^0 \quad A$$

$$I_{AB2} = \frac{1}{3}(6\angle 86^0 + 10.5\angle(-41.5^o + 240^0) + 8.3\angle(173^o + 120^o))$$

$$= 2.7\angle 218^0 \quad A$$

$$I_{AB0} = 0$$

تعليق : نلاحظ أن :

$$I_{AB1} = \frac{I_{A1}}{\sqrt{3}} \angle 30^o$$

$$I_{AB2} = \frac{I_{A2}}{\sqrt{3}} \angle -30^o$$

مثال (4-2 غير محلول) :

حمولة مثلثية أومية 15 ; 20 ; 250 Ohm

مغذاة من منبع ثلاثي الطور متوازن 400V (الشكل 7-4).

أوجد المركبات المتناظرة لتيارات المثلث ثم لتيارات الخطوط.

أ-اعتبر V_{bc} شعاع المرجع.

ب-اعتبر V_{ab} شعاع المرجع.

الشكل (7-4)

الأجوبة :

reference	V_{bc}	V_{ab}
$\underline{I}_{ab0}$	$7.50\angle 165^o$	$7.5\angle 45^o$
$\underline{I}_{ab1}$	$16.1\angle 120^o$	$16.1\angle 0^o$
$\underline{I}_{ab2}$	$7.5\angle 75^o$	$7.5\angle -45^o$
$\underline{I}_{ao}$		0
$\underline{I}_{a1}$		$27.825\angle -29.889^o$
$\underline{I}_{a2}$		$12.99\angle -15.13^o$

4-4 الممانعات التتابعية (الممانعات المتناظرة)

sequence impedances (symmetrical impedances):

حتى الآن درسنا تطبيق نظرية المركبات المتناظرة على التواترت والتيارات والاستطاعات، وسنبحث فيمايلي تطبيقها على نظام ممانعات مؤلف من عناصر مسالمة (الشكل 8-4).

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 (8-4) يمكن أن تمثل خطاً هوائياً ثلاثي الطور يربط عقدتين في شبكة كهربائية.

نستطيع أن نكتب جبرياً:

$$V_A - V_a = V_{Aa} \quad , \quad V_{Aa} = Z_a I_a + Z_n (I_a + I_b + I_c)$$
$$V_B - V_b = V_{Bb} \quad , \quad V_{Bb} = Z_b I_b + Z_n (I_a + I_b + I_c)$$
$$V_C - V_c = V_{Cc} \quad , \quad V_{Cc} = Z_c I_c + Z_n (I_a + I_b + I_c)$$

الشكل (4-8) ممانعات غير متوازنة.

وبشكل مصفوفات :

$$\begin{bmatrix} V_{Aa} \\ V_{Bb} \\ V_{Cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_b + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_c + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \qquad (4\text{-}20)$$

أو

$$[V] = [Z][I] \qquad (4\text{-}21)$$

حيث [z]= متريس الممانعات الطبيعية.

بتطبيق نظرية المركبات المتناظرة على المعادلة (4-21) نجد :

$$[T][V_S] = [Z][T][I_S]$$

أو

$$[V_S] = [S][Z][T][I_S] = [Z_S][I_S] \qquad (4\text{-}22)$$

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 حساب متريس الممانعات المتناظرة للدارة المبينة في الشكل (4-8) يتم كمايلي :

$$[Z_S] = [S][Z][T] \qquad (4\text{-}23)$$

$$Z_S = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_b + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_c + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

$$Z_S = \begin{bmatrix} \frac{1}{3}(Z_a + Z_b + Z_c) + 3Z_n & \frac{1}{3}(Z_a + a^2 Z_b + aZ_c) & \frac{1}{3}(Z_a + aZ_b + a^2 Z_c) \\ \frac{1}{3}(Z_a + aZ_b + a^2 Z_c) & \frac{1}{3}(Z_a + Z_b + Z_c) & \frac{1}{3}(Z_a + a^2 Z_b + aZ_c) \\ \frac{1}{3}(Z_a + a^2 Z_b + aZ_c) & \frac{1}{3}(Z_a + aZ_b + a^2 Z_c) & \frac{1}{3}(Z_a + Z_b + Z_c) \end{bmatrix}$$

$$= Z012 \qquad (4\text{-}25)$$

وبشكل عام يمكن أن نكتب العلاقة (4-22) كمايلي :

$$\begin{bmatrix} V_{Aa0} \\ V_{Aa1} \\ V_{Aa2} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}}_{Z_{012}} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \qquad (4\text{-}25)$$

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 الثنائي 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 :

$$
\begin{aligned}
Z_{11} &= Z_{22} = \tfrac{1}{3}(Z_a + Z_b + Z_c) \\
Z_{00} &= \tfrac{1}{3}(Z_a + Z_b + Z_c) + 3Z_n \\
Z_{12} &= Z_{20} = Z_{01} = \tfrac{1}{3}(Z_a + a^2 Z_b + aZ_c) \\
Z_{10} &= Z_{21} = Z_{02} = \tfrac{1}{3}(Z_a + aZ_b + a^2 Z_c)
\end{aligned}
\qquad (4\text{-}26)
$$

– 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:

$$
Z_S = \begin{bmatrix} Z_L + 3Z_n & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_L \end{bmatrix} = Z012 \qquad (4\text{-}27)
$$

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 الصفرية (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 الصفرية والدارة الموافقة والدارة المعاكسة:

الدارة الصفرية الدارة المعاكسة الدارة الموافقة

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 ذا 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 10-4)

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 التأريض المختلفة.

3- حل الطلبين السابقين إذا كان المنبع متوازناً ونظام الممانعات متوازناً أيضاً.

الشكل (10-4) 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 :

$$\begin{aligned} V_a &= E_a - (Z_{aa}I_a + Z_{ab}I_b + Z_{ac}I_c) - Z_nI_n \\ V_b &= E_b - (Z_{bb}I_b + Z_{bc}I_c + Z_{ba}I_a) - Z_nI_n \\ V_c &= E_c - (Z_{cc}I_c + Z_{cb}I_b + Z_{ca}I_a) - Z_nI_n \end{aligned} \tag{4-29}$$

ومتريسيا

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \tag{4-30}$$

أو باختصار :

$$[V] = [E] - [Z][I] - [Z_n][I]$$

وفي نظام المركبات المتناظرة تصبح المعادلة المتريسية السابقة :

$$[V_S] = [E_S] - [Z_S][I] - [Z_{nS}][I] \tag{4-32}$$

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

$$Z_S = \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} = Z\,012$$

$$\begin{aligned}
Z_{00} &= \tfrac{1}{3}[(Z_{aa} + Z_{bb} + Z_{cc}) + 2(Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ac})] \\
Z_{11} &= \tfrac{1}{3}[(Z_{aa} + Z_{bb} + Z_{cc}) - 2(Z_{ab} + Z_{bc} + Z_{ac})] \\
Z_{22} &= Z_{11} \\
Z_{01} &= \tfrac{1}{3}[(Z_{aa} + a^2 Z_{bb} + aZ_{cc}) - (Z_{bc} + aZ_{ab} + a^2 Z_{ac})] \\
Z_{02} &= \tfrac{1}{3}[(Z_{aa} + aZ_{bb} + a^2 Z_{cc}) - (Z_{bc} + a^2 Z_{ab} + aZ_{ac})] \\
Z_{10} &= Z_{02} \\
Z_{12} &= \tfrac{1}{3}[(Z_{aa} + a^2 Z_{bb} + aZ_{cc}) + 2(Z_{bc} + aZ_{ab} + a^2 Z_{ac})] \\
Z_{20} &= Z_{01} \\
Z_{21} &= \tfrac{1}{3}[(Z_{aa} + aZ_{bb} + a^2 Z_{cc}) + 2(Z_{bc} + a^2 Z_{ab} + aZ_{ac})]
\end{aligned} \tag{4-33}$$

$$[Z_{ns}] = [S][Z_n][T] = \begin{bmatrix} 3Z_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4-34}$$

وعليه يمكن كتابة المعادلة (4-32) بالشكل

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{a0} \\ E_{a1} \\ E_{a2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{00} + 3Z_n & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \tag{4-35}$$

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:

$$V_n = 0 \qquad (4\text{-}36)$$

ب- في حالة التأريض بممانعة : impedance grounding

$$V_n = -3I_{a0} Z_n \qquad (4\text{-}37)$$

ج- في حالة نقطة الحياد المعزولة (لا تأريض) :

تكون $Z_n = \infty$ وبالتالي :

$$V_n = 0.\infty \quad \text{أي عدم تعيين} \qquad (4\text{-}38)$$

ويمكن تعيين توتر النقطة النجمية في هذه الحالة ؛فقط عندما نعتبر نظام القدرة كدارة مغلقة (توليد +نقل +استهلاك).

3- إذا كان نظام الممانعات متوازنا أي:

$$Z_{aa} = Z_{bb} = Z_{cc} \qquad (4\text{-}39)$$

$$Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ac}$$

فإن جميع الممانعات المتناظرة المتبادلة تنعدم. وتصبح المعادلة (4-35) بافتراض نظام التوليد متوازناً أيضاً :

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_{a1} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{00} + 3Z_n & 0 & 0 \\ 0 & Z_{11} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \qquad (4\text{-}40)$$

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 (4-11)الدارة الموجبة (الموافقة) **الشكل (4-12) الدارة الصفرية**

الشكل (4-13)الدارة السالبة (المعاكسة)

الدارات الصفرية 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 النتيجتين.

$$[V_S]=[E_S]-[Z_S^A][I_S]-[Z_{ns}^A][I_S] \qquad (4\text{-}41)$$

$$[V_S]=[Z_s^B][I_S]+[Z_{ns}^B][I_S] \qquad (4\text{-}42)$$

وبمساواة (4-41) و (4-42) نجد :

$$[E_S]=\underbrace{\left[[Z_S^A]+[Z_{ns}^A]+[Z_s^B]+[Z_{ns}^B]\right]}_{[Z_S]}[I_S] \qquad (4\text{-}43)$$

$[Z_S]$= مصفوفة الممانعات المتناظرة للنظام بأكمله، وعناصره:

$$Z_{00}=Z_{00}^A+3Z_n^A+Z_{00}^B+3Z_n^B$$

$$Z_{11}=Z_{11}^A+Z_{11}^B \qquad Z_{12}=Z_{12}^A+Z_{12}^B$$

$$Z_{22}=Z_{22}^A+Z_{22}^B \qquad Z_{20}=Z_{20}^A+Z_{20}^B$$

$$Z_{01}=Z_{01}^A+Z_{01}^B \qquad Z_{21}=Z_{21}^A+Z_{21}^B$$

$$Z_{02}=Z_{02}^A+Z_{02}^B$$

$$Z_{10}=Z_{10}^A+Z_{10}^B$$

2- نكتب المعادلة (4-43) بشكل منشور مع الأخذ بالاعتبار التوترات المتوازية للمولد:

$$E_{a1} = \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{20} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \tag{4-44}$$

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 :

$$\left.\begin{aligned} 0 &= -V_n^A + I_{a1}Z_{01} + I_{a2}Z_{02} \\ E_{a1} &= I_{a1}Z_{11} + I_{a2}Z_{12} \\ 0 &= I_{a1}Z_{21} + I_{a2}Z_{22} \end{aligned}\right\} \tag{4-46}$$

العلاقات (4-46) هي معادلات بثلاثة مجاهيل حلها يعطي :

$$\left.\begin{aligned} I_{a1} &= E_{a1}\frac{Z_{22}}{Z_{11}Z_{22} - Z_{12}Z_{21}} \\ I_{a2} &= -I_{a1}\frac{Z_{21}}{Z_{22}} \\ V_n^A &= E_{a1}\frac{Z_{01}Z_{22} - Z_{02}Z_{21}}{Z_{11}Z_{22} - Z_{12}Z_{21}} \end{aligned}\right\} \tag{4-47}$$

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 :

$I_a = 16.6 + j\,1.335\ A$

$I_b = -9.24 - j\,10.66\ A$

$I_c = -6.93 + J\,9.32\ A$

$V_N^B = 40.75\ V$

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 :

$$V_n^B = -E_{a1} \frac{Z_{01} Z_{22} - Z_{02} Z_{21}}{Z_{11} Z_{22} - Z_{12} Z_{21}}$$

$$Z_{11} = Z_{22} = \frac{1}{3}(10 + 15 + 20) = 15 \quad \text{ohm}$$

$$Z_{01} = Z_{12} = Z_{20} = \frac{1}{3}(10 + 15\angle 240^o + 20\angle 120^o)$$

$$= -2.5 + j4.33 = 2.887\angle 150^o$$

$$Z_{21} = Z_{02} = \frac{1}{3}(10 + 15\angle 120^o + 20\angle 240^o)$$

$$= -2.5 - j1.443 = 2.887\angle -150^o \quad \text{ohm}$$

$$V_n^A = -200\frac{43.305\angle 150^o - 8.335\angle 60^o}{225 - 8.335}$$

$$= -40.707\angle 160^o = 40.707\angle -20^o$$

$$I_{a1} = E_{a1}\frac{Z_{22}}{Z_{11}Z_{22} - Z_{12}Z_{21}}$$

$$= 200\frac{15}{216.665} = 13.846 \quad A$$

$$I_{a2} = -I_{a1}\frac{Z_{21}}{Z_{22}} = -13.846\frac{2.887\angle 150^o}{15}$$

$$= -2.665\angle -150^o = 2.665\angle 30^o$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 13.846 \\ 2.665\angle 30^o \end{bmatrix}$$

$$\ldots\ldots\ldots I_a = 16.154 + j1.3325 \quad A$$

$$I_b = -9.231 + j10.66 \quad A$$

$$I_c = -6.9 + j9.326 \quad A$$

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) (إذا كانت الدورة الأولى موضع الاهتمام) $Z_1 = jX''_d$

(4-49) (إذا كانت 4-3 دورات موضع الاهتمام) $= jX'_d$

(4-50) (إذا كانت الحالة الثابتة موضع الاهتمام) $= jX_d$

وهكذا فتُستخدم 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) بوجود ملفات أخماد $Z_2 = j\dfrac{X''_q + X''_d}{2}$

(4-52) بدون ملفات أخماد $= j\dfrac{X'_q + X'_d}{2}$

وتُستخدم Z_2 لجميع حالات التشغيل الثابتة والديناميكية.

المفاعلة الصفرية للآلة:

غالباً ما ترتبط المولدات بالشبكة عن طريق محولات توصيلتها 6 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 مهملاً لأن النقطة النجمية للمولدة تكون عادة مؤرضة بمقاومة عالية. وعلى أي حال فإذا لزمت المفاعلة الصفرية للمولدة فيمكن اعتبار القيم التالية لها:

$$Z_0 = j(0.01.....0.1) \quad \text{عنفية} \qquad (4\text{-}53)$$

$$= j(0.03.....0.15) \quad \text{مائية} \qquad (4\text{-}54)$$

ونلاحظ أنها أصغر من المفاعلة العابرة بسرعة (فوق العابرة) لأن التيار الصفري لا يولد أي فيض على اعتبار أن التيارات الصفرية I_{ao} ، I_{bo} ، I_{co} تشكل 120° فراغية بينها (مع أنها كهربائياً بذات الطور). وعليه فالمنوبة تبدي مفاعلة تشتت فقط للتيارات الصفرية.

ملاحظة:

إن نسبة التيار المعاكس I_2 إلى التيار الاسمي لها أهمية بالغة عندما تُحمل المنوبة بحمولة غير متوازنة، إذ أن التيار المعاكس يولّد 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 العنفية، وبأكثر من 20% في المولدات ذات الأقطاب البارزة.

4–7 الممانعات والدارات التتابعية للمحولات :

4–7–1 الممانعات الموافقة والمعاكسة:

الدارة المكافئة الموافقة لمحول هي الدارة المكافئة له عندما يطبق على دخله نظام توترات موافق.

الشكل (4-16)

نظام توترات موافق ونظام توترات معاكس

والدارة المكافئة المعاكسة للمحول هي الدارة 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 :

$$Z_1 = Z_2 = Z_{leakage} \qquad (4\text{-}55)$$

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 لتشكل حمولة قيمتها الاسمية (400 V : 100 KVA). تُغذى هذه الحمولة من محول قيمة الاسمية (100 KVA : 11/0.4 kV) Dy_3.

كما هو مبين في الشكل (4-17). تواترات الدخل في جهة المثلث غير متوازنة وقيمها :

$$V_{AB} = 10\ kV\ ;\ V_{BC} = 11\ kV\ ;\ V_{CA} = 11.5\ kV$$

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 :

$$V_{AB} = 0.909\angle -66.2^o \ \ pu$$

شكل

$$V_{BC} = 1.0\angle 180^o \ \ pu$$

$$V_{CA} = 1.045\angle 52.8^o \ \ pu$$

2– المركبات المتناظرة لتواترات الدخل والخرج البسيطة والمركبة:

بتطبيق قواعد التحويل نجد :

$$V_{AB1} = 0.424 - j0.884 = 0.982\angle -64.45^o$$
$$V_{AB2} = -0.0567 + j0.0551 = 0.079\angle 135.8^o$$
$$V_{ABo} = 0 \ \ up$$

ومن الشكل (4-18) نجد :

الشكل (4-18) النظام الموافق (مخطط شعاعي نسبي)

$$V_{A1} = V_{AB1} / \sqrt{3} \angle -30^o = (0.982/\sqrt{3})/ -94.45^o \ \ pu$$

$$V_{a1} = V_{A1} \angle -90^o = (0.982/\sqrt{3})/ -184.45^o \ \ pu$$

$$V_{ab1} = V_{AB1} \angle -90^o = 0.982\angle -154.8^o \ \ pu$$

وذلك لأن الدارة المكافئة الموافقة هي بالقيم الواحدية (الشكل 4-19) :

الشكل (4-19) الدارة المكافئة الموافقة للمثال (4-4).

ومن الشكل (4-20) نجد :

الشكل (20-4) النظام المعاكس (مخطط شعاعي نسبي).

$$V_{A2} = \frac{V_{AB2}}{\sqrt{3}} \angle 30^o = \frac{0.079}{\sqrt{3}} \angle 165.8^o \qquad pu$$

$$V_{a2} = V_{A2} \angle 90^o = \frac{0.079}{\sqrt{3}} \angle 255.8^o \qquad pu$$

$$V_{ab2} = V_{AB2} \angle 90^o = 0.079 \angle 225.8^o \qquad pu$$

$$V_{ab0} = 0$$

3– تواترات الخرج الطبيعية :

من علاقات التحويل نجد :

$$V_{ab} = V_{ab1} + V_{ab2} = 1.056 \angle -153^o \qquad pu$$

$$V_{bc} = a^2 V_{ab1} + a V_{ab2} = 0.972 \angle 81^o \qquad pu$$

$$V_{ca} = a V_{ab1} + a^2 V_{ab2} = 0.923 \angle -31.31^o \qquad pu$$

4– التيارات :

الممانعة الموافقة للحمولة تساوي الممانعة المعاكسة وتساوي :

$$\frac{1}{3}(1+1+1) = 1 \qquad pu$$

ومن الشكل (419) نجد :

$$I_{a1} = \frac{V_{a1}}{1 \angle 0^o} = \frac{0.982}{\sqrt{3}} \angle -184.45^o \qquad pu$$

$$I_{a2} = \frac{V_{a2}}{1\angle 0^o} = \frac{0.079}{\sqrt{3}}\angle 255.8^o \quad pu$$

(نقاط النجم معزولة) $\underline{I}_{a0} = 0$

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} = \frac{0.998}{\sqrt{3}}\angle -179.97^o \quad pu$$

$$I_{A1} = I_{a1}\angle 90^o \quad pu$$

$$I_{A2} = I_{a2}\angle -90^o \quad pu$$

$$I_{A0} = 0$$

5– تيارات المثلث :

من المخططات الشعاعية :

$$I_{AB1} = \frac{I_{A1}}{\sqrt{3}}\angle -150^o$$

$$I_{AB2} = \frac{\underline{I}_{A2}}{\sqrt{3}}\angle 150^o$$

3–7–4 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 لمحول ثنائي الملفات حيث $Z_{ps}(pu)$ هي الممانعة التسلسلية الموجبة للطور للملفين الأولي والثانوي، $Z_{oln}(pu)$ هي الممانعة الصفرية التفرعية التي تجرى عبرها تيارات ضياعات النواة والتمغط وتعتمد قيمة Z_{om} على بناء النواة:

لأجل النواة خماسية الجذوع أو المحول المؤلف من وحدات آحادية الطور تكون $Z_{om} = \infty$ (كبيرة جداً) كما هو الحال بالنسبة لـ Z_m.

أما للنواة ثلاثية الجذوع فتكون : $Z_{om} = 4...5\ \underline{Z}_{ps}$

وتحتوي الدارة المكافئة على أربعة قواطع: قاطع تسلسلي وقاطع تفرعي لكل جهة من المحول.

القاطع التسلسلي المغلق يعني أن نقطة النجم مؤرضة والقاطع التفرعي المغلق يعني أن الملفات موصلة على شكل دلتا Δ.

الشكل (4-21)

الدارة المكافئة الصفرية العامة لمحول 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 (الشكل22-4).

نجمة مؤرضة نجمة غير مؤرضة

الشكل (22-4) جريان التيارات الصفرية في توصيلة نجمية.

Damascus University

3- لا يمكن أن تجرى تيارات صفرية في الخطوط الواصلة إلى توصيلة مثلثية لأنه لا يوجد مسار عودة لهذه التيارات . أما في أضلاع المثلث فيمكن أن تجرى تيارات صفرية (تدور في المثلث) متولدة من التوترات الصفرية في التوصيلة المثلثية. وعليه فمثل هذه التوصيلة تشكل دارة قصيرة للتيار الصفري (الشكل 23-4):

الشكل (23-4) جريان التيارات الصفرية 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 $3I_{ao}$.

ونلخص فيمايلي الدارات المكافئة لبعض مجموعات التوصيل (الشكل 24-4):

الشكل (4-24) الدارات الصفرية لمحولات ثنائية الملفات بالقيم الواحدية.

Damascus University

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):

Damascus University

الشكل (4-25)

*** مثال (4-5) :**

في الشبكة السورية يستخدم المحول ثلاثي الطور ثلاثي الملفات ذو المواصفات التالية:

$$230 \ / \ 66 \ / \ 15 \ \ kV$$
$$p \ / \ s \ / \ t$$
$$70 \ / \ 70 \ / \ 20 \ \ MVA$$

قيست ممانعاته المتشابكة 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 المتشابكة معطية بالوحدة منسوبة للاستطاعة 70 MVA ذاتها فيمكن تطبيق المعادلات مباشرة:

$$Z_p = 0.5 \times j(13 + 19.6 - 4.9) \times \frac{1}{100}$$
$$= \ j0.1385 \ \ pu.....X_p = 13.85\%$$

$$Z_s = 0.5 \times j(13 + 4.9 - 19.6) \times \frac{1}{100}$$
$$= -j0.0085 \ pu.....X_s = -0.85\%$$
$$Z_t = 0.5 \times j(19.6 + 4.9 - 13) \times \frac{1}{100}$$
$$= j0.057 \ pu.....X_t = 5.7\%$$

2- الدارة الصفرية مبينة في الشكل (4-26) :

الشكل (4-26) الدارة الصفرية للمثال (4-5) .

$$Z_{om} = 4...5 \ Z_{ps} \quad or \quad Z_{pt}$$
$$= j4.13\% = j52\%$$

إذا كان المحول خماسي النواة أو مؤلفاً من 3 وحدات أحادية الطور: $Z_{om} = \infty$

4-8 الممانعات التتابعية (المتناظرة) لخطوط النقل :

نظراً لكون الخط ثلاثي الطور المبدل transposed بشكل كامل متناظراً فإن الممانعة الطورية التي يبديها غير متعلقة بتتابع الأطوار لنظام تيارات متوازن. وبعبارة

أخرى، تكون الممانعات التي يبديها خط النقل لتيارات التتابع الموجب أو السالب متساوية، أي : $Z_1 = Z_2$.

عندما تسري تيارات صفرية فقط في خط النقل، تكون هذه متساوية في الأطوار الثلاثة قيمةً وزاوية طور. يعود جزء من هذه التيارات عبر الأرض، والجزء المتبقي يعود عبر النواقل الأرضية. إن جريان التيارات الصفرية 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). وتجدر الإشارة إلى أن الممانعة التتابعية الصفرية تتضمن ممانعة الأرض ($Z_o = Z_{10} + 3Z_{g0}$). وعادة تكون الممانعة الصفرية 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 (قضيب 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 دارة التتابع الصفري بوصل الدارات الصفرية لعناصر النظام مع بعضها البعض.

-لا توجد منابع توتر في دارة التتابع الصفري.

-في حال وجود ممانعة مربوطة إلى حيادي المولد أو المحول، تدخل هذه بثلاثة أضعاف قيمتها في دارة التتابع الصفري للنظام.

-يجب الانتباه بعناية إلى دارة 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 :

$$11\ KV\ ;25\,MVA\ ;\ X_0 = 6\%\ ;\ X'' = 20\%\ ;\ X_n = 2.5\,\Omega$$

يُغذي محركين عبر خط نقل ومحولات كما هو مبين في الشكل (4-27) القيم الاسمية لدخل المحركات:

$$M_1 : 15\ MVA\,;\ 10\ kV\,;\ X_0 = 6\%\,;\ X'' = 25\%\ ;$$

$$M_2 : 7.5\ MVA\,;\ 10\ kV\,;\ X_0 = 6\%\,;\ X'' = 25\%\ ;\ X_n = 2.5\,ohm$$

القيم الاسمية لكل محول :

$$30\ MVA\ ;\ 10.8\ /121\ kV\ ;\ X = 10\%$$

القيم العائدة لخط النقل :

مفاعلة التسلسل $X = 100\ ohm$

$X_0 = 300\ ohm$

افرض أن المفاعلة المعاكسة للآلات (مولد+محرك) تساوي مفاعلتها العابرة بسرعة.

اهمل المقاومات. اختر القيم الاسمية للمولد كقيم أساس في دارة المولد.

المطلوب:

احسب وارسم الدارات الموجبة والسالبة والصفرية للنظام بالقيم الواحدية.

الشكل (4-27) النظام للمقال (4-6) .

*** الحل :**

نختار استطاعة أساس $25\ MVA$

توتر أساس في دارة المولد $11\ KV$

توتر الأساس لخط النقل : $11.\frac{121}{10.8} = 123.2\ KV$

توتر الأساس لدارة المحركات : $123.2\frac{10.8}{121} = 11\ kV$

نحسب محددات عناصر النظام وفق الأسس الجديدة:

- المفاعلات الموافقة والمعاكسة:

المحول $\text{Transformer reactance} = 0.1 \times \frac{25}{30} \times \left(\frac{10.8}{11}\right)^2 = 0.0805 \text{ pu}$

خط النقل $\text{Line reactance} = \frac{100 \times 25}{(123.2)^2} = 0.164 \text{ pu}$

المحرك 1 $\text{Reactance of motor 1} = 0.25 \times \frac{25}{15} \times \left(\frac{10}{11}\right)^2 = 0.345 \text{ pu}$

المحرك 2 $\text{Reactance of motor 2} = 0.25 \times \frac{25}{7.5} \times \left(\frac{10}{11}\right)^2 = 0.69 \text{ pu}$

-المفاعلات الصفرية :

المحول Transformer zero sequence reactance= 0.0805 pu

المولد Generator zero sequence reactances = 0.06 pu

المحرك 1 $\text{Zero sequence reactance of motor 1} = 0.06 \times \frac{25}{15} \times \left(\frac{10}{11}\right)^2 = 0.082 \text{ pu}$

المحرك2 $\text{Zero sequence reactance of motor 2} = 0.06 \times \frac{25}{7.5} \times \left(\frac{10}{11}\right)^2 = 0.164 \text{ pu}$

مفاعلة التأريض $\text{Reactance of current limiting reactors} = \frac{2.5 \times 25}{(11)^2} = 0.516 \text{ pu}$

ثلاثة أضعاف مفاعله التأريض $= 3 \times 0.516 = 1.548 \text{ pu}$

خط النقل $\text{Zero sequence reactance of transmission line} = \frac{300 \times 25}{(123.2)^2} = 0.494 \text{ pu}$

وتبين الأشكال التالية الدارات التتابعية المطلوبة:

الشكل (4-28) الدارة الموجبة للمثال (4-6)

الشكل (4-29) الدارة السالبة للمثال (4-6)

Damascus University

الشكل (4-30) الدارة الصفرية للمثال (4-6)

4–10 تطبيقات باستخدام الحاسوب :

تطبيق 1 :

احسب المركبات المتناظرة لنظام تيارات غير متوازن :

$$I_{abc} = \begin{bmatrix} 10\angle 30^o \\ 15\angle -60^o \\ 18\angle 154^o \end{bmatrix}$$

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 I012 بالعلاقة : $I012r=A^{-1}\ Iabcr$
- حساب I012p (شكل قطبي)

وفيمايلي البرنامج والنتائج كما يبين الشكل (4-31)

الشكل (4-31)برنامج ونتائج التطبيق 1

تطبيق 2:

المركبات المتناظرة لنظام تيارات غير متوازن:

$$I120 = \begin{bmatrix} 3\angle -30^{o} \\ 5\angle 90^{o} \\ 4\angle 30^{o} \end{bmatrix}$$

احسب تيارات الأطوار باستخدام الحاسوب .

الحل :

خطوات البرنامج:

- إدخال المعطيات (شعاع المركبات المتناظرة القطبي)
- إدخال علاقات a و A
- حساب I120r بالشكل المتعامد
- حساب Iabcr من العلاقة : Iabcr = A I120r
- حساب Iabcp (الشكل القطبي)

يبين الشكل (4-32) برنامج MATLAB ونتائج الحل الحاسوبي.

Damascus University

الشكل (4-32) برنامج ونتائج التطبيق 2

تطبيق 3 :

نظام تواترات متوازن ثلاثي الطور $(V_a = 100\ V)$ يغذي حمولة نجمية غير مؤرضة ممانعتها التسلسلية $Zs = j12\Omega$ بالطور والممانعة المتبادلة بين الأطوار $Z_m = j4\Omega$. احسب تيارات الحمولة العقدية باستخدام المركبات المتناظرة والبيئة البرامجية MATLAB .

الحل :

حسب المعادلة (4-33) وباعتبار خصوصيات الشبكة المعطاة نكتب :

$$Z012 = \begin{bmatrix} Z_s + 2Z_m & 0 & 0 \\ 0 & Z_s - Z_m & 0 \\ 0 & 0 & Z_s - Z_m \end{bmatrix}$$

$$I012 = [Z012]^{-1} * V012$$

الخوارزمية :

- إدخال المعطيات : V_a, Z_m, Z_s
- حساب Z012 بواسطة العلاقة المذكورة أعلاه
- إدخال a و A
- حساب I012
- حساب Iabc بالشكل المتعامد

ثم بالشكل القطبي

ويبين الشكل (33-4) البرنامج والنتائج.

الشكل (33-4) برنامج MATLAB ونتائج الحل للتطبيق 3

تطبيق 4:

منبع توتر ثلاثي الطور غير متوازن نقطته النجمية مؤرضة مباشرة وتوتراته الطورية (طور- حيادي) هي :

$$Vabc = \begin{bmatrix} 300\angle -120^{o} \\ 200\angle 90^{o} \\ 100\angle -30^{o} \end{bmatrix}$$

يغذي هذا المنبع حمولة نجمية مؤرضة مباشرة ممانعاتها:

التسلسلية $Z_s = 10 + j40$

المتبادلة $Z_m = j5$

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 مباشرةً .

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)

Damascus University

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 المتوازية 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 الريليهات Relayes، 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.

5–2 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 خارجةً 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 لاحمل 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 (2-5)، 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 (3-5) شبكات ثفنين العائدة للشبكات التتابعية.

الشكل (5-3)شبكات ثفنين للشبكات التتابعية مرئية من نقطة العطل F **الشكل (5-2) الشبكات التتابعية مرئية من نقطة العطل F**

يتعين ملاحظة أن E_a موجود فقط في شبكة التتابع الموجب، وأن الشبكات التتابعية مستقلة عن بعضها البعض وعلية يمكن كتابة توترات F التتابعية بدلالة التيارات التتابعية وممانعات ثفنين التتابعية :

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \qquad (5\text{-}1)$$

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 وتيارات وتوترات العطل.

5–3 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 نعتمد 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:

$$I_b = 0 \qquad (5\text{-}2)$$
$$I_c = 0 \qquad (5\text{-}3)$$
$$V_a = Z_f\, I_a \qquad (5\text{-}4)$$

المركبات المتناظرة لتيارات العطل هي :

$$\begin{bmatrix} I_{ao} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

ومنه:

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = I_a / 3 \qquad (5\text{-}5)$$

نكتب المعادلة (5-4) بدلالة المركبات المتناظرة:

$$V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = Z_f I_a = 3Z_f I_{a1} \qquad (5\text{-}6)$$

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 :

$$I_{a1} = \frac{E_a}{(Z_0 + Z_1 + Z_2) + 3Z_f} \qquad (5\text{-}7)$$

وعليه فتيار العطل I_a :

$$I_a = 3I_{a1} = \frac{3E_a}{(Z_0 + Z_1 + Z_2) + 3Z_f} \qquad (5\text{-}8)$$

ويمكن التوصل للعلاقات السابقة ذاتها من المعادلات (5-5) و (5-6) و (5-1).

توتر الطور b بالنسبة للأرض أثناء العطل هو:

$$V_b = V_{a0} + a^2 V_{a1} + aV_{a2}$$
$$= \left(-Z_0 \frac{I_a}{3}\right) + a^2\left(E_a - Z_1 \frac{I_a}{3}\right) + a\left(-Z_2 \frac{I_a}{3}\right)$$

نعوّض عن I_a من المعادلة (5-8) ونعيد ترتيب الحدود فينتج:

$$V_b = E_a \frac{Z_0(a^2 - 1) + 3a^2 Z_f + Z_2(a^2 - a)}{(Z_0 + Z_1 + Z_2) + 3Z_f} \qquad (5\text{-}9)$$

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 نمثل 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 الصفرية 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.

5–4 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 :

$$I_p = \begin{bmatrix} I_a = 0 \\ I_a \\ I_c = -I_b \end{bmatrix} \quad ; \quad V_b - V_c = I_b Z_f \qquad (5\text{-}10)$$

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 :

$$I_{a1} = -I_{a2} \qquad (5\text{-}11)$$

$$I_{a0} = 0 \qquad (5\text{-}12)$$

المركبات المتناظرة للتواترات في F أثناء العطل :

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_b - Z_f I_b \end{bmatrix} \qquad (5\text{-}13)$$

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) :

$$3(V_{a1} - V_{a2}) = (a - a^2)Z_f I_b = j\sqrt{3}Z_f I_b \qquad (5\text{-}14)$$

ومن علاقات التحويل نحصل على :

$$I_b = (a^2 - a)Ia_1 = -j\sqrt{3}I_{a1} \qquad (5\text{-}15)$$

من المعادلتين (5-14) و (5-15) نجد :

$$V_{a1} - V_{a2} = Z_f I_{a1} \qquad (5\text{-}16)$$

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:دارة ثفنين

من دارة ثفنين (الشكل 5-8b) نجد :

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \qquad (5\text{-}17)$$

ومن المعادلة (5-15) نجد :

$$I_b = -I_c = \frac{-j\sqrt{3}E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \qquad (5\text{-}18)$$

إذا حسبنا I_{a1} نستطيع بعدئذٍ حساب V_{a1} و V_{a2} (بمساعدة دارة ثفنين) ومنه حساب التوترات في نقطة العطل.

إذا حصل العطل على منظومة قدرة تعمل وهي محملة، فنستخدم نفس دارة ثفنين مع تعديل في جزء شبكة التتابع الموجب وفق القواعد التي توصلنا إليها في الفقرة: 5–3–2 .

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 :

$$I_a = 0 \Rightarrow I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0 \qquad (5\text{-}19)$$

$$V_b = V_c = Z_f\,(I_b + I_c) = 3Z_f\,I_{a0} \qquad (5\text{-}20)$$

وحسب علاقات التحويل نجد :

$$V_{a0} = \frac{1}{3}(V_a + 2V_b)$$

$$V_{a1} = V_{a2} = \frac{1}{3}\left[V_a + (a + a^2)V_b\right]$$

بطرح العلاقتين السابقتين واعتبار المعادلة (5-20) نجد :

$$V_{a0} = V_{a1} + 3Z_f\,I_{a0} \qquad (5\text{-}21)$$

من المعادلات أعلاه نرسم دارة المركبات المتناظرة للعطل كما هو مبين في الشكل (5-10).

الشكل (5-10) دارة المركبات المتناظرة المكافئة للعطل بين طورين والأرض

(a) بدلالة شبكات التتابع ، (b) بدلالة شبكات ثفنين

من الشكل (5-10b) نجد :

$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 //(Z_0 + 3Z_f)}$$

(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 5-3-2 .

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 :

$X_1=X_2>>X_0$

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 التتابع الموجب فقط (كما ذكرنا في فقرة سابقة).

الشكل (5-12) شبكات التتابع لمولد تزامني في مؤرض عبر ممانعة.

b) الدارة المكافئة للعطل LG

باعتبار $Z_f=0$

مبينة في الشكل 5-13،

وعلى أساسها نكتب:

$$|I_a|_{LG} = \frac{3|E_a|}{2X_1 + X_0 + 3X_n} \qquad \text{(i)}$$

الشكل (5-13) عطل LG

c) قيمة تيار العطل المتوازن في حالة التأريض المباشر (انظر الشكل 5-14) هي:

$$|I_a|_{3L} = \frac{|E_a|}{X_1} \qquad \text{(ii)}$$

الشكل (5-14)

عطل متوازن.

وقيمة تيار العطل LG في حالة التأريض المباشر هي :

$$|I_a|_{3L} = \frac{3|E_a|}{2X_1 + X_0} \qquad \text{(iii)}$$

بتقسيم (iii) على (ii) نجد

$$\frac{\text{تيار العطل LG}}{\text{تيار العطل 3L}} = \frac{3X_1}{2X_1 + X_0} \approx \frac{3}{2}$$

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 أقسى 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 أقسى من العطل الوحيد الطور نظراً لأن X_0 لخط النقل أكبر بكثير من X_1 أو X_2 له ($X_0 >> X_1 = X_2$ لخط نقل).

d) لكي يصبح تيار العطل الأحادي LG أصغر(قيمةً) 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)

مواصفاتهما:

توصيلة نجمية – 11kV و 20MVA و $Z_0 = j\ 1pu$

$Z_1 = j\ 0.18\ pu$ و $Z_2 = j\ 0.15$

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

$$I_{Rn} = I_f = 2.827 - j0.756$$

$$|I_{Rn}| = 2.926\times\frac{20}{\sqrt{3}\times 11} = 3.07 \quad kA$$

(c

$$V_{Rn} = 2\times\frac{20}{(11)^2}(2.87 - j0.756)$$

$$= 0.932 - j0.249 \text{ pu}$$

$$= 0.965\times\frac{11}{\sqrt{3}} = 6.13 \qquad kV$$

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 التتابع الموجب في حالة اعتبار تيار الحمل قبل العطل.

الحل:

توصّل الشبكات التتابعية 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:

توتر g قبل العطل = $E''_g = E''_{m1} = E''_{m2} = V_f^o$

$$= \frac{10}{11} = 0.909 \quad pu$$

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)

$$Z_1 = \frac{j0.525 \times j0.23}{j0.755} = j0.16 \quad pu$$

$$Z_2 = Z_1 = j0.16 \quad pu$$

$$I_{a1} = \frac{V_f^o}{Z_1 + Z_2 + Z_0} = \frac{0.909}{j2.032} = -j0.447 \quad pu$$

$$I_{a2} = I_{a0} = I_{a1} = -j0.447 \quad pu$$

تيار العطل

$$= 3I_{a0} = 3 \times (-j0.447) = -j1.341 \quad pu$$

وباستخدام قاعدة مجزئ التيار نحسب الجزء من I_{a1} أو من I_{a2} القادم من جهة المولد إلى نقطة العطل g:

$$-j0.447 \times \frac{j0.23}{j0.755} = -j0.136 \quad pu$$

والجزء الآخر القادم من جهة المحركات:

$$-j0.447 \times \frac{j0.525}{j0.755} = -j0.311 \quad pu$$

أما I_{a0} فيسهم به المحرك الثاني لوحده.

تيارات العطل القادمة من المولد نحو g (على يمين T_1) هي:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -j0.136 \\ -j0.136 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j0.272 \\ j0.136 \\ j0.136 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j0.272 \\ j0.136 \\ j0.136 \end{bmatrix} \quad pu$$

وتيارات العطل القادمة من المحركات نحو g:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j1.069 \\ -j0.136 \\ -j0.136 \end{bmatrix} \quad pu$$

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 :

$$I_{A1} = +j(-j0.136) = 0.136 \quad pu$$

$$I_{A2} = -0.136$$

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0.136 \\ -0.136 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.136 \\ 0.136 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -j0.236 \\ j0.236 \end{bmatrix} \quad pu$$

خط النقل

التيارات في دارة المولد :

المركبات المتناظرة هنا هي ذاتها كما في دارة g وعليه تسري في أطوار المولد التيارات:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j0.272 \\ j0.136 \\ j0.136 \end{bmatrix} \quad pu$$

مولد

b) لأجل حالة التحميل قبل العطل ينبغي حساب التوترات خلف المفاعلات فوق العابرة. تيار الحمل بالوحدة للمحرك M_1 هو:

$$\frac{15}{25\times 0.909\times 0.8}\angle 36.86^{o} = 0.825\angle 36.86^{o} = 0.66 + j0.495 \quad pu$$

وللمحرك M_2 هو (على نحو مشابه):

$$0.4125\angle 36.86^{o} = 0.33 + j0.248 \quad pu$$

التيار الكلي الذي يستجره المحركان معاً هو:

$$0.99 + j\,0.743 \quad pu$$

$$E''_{m1} = 0.909 - j0.345\times 0.825\angle 36.86^{o}$$

$$E''_{m2} = E''_{m1}$$

$$E''_{g} = 0.909 + j0.525\times 1.2375\angle 36.86^{o}$$

$$= 0.52 + j0.52 = 0.735\angle 45^{o} \quad pu$$

شبكة ثفنين الموجبة هنا تبقى على حالها إذ تحوي المنبع V_f^o 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:

$$-\,0.99 - j\,0.743 - j0.311 = -\,0.99 - j\,1.054 \quad pu$$

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. أفرض $Z_f = 0$.

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:

$$I_{a1} = \frac{1 + j0}{j0.09 + \dfrac{j0.075 \times j0.1}{j0.075 + j0.1}} = -j7.53$$

$$V_{a1} = V_{a2} = V_{a0} = E_a - I_{a1}Z_{1eq} = 0.323$$

$$I_{a2} = -\frac{V_{a2}}{Z_{2eq}} = j4.306$$

$$I_{a0} = -\frac{V_{a0}}{Z_{0eq}} = j3.23$$

وحسب قواعد التحويل نجد:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 11.334\angle 154.74^o \\ 11.334\angle 25.28^o \end{bmatrix}$$

وتوتر الطور السليم :

$$V_a = 3V_{a1} = 3\times 0.323 = 0.969$$

6–5 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 قضيبي التجميع m و n. 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 ثفنين الموجبة والسالبة والصفرية على الترتيب.

وتكون شبكة ثفنين للتتابع الموجب كما هو مبين في الشكل (5-20).

ونظراً لتعقد الرموز نستخدم إشارة +، − ، 0 في أعلى الحرف للدلالة على المركبات الموجبة والسالبة والصفرية 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 ثفنين الموجبة لكامل منظومة القدرة مرئية من m و n مع وجود Z_1 (الممانعة الموجبة للخط mn).

وأيضاً $0 \le K \le 1$.

الشكل (5-20) شبكة ثفنين الموجبة للنظام.

ممانعة ثفنين الموجبة مرئية من F'F :

$$Z^{+}_{FF'} = KZ_1 + \frac{(-Z_1)(Z^{+}_{Th,mn})}{Z^{+}_{Th,mn} - Z_1} + (1-K)Z_1 = \frac{-Z_1^2}{Z^{+}_{Th,mn} - Z_1} \qquad (5\text{-}23)$$

$$V^{+}_{aa'} = \frac{V_m - V_n}{Z^{+}_{Th,mn} - Z_1}(-Z_1) = \frac{Z^{+}_{FF'}}{Z_1}(V_m - V_n) \qquad (5\text{-}24)$$

التيار I_{mn} في الطور a قبل أن يحصل العطل هو نفسه المركبة الموجبة لهذا التيار:

$$I_{mn} = \frac{V_m - V_n}{Z_1} \qquad (5\text{-}25)$$

بتعويض (5-25) في (5-24) نجد :

$$V^{+}_{aa'} = Z^{+}_{FF'}, I_{mn} \qquad (5\text{-}26)$$

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:

$$Z^{-}_{FF'} = \frac{-Z_2^2}{Z^{-}_{Th,mn} - Z_2} \qquad (5\text{-}27)$$

$$Z^{0}_{FF'} = \frac{-Z_0^2}{Z^{0}_{Th,mn} - Z_0} \qquad (5\text{-}28)$$

ونرسم الدارات المكافئة للنظام الصفري والسالب (الشكل 5-22)

الشكل (5-22) الدارات المكافئة السالبة والصفرية

والآن ندرس حالتي العطل: انقطاع ناقل ثم انقطاع ناقلين.

5–6–1 عطل انقطاع الطور a:

الشروط الحدية لهذا العطل هي:

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0 \qquad (5\text{-}29)$$

حيث I_{a0} ، I_{a1}، I_{a2} هي المركبات المتناظرة للتيارات I_a، I_b، I_c التي تسري من F إلى 'F.

$$V_{bb'} = V_{cc'} = 0 \qquad (5\text{-}30)$$

$$\begin{bmatrix} V^0_{aa'} \\ V^+_{aa'} \\ V^-_{aa'} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_{aa'} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (5\text{-}31)$$

ومنه:

$$V^0_{aa'} = V^+_{aa'} = V^-_{aa'} = \frac{V_{aa'}}{3} \qquad (5\text{-}32)$$

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 ثفنين المتناظرة على التفرع (الشكل 5-23).

الشكل (5-23) الدارة المكافئة لعطل انقطاع الطور a.

$$I_{a1} = \frac{I_{mm}.Z^{+}_{FF'}}{Z_{eq}} \qquad (5\text{-}34)$$

حيث :

$$Z_{eq} = Z^{+}_{FF'} + (Z^{-}_{FF'} // Z^{0}_{FF'}) \qquad (5\text{-}35)$$

$$V^{+}_{aa'} = V^{-}_{aa'} = V^{0}_{aa'} = I_{a1}(Z^{-}_{FF'} // Z^{0}_{FF'}) \qquad (5\text{-}35)$$

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 ، $20\Delta/345$ 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:

$$X_1 = X_2 = \frac{20}{100} \times \frac{(20)^2}{100} \times \frac{100}{(345)^2} \times \frac{(345)^2}{(20)^2} = 0.2 \quad pu$$

$$X_0 = 0.4 \quad pu$$

$$X_n = 0.5 \quad pu$$

مفاعلات المحرك تساوي تلك للمولد . نختار $V_3 = 1\angle 0^o \, pu$ قبل حصول العطل.

التيار I_{23} قبل حصول العطل يحسب كما يلي:

$$S_3 = V_3 I_{23}^* \Rightarrow I_{23} = \frac{S_3^*}{V_3^*} \quad \text{المحقونة}$$

$$I_{23} = \frac{\frac{50}{100} \times (0.8 - j0.6)}{1\angle 0^o} = 0.4 - j0.3 \quad pu$$

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).

$$Z^{+}_{Th,23} = \frac{(j0.15)(j0.56)}{(j0.15 + j0.56)} = j0.1183$$

$$Z^{+}_{FF'} = Z^{-}_{FF'} = \frac{-Z_1^2}{Z_{Th} - Z_1} = \frac{-(j0.15)^2}{j0.1183 - j0.15} = +j0.712 \quad pu$$

$$Z^{0}_{FF'} = \frac{-(j0.5)^2}{j0.5 - j0.5} = \infty$$

عطل انقطاع الطور a:

$$V^{+}_{aa'} = V^{-}_{aa'} = V^{0}_{aa'} = I_{23} \frac{Z^{+}_{FF'}}{Z_{eq} = Z^{+}_{FF'} + Z^{-}_{FF'}}$$

$$V^{+}_{aa'} = (0.4 - j0.3)\frac{(j0.712)^2}{2 \times j0.712} = 0.1068 + j0.1424 \quad pu$$

نوجد الآن ΔV_3 (شكل 5-26):

شكل (5-26).

$$\Delta V_3^+ = \Delta V_3^- = \frac{V_{aa'}^+}{\sum Z^+} \times -j(0.08+0.2)$$

$$= -j0.28\frac{0.1068 + j0.1424}{j0.311} = 0.042 - j0.056$$

$$\Delta V_3^0 = -V_{aa'}^0 = -0.1068 - j0.1424$$

$$\Delta V_3 = \Delta V_3^0 + \Delta V_3^+ + \Delta V_3^- = -0.191 - j0.255$$

$$V_3' = 1 + \Delta V3 = 0.809 - j0.255$$

$$= 0.848\angle -17.5^o \quad pu$$

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 :

$$V_{aa'} = V_{aa'}^0 + V_{aa'}^+ + V_{aa'}^- = 0 \qquad (5\text{-}35)$$

$$I_b = 0 \quad ; \quad I_c = 0 \qquad (5\text{-}36)$$

من (5-36) نجد

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = I_a / 3 \qquad (5\text{-}36)$$

وهذا يعني أنه يجب توصيل شبكات ثفنين للمركبات المتناظرة على التسلسل (الشكل 5-27).

الشكل (5-27) الدارة المكافئة لعطل انقطاع طورين.

معادلات عطل انقطاع طورين هي:

$$\left.\begin{aligned}
V_{aa'}^{+} &= I_{mn} Z_{FF'}^{+} - Z_{FF'}^{+} \frac{I_{mn} Z_{FF'}^{+}}{\sum\limits_{+,-,0} Z_{FF'}} \\
&= I_{mn} \frac{Z_{FF'}^{+} (Z_{Ff'}^{-} + Z_{FF'}^{0})}{\sum Z_{FF'}} \\
V_{aa'}^{-} &= -I_{a1} Z_{FF'}^{-} = I_{mn} \frac{-Z_{FF'}^{+} Z_{FF'}^{-}}{\sum Z_{FF'}} \\
V_{aa'}^{0} &= -I_{a1} Z_{FF'}^{0} = I_{mn} \frac{-Z_{FF'}^{+} Z_{FF'}^{0}}{\sum Z_{FF'}}
\end{aligned}\right\} \qquad (5\text{-}38)$$

مثال (5-7):

أعد حل المثال (5-6) إذا حصل عطل انقطاع الطورين b و c على خط النقل 3-2.

الحل:

باعتبار أن الدارة المكافئة للعطل تسلسلية وأن $Z^0_{FF'} = \infty$ 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 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).

Damascus University

الشكل (5-28) برنامج التطبيق 1

Damascus University

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الشكل (29-5) نتائج الحل الحاسوبي للتطبيق 1

Damascus University

الشكل (5-30) برنامج التطبيق 2

Damascus University

الشكل (5-31) نتائج الحل الحاسوبي للتطبيق 2

Damascus University

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الشكل (5-32) برنامج التطبيق 3

Damascus University

الشكل (5-33) نتائج الحل الحاسوبي للتطبيق 3

Damascus University

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

الفصل السادس

نظم التأريض

Earthing Systems

6–1 مقدمة:

التأريض هو ربط التجهيزات مع الأرض بواسطة ناقل ذي مقاومة مهملة وهذا يجعل كمون هياكل التجهيزات مساوياً للصفر، وهذا يتطلب لحظ بئر أرض ي 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 وتشغيلاً لدارات الحواكم (ويقصد بهذا أن يكون تيار العطل الأرضي أكبر من الحد الأدنى لعيار تيار الحاكمة Lowest current relay setting) .

2– أن يكون قادراً على تحمل وتبديد تيارات العطل والتيارات العابرة .

3– أن تكون مكوناته المطمورة في الأرض مقاومة للتآكل في التربة .

4– أن يكون ذا خواص ميكانيكية مناسبة (كأن يكون الوتد الأرضي مثلاً مصمماً بحيث يسهل دقه ودخوله في التربة) .

وتتعلق مقاومة التأريض بشكل رئيسي بنوع قطب التأريض (أي القسم المطمور في التربة من نظام التأريض) ونوعية التربة.

نميز نوعين رئيسيين للتأريض في نظام قدرة كهربائية:

6–2 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، وتأثيرٌ كبيرٌ 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 الحيادية 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 حياد معزولة فهي:

4- من الممكن استمرار التغذية رغم وجود عطل أرضي وحيد الطور .

5- تقليل التداخل مع خطوط الاتصالات بسبب غياب التيارات الصفرية .

تعاريف:

آ- الأرضي المفضل أو (كمون الأرض المرجعي) :

وهي القسم من الأرض الذي ينعدم 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 و كمون الأرض المرجعي.

جـ- 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 1-6) .

الشكل (1-6) بعض التعاريف /2/.

6–2–1 نظام التأريض الفعال المباشر Effectively Grounded System:

يعتبر النظام أو جزء منه مؤرض اً تأريضاً مباشراً أو فعالاً إذا كانت نسبة المفاعلة الصفرية إلى المفاعلة الموجبة (X_0/X_1) لا تتجاوز 3 ونسبة المقاومة الصفرية

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 قريب اً 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 خطرة. ويمكن تجنب هذه

التوترات بربط 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 طنيني أو تأريض عبر وشيعة بترسون.

Damascus University

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

6–2–3 التأريض الطنيني Resonant Grounding:

إذا وضعنا محارضة بقيمة مناسبة بين الحيادي والأرضي بحيث يوازن I_F تيار العطل السعوي أي:

$$I_F = 3I_C$$

فإن التأريض في هذه الحالة يعرف بالتأريض الطنيني 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 السلي مة 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 (3-6) التأريض الطنيني.

a) نظام ثلاثي الطور ذو تأريض طنيني، 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 الطنيني.

إن استخدام هذا النوع من التأريض سيقلل من حالات انقطاع التغذية الناجمة عن الأعطال العابرة على الخطوط وهو ما لا يمكن تحقيقه باستخدام أنواع أخرى من التأريض.

أيضاً باستخدام التأريض الطنيني يمكن تقليل الحالات التي يتطور فيها عطل طور مع الأرض إلى عطل طورين أو ثلاثة أطوار.

ويمكن حساب استطاعة وشيعة بيترسون من العلاقة:

$$Q_L = I_F \cdot V_{ph} \quad \text{Mvar}$$

فمثلاً استطاعة الوشيعة لشبكة 110 ك.ف، وتيار 100 أمبير، هي:

$$100 \times 110 / \sqrt{3} \times 10^{-3} = 6.3 \quad \text{Mvar}$$

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: 50 ,60 ,70 ,85 ,100 أمبير (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/ مثلي والمحولات نجمي/نجمي/مثلثي (ملف التوازن)، و لا 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 الوشيعة من التيار الزائد يلحظ قاطع آلي مع مقاومة على التفرع مع الوشيعة (الشكل 5-6). القاطع مفتوح في الحالة العادية، ولكنه يغلق عندما تتحسس الحاكمة تياراً زائداً وتغلق دارة 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:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln\frac{d}{r}} \quad F/m$$

أو

$$C = 0.896\times10^{-11}\times192\times10^{3} = 172\times10^{-3}F = 1.72 \quad \mu F$$

ومن العلاقة:

$$\omega L = \frac{1}{3\omega C}$$

لدينا

$$L = \frac{1}{3\omega^2 C} = \frac{10^6}{3\times314^2\times1.72}$$
$$= \frac{10^6\times10^{-4}}{5.16\times9.86} = 1.97 \quad \text{henry}$$

أما استطاعة الوشيعة فتحسب من العلاقة

$$\frac{V^2}{3\omega L} = \frac{132\times132}{3\times314\times1.97} = 9.389 \quad \text{MVA}$$

6–2–4 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 Vc، 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 و لمختلف 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 لابد من وجود تغذية حلقية 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.

6-2-4-2 التأريض بمقاومة Resistance Grounding

ويقصد به تأريض نقطة الحيادي بمقاومة أومية بحتة، و تكون قيمة المقاومة شكل (7-6) 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 المس تحرة 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)

6–2–4–3 التأريض بمفاعلة Reactance grounding:

يقصد به تأريض نقطة الحياد ي عن طريق ممانعة تغلب عليها الصفة التحريضية. إن النسبة Z_o/Z_1 هي التي تقرر فيما إذا كان النظام ذا تأريض مباشر أم تأريض مفاعلة وفقاً للآتي:

لأجل النظام ذي التأريض المباشر $Z_o / Z_1 < 3$

لأجل النظام ذي تأريض مفاعلة $Z_o / Z_1 > 3$

ولتوضيح ما ذكر نفرض نظام قدرة مؤرضاً في الواقع تأريضاً مباشراً وفيه $Z_o / Z_1 > 3$ ، فيُعتبر مع ذلك أن النظام ذو تأريض مفاعلة.

إن تأريض المفاعلة هو حالة تأريض تقع بين التأريض المباشر والتأريض الطنيني.

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 يس عمل لتأريض نقط الحياد للمحركات والمعوضات المتواقتة، 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 بمقاعلة.

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 متحرضة 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 ا لحماية يساهم في تسهيل سيلان تيار الخطأ عبر مأخذ تأريض الأبراج وبالتالي تحسين مقاومة شبكة التأريض للخطوط والمحطة.

وتشير العديد من ال نظم 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 الثالث ة 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:

$$2 = 10^{-4} \times 30 \times 12 \times 37 \times 1.5$$ صاعقة في العام

أما خطوط 400 ك ف في سورية فلها ناقلا 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 250-200 م على طول الشبكة، يوصل إليها الخط ا لحيادي.

- 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:

- انهيار عوازله، من برج آخر عن طريق خط الحماية.
- تفريغ مباشر من الجو على البرج.

التأريض ضروري لتفادي حدوث قوس كهربائي (انهيار 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 نواقل 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 لاتستعمل 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 ($50\ mm^2$).

جـ- 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 روندیلات خاصة) ويتفادى الوصل باللحام لتجنب تأكسد مناطق اللحام.

لذلك فإنه يعمد في المناطق التي يخشى فيها سرقة هذه القطع إلى تعطيل سن البرغي قرب العقة (بضربة مطرقة على إز ميل مدبب). أما عند ضرورة إجراء وصل ناقل التأريض، فيمكن تأمين هـ 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 مربط قائم البرج، كما يتم طمر حلقة أخرى على عمق 150 cm وعلى محيط القاعدة البيتونية ويربط طرف هذه الحلقة أيضاً إلى مربط 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 3-2 سنوات من التركيب، وذلك نتيجة تراص تراب الردميات حول بيتون القاعدة. وفي حال تجاوز هذه القيمة، يعمد 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 يعمد إلى تحسين هذه القيمة بالطريقة التالية (الشكل 10-6):

الشكل (10-6) تحسين أرضي الأبراج.

يحفر 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 (11-6).

يلاحظ أنه من أجل تربة سيئة أو جافة فإن البرج يبقى بفرق كمون مختلف عن الأرض ذاتها ويزداد هذا الفرق بكبر تيار العطل الذي يسري عبر ناقل التأريض. ويزداد فرق الكمون اعتباراً من المأخذ الأرضي حسب البعد عنه.

الشكل (11-6) 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 القائم 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 الحفرية 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 اقترابهم 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(غمد، 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 واللوحة 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 مقامة مؤرض الحماية عن (2) أوم في فصل الجفاف ومقاومة مؤرض التشغيل عن (5) أوم.

الشكل (12-6) تأريض مركز تحويل على حامل.

– مركز تحويل بناء سقف عالي :

يتم تنفيذ نظام التأريض كما في الشكل (13-6).

Damascus University

الشكل (13-6) مركز تحويل ضمن بناء سقفه عال.

تابع الشكل (13-6)

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 (14-6) 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، فيلحظ بئران أرضيان: الأول E لتأريض

النقطة النجمية في جهة التوتر المنخفض وتأريض الهيكل، والثاني E_1 لتأريض مفرغات الصواعق والمنطقة النجمية والهيكل أيضاً.

Damascus University

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 الآخرى، 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 5×40 مم2 أو يطمر ناقل من النحاس العاري بمقطع لايقل عن 70 مم2 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 الرطبةوخاصة في فترة الجفاف، ويجب أن تكون مقاومة شبكة التأريض = 1 أوم على الأكثر. وذلك في شروط معتدلة لفصول السنة (ربيع- خريف). ويعمد 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 الحيادي 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 التأريض داخل منطقة العمل (الشكل 6-16).

الشكل (6-15) قطب أرضي مكون من حلقات تفرعية.

Damascus University

الشكل (16-6) تعديل مسار التوتر (حصيرة)

6–3 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.

تشترط النظم أن لا تزيد مقاومة الأرضي لمحطات النقل عن 1 أوم ولمحطات 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 (17-6)

- القطب الأرضي(Eath Electrode): هو الناقل أو مجموعة من النواقل 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 Indepenelent 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 (17-6) 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 الحيا دي للمحول HV/LV (أو لأي منبع آخر)، وكذلك تأريض الأجزاء الناقلة المكشوفة لتجهيزات التوتر المنخفض.

إن اختيار نظم التأرض 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 18-6)، 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.

6-3-1-2 نظام التأريض TN 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 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 مجولة.

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 المحملوة.

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

6–3–1–3 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 هنا ك 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

6–3–1–4 نظام التأريض IT (تأريض بممانعة) :

IT Scheme (Impedance Earthed)

في هذا النظام يتم ربط ممانعة Zs (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 (Zs 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 (26-6) نظام التأريض IT (تأريض بممانعة).

6–3–2 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 الكهرمغناطيسية.
- التصميم والتشغيل.

6–3–2–1 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 الم بقي 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 أيّ ممانعة لقطب التأريض فإن تيار العطل الأرضي يكون بقيمة كبيرة (من رتبةالكيلو أمبير)، لذلك خلال عطل العازلية على التوتر المنخفض يكون هبوط توتر التغذية، الاضطرابات الكهرمغناطسية وخطر تخريب التجهيزات (حريق، ملفات المحركات، الهياكل المغناطيسية)عالية.

- **ارتفاع التوتر:**

خلال عطل العازلية على جهة التوتر المنخفض LV تزاح نقطة الحيادي للنظام الثلاثي الطور، ويصبح التوتر بين الطور والأجزاء الناقلة المكشوفة للتجهيزات أعلى من التوتر بين الطور والحيادي وتساوي 1.45 Un 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 $16\ mm^2$ 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 كهرمغناطيسية. وتزداد قيمة هذه التيارات الدائرة بصورة ملموسة خلال أعطال العازلية.

- **الملاءمة الكهرمغناطيسية :**

– 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 5A 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 صدأ الأقطاب الأرضية والهياكل 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.

6–3–2–2 نظام التأريض TN-S

الخصائص:

- **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 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 الكهرمغناطيسية**

– 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 للحم اية من التماسر 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 للدارة 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.

6-3-2-3 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 لايكون صحيحاً بالنسبة لناقل 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. وبالنتيجة 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 الكهرمغناطسية:**

- في الظروف الطبيعية لا يتعرض الناقل PE إلى هبوط توتر، وبالتالي تختفي هنا كل السلبيات الواردة في النظام TN-C . في حال عطل العازلية فإن التوتر النبضي الذي يظهر على طول الناقل الأرضي C PE يكون منخفضاً والاضطربات الناتجة تكون مهملة.

- **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 دارة 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 الكهرمغناطيسية:**

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 قريب اً من كمون الأجزاء الناقلة المكشوفة بواسطة سعات 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 ولايشكل 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 قريب اً من كمون الأجزاء الناقلة المكشوفة بواسطة سعات 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 الكهرمغناطسية:**

– يكون تيار عطل العازلية الأول صغيراً ناتجاً عن السعات 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 الكهرمغناطيسية.

بشكل عام يمكن أن يحدث عطل ثانٍ على أي م ن الأطوار وبالتالي حدوث حالة قصر وما رافق ذلك م ن 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 الكهرومغناطسية:**

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 ولايمثل 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 إلغا ؤه. وتصمم تجهيزات الحماية لتعمل في حالة العطل المزدوج، فإذا تم استخدام القواطع الآلية أو المنصهرات فإن القواعد تكون مشابهة 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 دارة.

- **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– طور بالنسبة للناقل والتوتر طور– حيادي بالنسبة للحيادي.

2– إذا كان الحمل المغذ ى 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 آخرى .

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

Damascus University

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 التأريض TN-C تيارات الأعطال يمكن أن تكون كبيرة جداً لذلك لايسمح به للدارات التي مقاطع نواقلها أصغر من $10\ mm^2$

Damascus University

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 التاريض ومحددات ارتفاع التوتر.

6–4 مؤشرات اختيار نظام التأريض Choice Criteria:

6–4–1 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.

6–4–2 المؤشر الثاني Second Criterion :

يجب أن تلبي 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 الكهرمغناطيسية.

6-4-3 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 وتيارات التسريب.
- وجود كادر الصيانة في كل الأوقات وذلك للتخلص من العطل الأول فور حدوثه والإشراف على التركيبات الكهربائية.

3- يفضّل 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 لابد قبل تطبيق النظام من إجراء دراسة تحليلية.

وإذا تم تركيب تجهيزات تيار متبقٍ ذات حساسية متوسطة فإن ذلك سيزود النظام بحماية فعالّة 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 الكهرمغناطسية 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.

6-4-4 المؤشر الرابع Forth Criterion :

فيما يتعلق بارتفاع التوتر والاضطرابات الكهرمغناطيسية فإن أنظمة التأريض IT, TT, TN-S تعطي نتائج جيدة إذا تم تنفيذها بشكل صحيح.

6-4-5 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 وضياعات الإنتاج.

6-5 البئر الأرضي (نظام القطب الأرضي):

تتكون مقاومة التيار في القطب الأرضي من ثلاث مركبات:

1- مقاومة الوتد الأرضي نفسه مع مرابطه.

2- مقاومة التماس بين الوتد 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، والمطم ور في عمق التربة ينقل التيار في جميع الاتجاهات. لنعتبر أن القطب محاط بطبقات من التربة ذات سماكة متساوية (الشكل 34-6). مقاومة الطبقة الأقرب إلى الوتد تكون هي الأكبر لأن مساحة سطحها هي الأصغر، أما الطبقة الثانية فمقاومتها أصغر من الأولى لأن سطحها أكبر وهكذا.

الشكل (34-6) مكونات مقاومة القطب الأرضي.

وبعد مسافة من القطب، ندعوها منطقة المقاومة الفعالة أو المؤثرة، تصبح مقاومة الطبقات الأرضية مهملة. وتتعلق هذه المسافة بعمق الوتد في التربة. إن مقاومة الأرض المحيطة بالوتد هي المركبة الأ كثر أهمية والأكثر صعوبة من حيث حسابها والتغلب عليها.

حساب مقاومة الأرض: 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:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L}(\mathrm{Ln}\frac{4L}{a} - 1) \qquad (6\text{-}1)$$

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 35-6). أما زيادة قطر الوتد فلا يقل مقاومة التأريض بشكل ملحوظ (الشكل b 35-6).

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 Restivity 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 $1 \quad m^3$ من التراب، بين سطحين متقابلين منه، ووحدتها أوم–متر. وتجدر الإشارة إلى مايلي:

- تتبدل المقاومة النوعية للتربة من مكان لآخر وحسب نوع الأحجار والصخور ودرجة الرطوبة فيها، وحسب التدرج الحبي 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 بتربة زراعية ناعمة لتأمين جودة التماس معها.

آ- استبدال التربة:

لا تُعاد الأتربة المبحصة أو السيئة الناقلية والناتجة عن حفريات الأرضي 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 الأرضي 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 بالقص دير سماكة 3مم للحديد و 2 مم للنحاس (السما كة لا تؤثر على مقاومة الأرضي، والحد الأدنى لها يفرضه التآكل المسموح) وطول ضلع B (في التمديدات 1م)، تطمر 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:

$$R = \rho / 4.5B \qquad (6\text{-}2)$$

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 = $\frac{50}{1\times 4.5} = 10$ 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.

تحسب المقاومة من العلاقة العملية:

نصف قطر الحلقة (متر) = r

$$R = \rho / r \qquad (6\text{-}3)$$

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:

$$R = 2\rho / \ell \qquad (6\text{-}4)$$

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:

$$R = \frac{\rho}{\pi.\ell} \mathrm{Ln} \frac{2\ell}{d} \qquad (6\text{-}5)$$

حيث ℓ = طول القطب الأرضي ، d= قطره

4– قطب أرضي شعاعي رباعي:

يتألف من ناقلين أفقيين متناصفين مقاومة الأرضي هنا هي:

$$R = \frac{\rho}{4\pi\ell} (\mathrm{Ln} \frac{4\ell}{d} + 1.755) \qquad (6\text{-}6)$$

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 4×40×40mm. 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 ودخ ول الوتد. يجب الإبقاء على النهاية العليا للوتد بدون طمر وتعمل له فتحة تفتيش بأبعاد تقريبية40×40×40 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 0.5-1 m. ويبين الشكل (6-36) توضحياً 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 ضعفي طول الوتد. وإذا كان البعد بين الوتد والآخر أكبر من ضعفي طول الوتد فتهبط مقاومة التأريض للنصف لأجل وتدين، وللثلث 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:

$$\frac{\text{مقاومة وتدين على التفرع}}{\text{مقاومة وتد واحد}} = \frac{1+x}{2} \qquad (6\text{-}7)$$

حيث : $x = \left(\frac{\ell}{Ln4\ell/a-1}\right)/d$

d: البعد بين الوتدين .

2- ثلاثة أوتاد تشكل مثلثاً متساوي الأضلاع طولة d:

$$\frac{\text{مقاومة ثلاثة أوتاد على التفرع}}{\text{مقاومة وتد واحد}} = \frac{1+2x}{3} \qquad (6\text{-}8)$$

3- عدد من الأوتاد N مرتبة على شكل مربع مفرغ أو مليء:

$$\frac{\text{مقاومة } N \text{ وتداً على التفرع}}{\text{مقاومة وتد واحد}} = \frac{1+kx}{N} \qquad (6\text{-}9)$$

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:

$$R = \frac{\rho}{2D}.k \qquad (6\text{-}10)$$

حيث :

ρ المقاومة النوعية للتربة شكل

D القطر المكافئ للشبكة

$$D = (4 \times \ell \times b / \pi)^{1/2} \qquad (6\text{-}11)$$

ℓ = طول القضيب

B= عرض الشبكة

K= ثابت حسب البعد بين قضيب وآخر a، وقيمته

1.2 لأجل $a \le 0.05\ell$

1.2 لأجل $0.05\ell < a \le 0.01\ell$

عدد القضبان $N = \frac{b}{a} + 1$

7- الأقطاب الأرضية الطبيعية:

قد يستفاد أحياناً من المؤرضات الطبيعية الموجودة بشكل دائم ضمن الأرض وبتلامس جيد معها، كأنابيب 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.

6–7 القياس العملي لمقاومة نظام التأريض Earth Testing

6–7–1 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 (6-38).

الشكل (38-6) مبدأ قياس مقاومة نظام التأريض.

نقيس التيار بواسطة الجهاز A. نستخدم وتداً أرضياً ثالثاً P ونغرسه في الأرض في نقاط مختلفة حول E، فيقيس الفولطميتر V فرق الكمون بين E والنقاط المختلفة في التربة المحيطة وفرق الكمون هذا، حسب قانون أوم، يتناسب طرداً مع مقاومة الأرض بين E والنقطة حيث القطب P، وعليه نستطيع أن نرسم منحنياً يمثل العلاقة بين المقاومة والبعد عن القطب E المراد فحص تأريضه، كما هو مبين في الشكل (39-6). 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 التأريض بدلالة المسافة عن القطب E المراد فحصه.

a- يجب أن يكون قطب التيار R بعيداً عن القطب المراد فحصه E بحيث لاتتدخل 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

6-7-2 جهاز القياس Earth Tester

هذا الجهاز يستخدم لقياس مقاومة نظام التأريض والمقاومة النوعية للتربة. النوع المفضل هو ذو أربعة المآخذ، خرج متناوب. وهو عبارة عن مقياس أوم ذي وشيعتين، ومولد مصمم بحيث يمرر تياراً متناوباً إلى التربة وتياراً مستمراً إلى وشيعتي مقياس الأوم. ولهذا الجهاز عادة مجال توتر V 110-10، ومجال تيار حتى 5 ميلي أمبير، تردد 95-92 هرتز، مجال أومي من 2-0 حتى 10000 أوم.

يتألف مقياس الأوم من وشيعتين تشكلان بينهما زاوية ثابتة ومثبتتين على محور مشترك، وتتحركان ضمن حقل مغناطيسي دائم. يمر في وشيعة التيار (CC) تيار متناسب مع التيار الكي في دارة الف ح ص، أما في وشيعة الكمون (PC) فيم ر تيار متناسب مع مقاومة التأريض المطلوب قياسها. إن نظام الوشيعتين يجعل الجهاز مقياس أوم فعلي يعطي قراءات بالأوم مستقلة عن التوتر المطبق وسرعة الدوران ومقاومة التماس للأوتاد الأرضية.

يبين الشكل (40-6) توصيلات الفاحص الأرضي.

الشكل (40-6) مخطط عمل جهاز القياس الأرضي

يمر التيار المستمر الخارج من المولد خلال وشيعة التيار إلى قالب تيار دوار التيار المتناوب يصل مآخذ التيار للجهاز (C_1 و C_2) الموصلة إلى E و R. أما وشيعة الكمون لمقياس الأوم فتحصل على التغذية من مآخذ 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 يُلحظ مجمع يُركب على نفس محور قالب التيار الرئيسي ومتواقت معه، يعمل كمقوم بين مآخذ الكمون ووشيعة الكمون. الأجهزة الحديثة تزود بنظام مجمع ذي تواقت الكتروني. وهكذا فإن وشيعتي التيار والكمون لمقياس الأوم تغذيان بتيار مستمر، بينما يتغذى القسم الأرضي من دارة 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 يخ ـتو مكان غرسه بعد ذلك حسب التوصيات السابقة).

لقياس المقاومة النوعية لتربة ما بوساطة نفس الجهاز نتبع طريقة فين ر 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 الدخليين إلى المأخذين P_1 و P_2.
- يعطي الجهاز قراءة معينة R نحسب منها المقاومة النوعية للتربة من العلاقة:

$$\rho = 2\pi\, a\, R \qquad (6\text{-}12)$$

حيث :

ρ المقاومة النوعية بـ أوم متر

a= المسافة بين وتد وآخر متر

R= القراءة أوم

6-8 تصميم الناقل الأرضي في الأبنية السكنية والورشات الصناعية:

يعطي الجدول (2-6) 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 (2-6)

مقطع أكبر ناقل نحاسي في التمديدات mm^2	مقطع الناقل الأرضي الرئيسي Mm^2	مقطع الناقل الأرضي المرافق للتمديدات الفرعية mm^2
1.0	6	2.5
1.5	6	2.5
2.5	6	2.5
4.0	6	4.0
6.0	6	4.0
10.0	6	6.0
16.0	16	10.0
25.0	16	16.0
35.0	16	16.0
50.0	30	35.0
70.0	35	35.0
95	50	50
130	50	50
150	50	50
180	70	70
240	70	70
300	70	70

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 (4-6) :

معطي وحدة سكنية مؤلفة من طابقين وقبو (الشكل 41-6) .

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 التأريض الضرورية للبناء

الشكل (6-41) مسقط أفقي للبناء العائد للمثال العملي.

مقاومة التأريض = $\frac{\text{توتر التماس الحرج}}{\text{التيار الاسمى}\times 2.5}$

التيار الاسمي للوحة التغذية الرئيسة = 30 أمبير.

وعليه فمقاومة التأريض = 65 ÷ (2.5×30) = 0.866 = 1 أوم تقريباً

لو فرضنا أن المقاومة النوعية للأرض = 40 أوم متر وطول الوتد 2.5 وقطره 50mm

فنجد بتطبيق العلاقة (6-1):

$$R = \frac{40\times 100}{2\times 3.14\times 250}(\text{Ln}\frac{4\times 250}{2.5}-1) = 12.7 \quad \text{ohm}$$

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 10أوم متر إذ في هذه الحالة تصبح المقاومة الإجمالية (بإهمال مقاومة الناقل الأرضي):

$$\frac{12.7}{3\times 4}=1$$ أوم تقريباً

طبعاً لابد من دراسة اقتصادية للوصول للحل المثالي.

1–ب: ناقل حقيقي: لأجل قطر حلقة m 13 ومقاومة نوعية 40 أوم متر تكون مقاومة البئر الأرضي = 40÷7= 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 واللوحة الرئيسية $6\ mm^2$، أو $10\ mm^2$ ، (أكثر أماناً). مقطع الناقل الأرضي الواصل بين اللوحة الرئيسية واللوحة 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 واللوحة 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.

6–8–2 في الورشات والأماكن الصناعية:

يُمدد الناقل الأرضي بحيث يمكن وصل هياك ل الآلات والأجزاء المعدنية إليه وتتم حمايته من العوارض الميكانيكية والمواد الكيميائية والتي قد تؤثر على سلامته وذلك بوضعه ضمن مجر اة أو يُمدد على رفوف الكبلات أو يتم تثبيته جيداً على الجدار والشكل (6-43) يبين مثالاً لتوزيع شبكة تأريض في ورشة.

6–9 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 التأريض. 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 التأريض مقطوعاً أو أن مقاومة شبكة الأرضي مرتفعة أو سيئة.

الشكل (43-6) تأريض ورشة صناعية

- عند وجود عطل إلى الأرض في التمديدات الواقعة بعد القاطع ومرور تيار الخطأ.

Damascus University

- 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 للقاطع، وبالتالي يحصل فرق في التوتر على طرفي الدارة الثانوية للمحول الحلقي التفاضلي الذي تمر ضمنه النواقل.

وهذا التيار يعمل على فتح قفل إ غلاق القاطع بمدة تتراوح بين 30-20 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)=(24فولط) ÷ 0.500 = 48 أوم

نظام فرنسي (عادي)= (50فولط) ÷ 0.500 = 100 أوم

نظام ألماني (عادي)= (65فولط) ÷ 0.500 = 130 أوم

ومن أجل قاطع آلي تفاضلي بحساسية 30 ميلي أمبير، فإن مقاومة الآرضي تكفي أن تكون

نظام فرنسي (مبلل)= (24فولط) ÷ 0.030 = 800 أوم

نظام ألماني (عادي)= (65فولط) ÷ 0.030 = 2160 أوم

نظام فرنسي (عادي)= (50فولط) ÷ 0.030 = 1160 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 يعبث 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، ولابد 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 بمتناول 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 التاريض.

المصطلحات العلمية

إنكليزي	فرنسي	عربي
	A	
Active	Actif	فعال
Active network	Réseau actif	شبكة فعالة
Active Power	Puissance active	استطاعة فعلية
Adjustment	Réglage	تعيير
Admittance	Admittance	سماحية
Air gap	Entrefer	ثغرة هوائية
Algebric	Algèbre	علم الجبر
Algorithm	Algorithme	المخطط المنهجي
Alive	Sous tension	حي، مكهرب
Alternating Current	Courant Alternatif	تيار متناوب
Ambient Temperature	Température Ambiante	درجة الحرارة المحيطة
Analytical Methods	Methodes Analytique	طرق تحليلية
Analytic	Analytique	تحليلي
Angular	Angulair	زاوي
Apparent Power	Puissance Apparent	استطاعة ظاهرية
Arc	Arc	قوس كهربائي
Armature	Armature	متحرض
Armoured cable	Câble Armé	كابل مدرع، مسلح

Assistance	Assistance	مساعدة
Attenuation	Atténuation	تضعيف، تخامد
Auto-transformer	Auto-transformateur	محول ذاتي
Axe	Axe	محور
Avarage	Moyen	متوسط

B

Balance	Balance	متوازن
Balanced Load	Charge équilibreé	حمل متوازن
Base Value	Valeur de Base	القيمة الأساسية
Blocks	Blocs	قالب–صندوق
Boosters	Survolteurs	مقويات الجهد
Booster Transformer	Transformateur de survolteur	محولات التقوية
Branche	Branche	فرع
Breakdown	Claquage	انهيار
Bus Bar	Barre	قضيب تجميع
Bypass	By-pass	تحويلة ممر جانبي

C

Cable	Câble	كابل
Cable laying	Pose de câbles	مد الكابلات
Capacitance	Capacité	سعة
Capacitor	Condensateur	مكثف
Characteristics	Caractéristique	مميزات

Damascus University

Characteristic impedance	Impedance caractéristique	معاوقة مميزة
Charge	Charge	شحنة
Charge density	Densité de charge	كثافة الشحنة
Charging Current	Courant à Charge	تيار الشحن
Circle diagram	Diagramme circulaire	مخطط الدائرة
Circuit breaker	Interrupteur, Conjecteur-Disconjoncteur	قاطع الدارة
Circulating Current	Courant de Circulation	تيارات دوارة
Coefficient	Coefficient	عامل
Coil	Bobine	وشيعة ملف
Combined Output	Débit Combiné	خرج مركب
Communication	Communication	اتصال
Compact	Compact	مضغوط
Comparators	Comparateurs	مقارنات
Compensator	Compensateur	معوض
Complex	Complexe	عقدي
Complex quantity	Grandeur Complexe	كمية عقدية (مركبة)
Components	Composantes	مركبات
Compose	Composé	مؤلف من
Compression Cabel	Cable à pression	كابل مضغوط
Computation	Calcul	حساب

Damascus University

Computer	Ordinateur	الحاسب
Conclusion	Conclusion	نتيجة
Configuration	Configuration	تشكيل
Condenser	Condensateur	مكثف
Conductivity	Conductivité	الموصلية
Conjugate	Conjugué	مرافق
Connected load	Charge de connexion	حمل موصل
Consecutively	En Succession	بصورة متتابعة
Consideration	Consideration	اعتبارات
Consumption	Consommation	استهلاك
Continuty	Continuité	استمرارية
Contraction	Contraction	التقلص
Control area	Region de Contrôle	منطقة التحكم
Control	Contrôle	تحكم
Convergence	Convergence	تقارب
Conversion	Conversion	قلب
Co-ordinates	Coordoneés	إحداثيات
Co-ordination	Coordination	ترتيب
Copper Cable	Câble en cuivre	كابل نحاسي
Coupling	Accouplement	تزاوج
Copper Loss	Perte dans le cuivre	الضياعات النحاسية
Corona	Couronne	كورونا

Damascus University

Criterion	Critére	معيار
Current	Courant	تيار
Current Carring Capacity	Capacité de courant d’un contact	سعة حمل تيار
Current Coil	Circuit de Courant	ملف تيار
Current Tnansformer	Transformateur de courant	محول تيار
Cycle	Cycle	دورة

D

Damping	Amortissement	تخامد
Data	Donneé	معطيات
Decoupling	Découplage	فك الارتباط
Delay	Retard	تأخير
Delta connection	Connexion en triangle	توصيل دلتا (مثلثي)
Definite	Définit	محدود
Demand curve	Diagramme de charge	منحني الطلب
Demonstrate	Démontrer	يبرهن
Demonstration	Démonstration	برهان
Detection	Detection	كشف
Dielectric	Die'lectrique	عازل كهربائي
Dielectric loss	Perte die'lectrique	الضياع بالعازلية
Dielectric constant	Constante diélectrique	ثابت العازلية
Dielectric loss angle	Angle de pertes diélectriques	زاوية الفقد في العازل

		الكهربائي
Dielectric strength	Résistance diélectrique disruptive	متانة العزل الكهربائي
Differentiation	Différentiation	الاشتقاق
Digital computer	Ordinateur	حاسب الكتروني
Dimensions	Dimensions	أبعاد
Directional	Directionel	اتجاهي
Direct current	Courant continu	تيار مستمر
Direct Proportion	Proportion direct	تناسب طردي
Discharge	Décharge	تفريغ
Discontinuous	Discontinu	غير مستمر
Displacement angle	Angle de déplacement	زاوية الإراحة
Dissipative energy	Energy de dissipation	القدرة المبددة
Display	Représentation	عرض إظهار
Distribution Network	Réseaux de distributions	شبكات توزيع
Distortion	Distorsion	تشوه
Disturbance	Perturbation	اضطراب، تشويش

E

Earth	Terre	أرض، أرضي
Earth current	Courant à la terre	تيار أرضي
Earthed system	Réseau mis à la terre	نظام مؤرض
Economic Operation	Opération économique	تشغيل اقتصادي

Earth fault	Défault a la terre	عطل أرضي
Eddy Currents	Courant de foucauld	تيارات فوكو
Earth protection	Protection contre les défauts à la terre	حماية أرضية
Effect	Effet	تأثير
Earth resistance	Resistance de la terre	مقاومة الأرض
Effective	Effectif	فعال
Efficiency	Rendement	مردود
Electrical angle	Angle electrique	زاوية كهربائية
Electric field	Champ Electrique	مجال كهربائي
Electric power system	Systéme dénergie electrique	نظام القدرة الكهربائية
Electric field intensity	Intensité de champ électrique	شدة المجال الكهربائي
Electric Stress	Contrainte electrique	الإجهاد الكهربائي
Electric flux density	densité du flux electrique	كثافة التدفق الكهربائية
Elementary	Elementaire	ابتدائي أولي
Electric image	Image électrique	صورة خيالية كهربائية
Energy	Energie	قدرة
Electric power	Puissance électrique	الاستطاعة الكهربائية
Equations	Equations	معادلات
Electromagnetic	Electromagnétique	كهرمغناطيسي
Equipement	Equipement	تجهيزات
Equilibriun	Equilibre	توازن

Damascus University

Equivalent	Equivalent	متكافئ
Equivalent network	Réseau équivalent	شبكة مكافئة
Error signal	Signal d érreur	إشارة خطأ
Excitation current	Courant d'éxcitation	تيار التهييج
Expansion	Expansion	تمدد
Exponential	Exponnentialle	أسي

F

Factor	Facteur	عامل
Failure	Echouement	فشل
Faraday cage	Cage de Faraday	قفص فراداي
Fault calculations	Calcul des défauts	حسابات الأعطال
Fault current	Courant dé defaut	تيار العطل
Faults	Défauts	أعطال
Feedback	Contre-reaction	التغذية العكسية
Feeder	Feeder	مغذي
Flow	Ecoulement	سريان
Ferranti effect	Effet de Ferranti	تأثير(ظاهرة) فيرانتي
Flux	Flux	فيض
Flux density	Densité du flux	كثافة الفيض
Field	Champ	مجال
First law of kirchhoff	Première loi de kirchhoff	قانون كيرشوف الأول
Formula	Formule	قاعدة

Force	Force	قوة
Frequency	Fréquence	تردد
Friction	Frottement	احتكاك
Fundamental	Fondamental	جوهري
Full lood	Charge nominale	حمل كامل

G

Gap length	Longueur d'une coupure	طول الثغرة
Gaz-pressure cable	Cable a pression de gaz	كبل غاز مضغوط
Grounded neutral	Neutre mise à la terre	حيادي مؤرض
Generator	Génératrice	مولد كهربائي
Grounded reactance	Réactance mise à la terre	وشيعة مؤرضة
Geothermal power station	Central geothermique	محطة توليد بالحرارة الجوفية
Ground fault	Defaut à la terre	عطل أرضي
Ground rod	Piquet de terre	قضيب تأريض

H

Harmonices	Harmoniques	مداريج، توافقيات
High frequency	Haute fréquence	تردد عالٍ
High stress	Contrainte elevée	إجهادات عالية
High voltage	Haute tension	توتر عالٍ
Hypothetical	Hypothétique	افتراضي
Hydro electric station	Centrale hydro électrique	محطة توليد مائية

I

Images	Images	خيالات
Impedance	Impedance	ممانعة
Impulse	Impulsion	نبضة
Indeterminate	Indeterminé	غير معين
Induced e.m.f	f.e.m induite	قوة محركة كهربائية
Inductance	Inductance	محارضة
Inductance coils	Bobine à inductance	وشائع التحريض
Induction motor	Moteur a induction	محرك تحريضي
Inertia	Inertie	العطالة
In fase	En phase	متطابق الطور
Infinite line	Ligne Infinie	خط لا متناهي
Influence	Influence	نفوذ
Information	Information	معلومات
In-put	Entreé	الدخل
In-quadrature	Enquadrature	على التعامد
Insulators	Isolateurs	عوازل
In-series	En série	على التسلسل
Integration	Intégration	تكامل
Instantaneous power	Puissance instantaneé	الاستطاعة اللحظية

Interconnections	Interconnections	دارات الوصل
Insulation resistance	Résistance d’isolement	مقاومة العزل
Inverse proportion	Proportion indirecte	تناسب عكسي
Interconnected network	Réseau d’interconnexion	شبكة ارتباط
Iron	Fer	حديد
Interrupting capacity	Pouvoir de coupure	سعة القطع
Iteration	Iteration	تكرار

L

Lagging current	Courant diphase' en arrière	تيار متأخر
Leakage	Dispersion	تسرب
Leakage resistance	Résistance de fuite	مقاومة التسرب
Lever	Levier	ذراع
Light	Lumière	ضوء
Lightning pnotection	Protection contre la foudre	الحماية من الصواعق
Limits	Limites	حدود
Line	Ligne	خط
Line Characteristics	Caractéristique de Ligne	مميزات الخط
Linear	Linéaire	خطي
Linking	Enclenché	مشتبك
Line to line	Entre lignes	بين الخط والآخر
Load	Charge	حمولة

Damascus University

Load current	Courant de charge	تيار الحمل
Load center	Centre de charges	مركز الحمولات
Localization of a fault	Localisation d'un dérangement	تحديد موقع العطل
Loop	Boucle	حلقة
Loop equation	Equation de Boucle	معادلات الحلقة
Losses	Pertes	ضياعات
Loss-Free	Sans pertes	بدون ضياعا ت
Loss line	Ligne de perte	خط الضياع
Lumped	En-bloc	مجمعة
Luminaire	Luminaire	جهاز إنارة

M

Machine	Machine	آلة
Magnetic field	Champ magnétique	مجال مغناطيسي
Magnetic flux density	Densite du flux magnétique	كثافة التدفق المغناطيسي
Magnitude	Module	مقدار
Maintenance	Entretien, maintien	صيانة
Maximum value	Valeur maximale	القيمة العظمى
Mechanic	Mechanique	ميكانيك
Mechanism	Mécanisme	آلية
Modification	Modification	تقويم
Motor	Moteur	محرك

Multiple	Multiple	متعدد
Mtual inductance	Inductance Mutuelle	محارضة متبادلة

N

Negative	Négatif	سالب
Network Analyser	Analyseur de réseau	محلل شبكة
Network	Réseau	شبكة
Network-parameter	Paramètre de réseau	باراميتر الشبكة
Neutral	Neutre	حيادي
Node equations	Equations des Noeud	معادلات العقدة
No-load	Marche à vide	بدون حمل، بلا حمل
Nominal	Nominal	اسمية
Nonequality	Inegélité	متراجحة
Non-linear resistance	Résistance nonlinéaire	مقاومة لا خطية

O

Ohmic loss	Perte ohmique	ضياع أومي
Oil filled cable	Cable a huile fluide	كبل مملوء بالزيت
Oil-imregnated	Imprégné d’huile	مغمور بالزيت
Open Circuit	Circuit ouvert	دارة مفتوحة
Operation	Operation	عملية
Out door	Enplein d’air	خارجي
Output power	Puissance de sortie	استطاعة الخرج

Over current protection device	Dispositif de protection à maxi mum de courant	جهاز حماية من التيار الزائد
Overhead line	Ligne aérienne	خط هوائي
Overload protection	Protection contre les surcharges	حماية من زيادة الحمل

P

Parallel circuits	Circuits en parallèle	دارات التفرع
Parameters	Parametres	محددات
Path	Chemin	طريق/ مسار
Peak load	Charge maximale	حمل الذروة
Perfect conductor	Conducteur parfait	ناقل تام
Period	Periode	دور
Permeability	Perméabilité	نفاذية
Permittivity	Permittivité	السماحية
Perpendicular	Perpendiculaire	عمودي–قائم
Per unit	Par unité	بالوحدة
Phase	Phase	طور
Phase angles	Angles de phase	زوايا الطور
Phase sequence indicator	Indicator de sequence de phase	مبين تعاقب الأطوار
Phase Shift	Déplacement de phase	إنزياح الطور
Phase shifting transformer	Transformateur de déphasage	محول إزاحة الطور
Pitch	Pas	خطوة

Photoelectric cell	Cellule photo electrique	خلية كهرضوئية
Points of interconnection	Point d' interconnection	نقاط الاتصال
Polarization	Polarisation	استقطاب
Pollution	Pollution	التلوث
Pole positive	Pôle positif	قطب موجب
Potential difference	Difference de Potential	فرق الجهد
Potential divider	Diviseur de potentiel	مجزئ الجهد
Potential gradient	Gradient de puissance	تدرج الجهد
Power Commond	Commande de puissance	أمر الاستطاعة
Power	Puissance	استطاعة
Power factor	Facteur de Puissance	عامل الاستطاعة
Power Transformer	Transformateur de puissance	محول القدرة
Prefault	Prédéfaut	قبل العطل
Pressure	Pression	الضغط
Preventive maintainance	Entretien préservatif	صيانة وقائية
Primary	Primaire	أولي
Probability	Probabilité	احتمال
Propagation Constant	Constante de propagation	ثابت الانتشار
Protective relays	Relay de protection	زاجل (ريليه) حماية
Proximity effect	Effet de Proximité	أثر التجاور

Q

Quality	Qualité	نوعية
Quantity of electricity	Quantité d électricite	كمية الكهرباء

R

Radial	Radial	متشعب
Radiation	Rayonnement	إشعاع
Radio interference	Interference radio	تداخل الأمواج الراديوية
Rated load	Charge nominal	الحمل الاسمي
Ratio	Rapport	نسبة
Reactance	Réactance	مفاعلة
Reactance characteristics	Caractéristiques de la reactance	خصائص المفاعلة
Real power	Puissance reélle	الاستطاعة الحقيقية
Reactive power	Puissance Réactif	استطاعة ردية
Receiving power circle diagram	Diagrammes du cercle Coupe-circuit à refermeture	دائرة الاستطاعة في جهة الاستقبال
Reference vector	Vecteur référence	شعاع المرجع
Rectification	Redressement	تقويم
Regulation	Régulation	تنظيم
Regulation System	Système de régulation	مجموعة التنظيم
Reliable	Fiable	موثوق
Reliability	Fiabilité	موثوقية
Reluctance	Réluctance	الممانعة

Damascus University

Representation	Representation	تمثيل
Residual magnetism	Magnetisme remanent	المغنطية المتبقية
Resistivity	Resistance	مقاومة
Resonance	Résonance	رنين
Response	Réponse	جواب
Resultant	Resultante	محصلة
Return current	Courant de retour	تيار عائد
Ring System	Système de boucle	نظام حلقي
Root mean square	Effectif	متوسط الجذر التربيعي
Rotor	Rotor	دوار
Round armature	Armature lisse	متحرض دائري ذو أقطاب ملساء
Rule	Rôle	قاعدة

S

Safety valve	Soupape de sécurité	صمام الأمان
Sailient Armature	Armature à poles saillants	متحرض ذو أقطاب بارزة
Saturation	Saturation	تشبع
Scale	Echèlle	قياس
Schematic diagram	Diagramme schématique	رسم بياني تخطيطي
Secondary	Secondaire	ثانوي
Screened cable	Cable blindé	كابل بحجاب
Self-admittance	Self-admittances	مسايرات ذاتية

Second law of kirchhoff	Deuxième loi de kirchhoff	القانون الثاني لكيرشوف
Self Inductance	Self inductance	محارضة ذاتية
Selectivity	Selectivite'	انتقائية
Series	Serie	تسلسلي
Sensitivity	Sensibilite'	حساسية
Series impedance	Impédance en serie	ممانعة تسلسلية
Sheath	Gaine –paroi	غمد، غلاف
Short-circuit	Court-circuit	دارة قصر
Shunt capacitance	Capacite en Parallèle	سعة تفرعية
Shunt impedance	Impedance en parallèle	ممانعة تفرعية
Shunt trip	Déclencheur à bobine dérivation	وسيلة إعتاق على التوازي
Single Phase	Mono Phase	وحيد الطور
Simulation	Simulation	محاكاة
Sine wave	Onde sinusoidale	موجة جيبية
Slot	Encoche	أخدود– شق
Skin effect	Effet pelliculaire	الظاهرة القشرية
Solution	Solution	حل
Solar power station	Central solaire, usine solaire	محطة قدرة شمسية
Source	Source	مصدر
Speed Controller	Regulateur de vitess	منظم سرعة
Stability	Stabilité	استقرار

Damascus University

Speed-up	Accélérer	يتسارع
Squirrel-cage rotor	Rotor à cage d écureuil	دائر بقفص سنجاني
Stability limit	Limit de stabilité	حد الاستقرار
Stabilizer	Stabilisateur	منظم الجهد
Star-delta transfor mation	Transformation étoile' triangle	تحويل نجمي مثلثي
Star point	Point neutre	نقطة النجمة
Station	Station	محطة
Stator	Stator	الثابت
Steady state	Etat Permanent	الحالة الدائمة (الثابتة)
Steady state stability	Limite de stabilité en e'tat permanent	حدود الاستقرار في الحالة الدائمة
Steam	Vapeur	بخار
Steam generator	Generateur à vapeur	مولد بخاري
Step-up transformer	Transformateur survolateur	محول رفع
Stored energy	Energie emmagasinée	القدرة المختزنة
Stranded cable	Câble torsadé	كبل مجدول
Stress	Contrainte	إجهاد
Substation	Post électrique	محطة فرعية
Super conduting	Super conductif	النواقل الممتازة
Suspension Insulator	Isolateur suspendu	عازل تعليق
Summation	Sommation	الجمع

Damascus University

Symmetric	Symétrique	متناظر
Symmetrical components	Composantes symétrique	المركبات المتناظرة
Synchronous	Synchrone	متواقت
System	Système	نظام
Synchronization	Synchronisation	المزامنة

T

Tachometer	Tachymétre	تاكو متر(عداد قياس سرعة)
Toppings	Prises	مآخذ
Tapchanger	Commutateur à prises de néglage	معيد التفريع
Term	Terme	حد
Tariff	Tarif	تعريفة
Three phase	Triphasé	ثلاثي الطور
Thermal power station	Central thermique	محطة حرارية
Three-phase Faults	Defauts triphasés	أعطال ثلاثية الطور
Thermal Resistance	Résistance thermique	مقاومة حرارية
Thévenin's theorem	Theoreme de thevenin	نظرية ثفنين
Tolerence	Tolerance	تسامح
Time constant	Constante de temps	الثابت الزمني
Time delay	Action retardeé	تأخير زمني
Topology	Topolgie	طوبولوجيا

Torque	Couple	عزم
Torque Angel	Angle de couple	زاوية العزم
Tower	Pylone	برج
Transformer	Transformateur	محولة
Transformer ratio	Rapport de transformation	نسبة التحويل
Transient stability	Stabilité transitoire	الاستقرار العابر
Transient-state	Etat-transitoire	الحالة العابرة
Transmission	Transmission	نقل
Transmission network	Réseau de transport	شبكة النقل
Transmission capacity	Capacité de transmission	سعة النقل
Transmission loss	Perte de transmission	ضياع النقل
Transmission route length	Longeur du tracé	طول مسار النقل
Transposed	Transposé	متبادل
Transposition	Transposition	التبادل
Turbo generators	Turbo generateurs	مولدات عنفية
Turn	Tour spire	لفة
Turn ratio	Rapport du nombre de spires	نسبة عدد اللفات

U

Under ground cable	Cable souterrain	كبل تحت أرضي
Undervoltage protection	Protection a tension minimale	حماية من انخفاض الجهد
Uniform	Uniform	منتظم

Unit charge	Unité de charge	وحدة الشحن
Uninterruptible power supply	Alimentation ininterrompue en courant	وحدة عدم انقطاع التغذية

V

Vacunm	Vide	فراغ،خلاء
Valiadity	validité	صلاحية
Value	Valeur	قيمة
Variables	Variables	متحولات
Vector diagram	Diagramme de vecteur	مخطط شعاعي
Velocity	Vitesse	سرعة
Velocity of propagation	Vitesse de propagation	سرعة انتشار
Voltage divider	Diviseur de tension	مجزئ جهد
Voltage regulation	Regulation de tension	ضبط التوتر
Voltage sources	Sources de tension	منابع التوتر

W

Wave lenght	Longueur d’onde	طول الموجة
Wave traveling	Le départ d’onde	رحيل الموجة
Winding	Enroulement	لفة

Damascus University

وقل رب زدني علما
جامعة دمشق
Damascus University

المراجع
العربية والأجنبية

1- د.علي حمزة – نظم القدرة الكهربائية /1/ منشورات جامعة دمشق، 1987.

2- د. علي حمزة – نظم القدرة الكهربائية /2/ منشورات جامعة دمشق، 1987.

3- د.تيسير اليسير- نظم القدرة الكهربائية/ الجزء الأول/ جامعة حلب، 1983 .

4- د.تيسير اليسير- نظم القدرة الكهربائية /الجزء الثاني/ جامعة حلب، 1983 .

5- د. كاميليا يوسف محمد - المحولات الكهربائية /الإسكندرية/2001 .

6 -Hadi Saadat, Power System Analysis -McGraw-Hill, 1999.

7- Zia A.Yamayee, Electromechanical Energy Devices and Power System, John Wiley& Sons-Inc, 1994.

8- John J.Grainer, William D.Stevenson. Jr, power System Analysis, McGraw-Hill,1994

9- Arthur R.Bergen, Vijay Vittal, Power System Analysis, Prenticehall, 2000.

10- Syed A. Nasar, F.C.Trutt, Electric Power Systems,CRC Press, 1999.

11- Mehta V.K. Principles of Power System, CHAND company LTD,2002.

12- Gupta J.B, Power System,S.K. KATARIA & Sons,2001 13-
Wadhwa C.L, Electrical Power Systems, John Wiley & Sons,
1983.
14- Weedy B.M, Electric Power System, John Wiley & Sons,
1983.
15- Nagrath I.J, Modern Power System Analysis, McGraw-Hill,
1994.
16- Siemens, Electrical Installations Handbook, Part I, II, III,
John Wiley & Sons, 1987.
17-Group Schneider, Electrical Installation Guide, 1996.

Damascus University

اللجنة العلمية:

- الأستاذ الدكتور سميح الجابي
- الأستاذ الدكتور علي حمزة
- الأستاذ الدكتور هاشم أبو الخير

المدقق اللغوي : الدكتورة هدى الصحناوي

حقوق الطبع والترجمة والنشر محفوظة لمديرية الكتب والمطبوعات