الفصل الأول

المفاهيم الأساسية لحماية نظم القدرة الكهربائية

١-١ معلومات أساسية :

قبل البدء بدراسة أنظمة الحماية والأتمتة، من المفيد أن نلقي نظرة على شكل الشبكات الكهربائية وبنيتها بشكل عام وذلك لوجود علاقة متبادلة بين شكل الشبكة بنيتها ونظام الحماية والأتمتة الواجب استخدامها كي تقوم أجهزة الحماية بالعمل والتنسيق وحماية عناصر نظام القدرة وفي الشروط المطلوبة منها.

١-١-١ مستويات التوتر في نظم القدرة :

تصمم الشبكات الكهربائية لتعمل على توترات مختلفة تتعلق قيمتها بنوع الشبكة ووظيفتها، إذ تقسم الشبكات بشكل عام إلى :

آ- شبكات نقل أساسية :

وهي عبارة عن خطوط التوتر العالي $220-400[kV]$ التي تنقل الطاقة من محطات التوليد ضمن البلد لمسافات بعيدة لتغذي شبكات التوزيع الرئيسة $66-120[kV]$. وهذه الشبكات تكون على الأغلب حلقية، وتستخدم على شكل شبكات ربط بين البلدات المجاورة .

ب- شبكات نقل وتوزيع رئيسة $66-120[kV]$:

وهي عبارة عن مجموعة من الخطوط التي تغذي شبكات التوتر المتوسط $20-30[kV]$ عبر محطات التحويل ، وذلك لتغذية المدن والمناطق البعيدة نسبياً ضمن المحافظات .

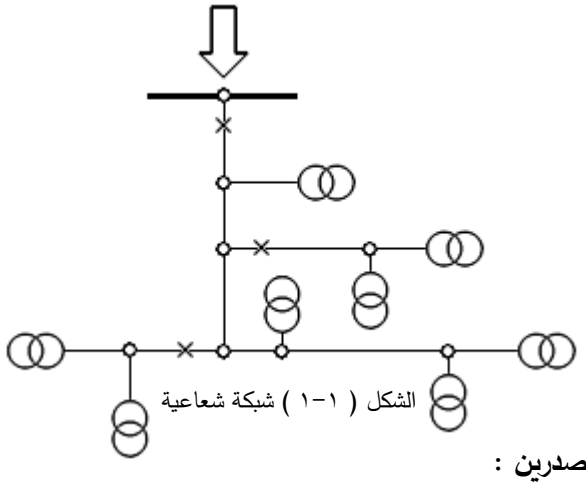
ج- شبكات التوتر المتوسط $20-30[kV]$:

وهي عبارة عن شبكات شعاعية تغذي المدن والأرياف ، وعادة يكون جزء منها خطوطاً هوائية، والجزء الآخر كبلات كهربائية، وتغذي شبكات التوزيع الثانوية $0,4[kV]$ أو بعض الأحمال والتجهيزات بتوتر $6[kV]$.

١-١-٢ بنية الشبكات الكهربائية :

آ- شبكات شعاعية :

تسمى الخطوط أو الشبكات التي تغذى من مصدر طاقة واحد فقط بالشبكات الشعاعية، الشكل (١-١)، ونلاحظ من الشكل أن الشبكة تغذى من مصدر وحيد للطاقة، إذ نجد خطاً رئيساً يتفرع عنه خطوط فرعية تغذي المستهلكين عبر محولات متعددة . يجب تطبيق نظام حماية زيادة التيار، وتحقيق الانتقائية من خلال تحديد منطقة العطل وفصل الجزء الخاص بالعطل كي تستمر التغذية لباقي العناصر في الجملة .



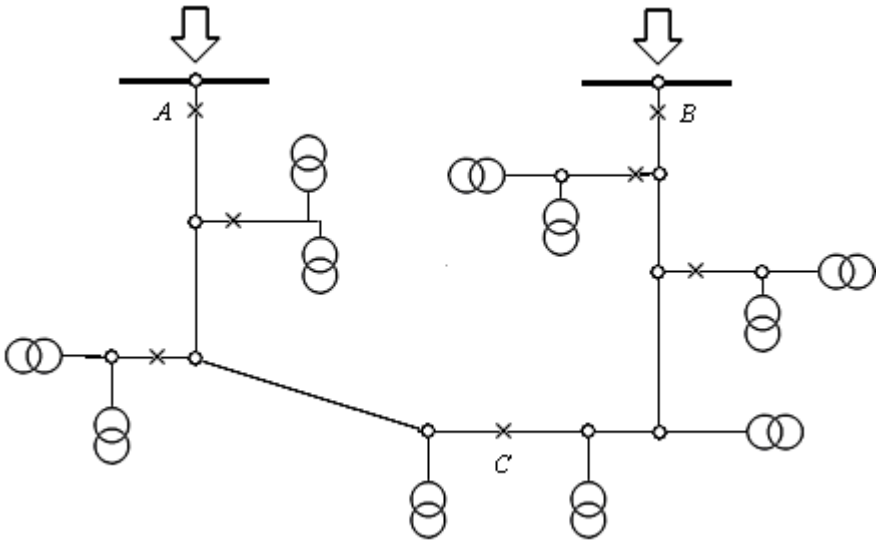
الشكل (١-١) شبكة شعاعية

ب- شبكة تغذى من مصدرين :

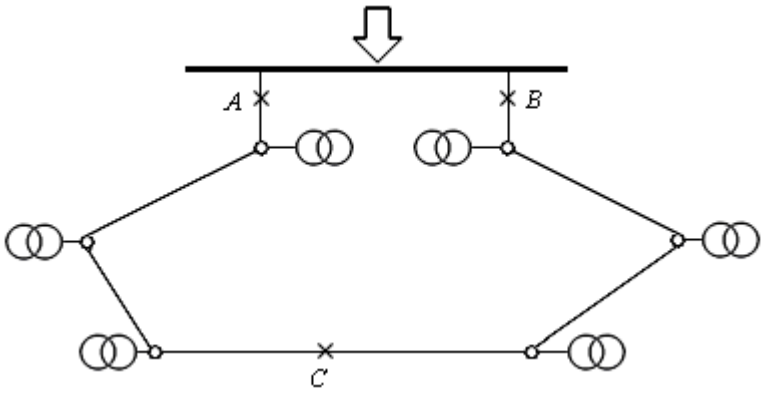
يبين الشكل (١-٢) شبكتين شعاعيتين تتصلان بعضهما مع بعض عبر القاطع (C) لتأمين التغذية الكهربائية في حال حدوث عطل على أحد مصدري التغذية، لكن الوضع الطبيعي للتشغيل يكون شبكتين شعاعيتين . وبعد فصل القاطع (C) يدرس نظام الحماية في هذه الجملة على أساس خطين شعاعيين ، وتتم الحماية لكل خط بحماية زيادة تيار.

ج- شبكة حلقية ذات مصدر تغذية واحد :

يبين الشكل (١-٣) شبكتين شعاعيتين تشكلان شبكة حلقية واحدة عند وصلها مع بعضها بوساطة قاطع (C) ، وتعملان بوصفهما شبكتين شعاعيتين مستقلتين في حالة التشغيل الطبيعي بعد فصل القاطع (C) . يمكن اعتبار الجملة شعاعية من جهة الحماية، وتتم الحماية بحاكمات زيادة التيار لكل خط .



الشكل (١-٢) شبكة ذات مصدري تغذية

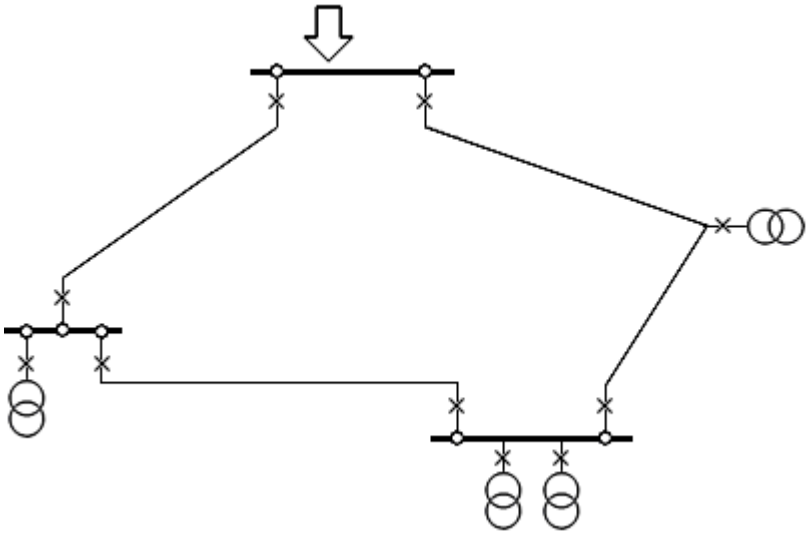


الشكل (١-٣) شبكة حلقية تغذى من مصدر واحد

ميزة هذه الشبكة المبينة في الشكل (١-٣)، أنه في حال حدوث عطل ما وفصل قاطع أحد فرعي الشبكة (القاطع A مثلاً) يمكن تغذية باقي عناصر الفرع $(A-C)$ الطبيعية بعد إغلاق القاطع (C) الذي يصل بين الخطين الرئيسين للشبكة .

د- شبكة حلقية ذات محطات تحويل متعددة :

يبين الشكل (١-٤) خطي تغذية كهربائية ينطلقان من مصدر تغذية واحد وحيد ، ليوصلا عدة محطات تحويل بعضها مع بعض ويشكلا حلقة كهربائية، تدرس حماية هذه الشبكة كخطوط تغذية مستقلة. يحتاج نظام الحماية إلى عدة قواطع ، وتنسيق زمني مناسب .

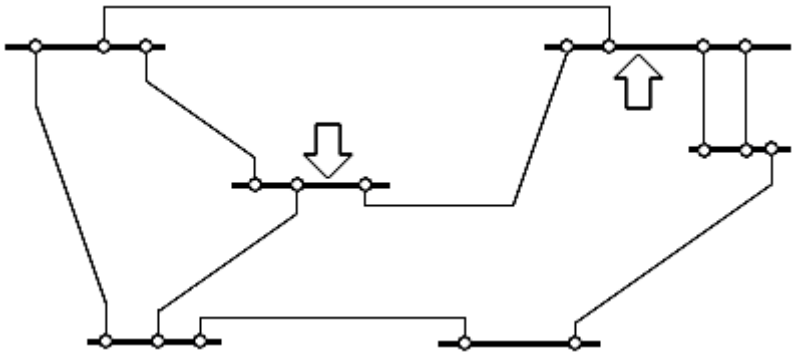


الشكل (١-٤) شبكة حلقية ذات محطتي تحويل

تتم الحماية في حالات القصر باستخدام حاكمات حماية زيادة التيار مع حاكمات حماية اتجاهية، أو حمايات من التيارات الأرضية تتحسس على المركبة الصفرية للتيار.

هـ- شبكة حلقية ذات مصادر تغذية ومحطات تحويل متعددة :

يبين الشكل (١-٥) مجموعة خطوط تغذية – حماياتها مستقلة – تصل بين عدة عقد كهربائية مما يتيح تغذية الأحمال الموصولة إلى تلك العقد من عدة اتجاهات حسب وجود مصادر التغذية .



الشكل (١-٥) شبكة حلقية ذات مصدري تغذية

في هذا النظام ، يزداد عدد حاكمات الحماية وتتعدد أنواعها، إضافة إلى ضرورة تحقيق تنسيق زمني ، والتحكم بسريان الاستطاعة لتحقيق الانتقائية، علماً أن قيم تيارات القصر

واتجاهاتها تتعلق بمكان حدوث القصر، وتتم حماية مثل هذا النظام باستخدام حمايات مسافية في حالات الخطوط الطويلة إضافة إلى الحمايات الاتجاهية، أو حاكمات تفاضلية في حالات الخطوط القصيرة .

١-٢ الشروط غير الطبيعية لعمل نظام القدرة :

تصمم عناصر نظام القدرة الكهربائية جميعها والتجهيزات والآلات المنتجة والمستهلكة للطاقة كافة لتعمل عند قيم اسمية للتردد $f_N[Hz]$ ، والتوتر $U_N[V]$، والتيار $I_N[A]$. وإن المطلوب من نظام القدرة الكهربائي تقديم الكهرباء للمستهلكين بشكل مستمر في المكان المطلوب والزمن المحدد وبنوعية جيدة ، أي بتوتر محدد ثابت وتردد $50-60[Hz]$.

إن التغير الدائم للحمولات وبعض الحالات الطارئة على الشبكة يؤدي أحياناً إلى انحراف عن القيم الحقيقية الاسمية للتيار والتوتر والتردد ، زيادة أو نقصاناً ، وتُعد هذه التغيرات مقبولة إذا كانت ضمن الحدود الطبيعية المسموحة، وفي حال تجاوزها لتلك القيم تعمل الشبكة بشروط غير نظامية. وبما أن نظام القدرة هو نظام ثلاثي الطور، فمن الضروري أيضاً أن تعمل عناصره (مولدات ، محولات ، خطوط نقل ، أحمال مختلفة) بشكل متناظر، وغير ذلك يُعد خللاً في أداء الشبكة ويؤثر في عمل عناصر الشبكة، وقد يؤدي في بعض الحالات إلى عدم استمرار تغذية المستهلكين .

١-٢-١ حالات العمل غير الطبيعية :

آ- زيادة الحمل :

عند زيادة الحمل على عناصر نظام القدرة الكهربائي (محركات ، مولدات ، محولات خطوط نقل وتوزيع ، .. إلخ)، أي زيادة تيار الحمل يسبب ذلك رفع درجة حرارة العنصر وبالتالي زيادة الضياعات حسب قانون جول ، ويؤدي أحياناً إلى تلف العنصر والتجهيزات ، وإذا استمر ارتفاع درجة الحرارة يمكن أن يؤدي ذلك إلى ظهور بعض حالات القصر التي تسبب انخفاضاً في التوتر وزيادة كبيرة في التيار وانتشار كمية كبيرة من الحرارة حسب العلاقة الآتية :

$$Q=\int_0^t I^2.R.dt \qquad (1.1)$$

ويجب تأمين الحماية اللازمة باستخدام المنصهرات ، أو قواطع حماية حرارية، وحاكمات حرارية .. إلخ .

ب– فشل العازلية :

يعود فشل العازلية في الآلات والشبكات إلى حدوث توترات عابرة خطرة ذات منشأ خارجي كضربات الصواعق التي تنتج تيارات بحدود $30-50[kA]$ أو أكثر، وتؤدي إلى ظهور توترات عالية، أو ذات منشأ داخلي كمناورات خاطئة على خطوط نقل القدرة ، وهنا يجب تأمين الحماية اللازمة باستخدام حاكمات حماية خاصة أو مفرغات الجهد . ومن المناسب أن نذكر أن الأعطال الناتجة من الأحوال الجوية تكون من النوع الهارب ، أي أنها تختفي عند فصل العنصر الذي وقع عليه العطل ، كما يمكن أن يكون سبب فشل العازلية سوء مواصفات المواد المستعملة في صناعتها، أو أخطاء التصنيع ، أو التقادم أيضاً .

ج– عدم التناظر :

تظهر حالات عدم التناظر إما بالتوتر أو بالتيار بالاثنين معاً، وسببها يعود إلى عدم توازن الأحمال ، أو بعض الأعطال أو إلى حالات الوصل والفصل السريع. بعض حالات عدم التناظر تسبب ظهور المركبات السالبة والصفرية، التي بدورها تزيد الضياعات وتقلل من مردود الآلات نتيجة ارتفاع درجة حرارتها. يمكن التقليل أو تجاوز الأضرار الناتجة من تلك الظواهر باستخدام حمايات من زيادة الأحمال ، وفي المولدات المتواقتة الحديثة تستخدم حاكمات من المركبات السالبة التي تفصل الآلة عن الخدمة عند درجة تعيير محددة .

د– اضطرابات التردد :

إن اضطرابات التردد تعني انحراف التردد عن القيمة الاسمية لسبب ما أو بسبب حالات عدم الاستقرار في نظام القدرة التي ينتج منها اهتزازات واضطرابات معينة. إن وجود خلل بسيط في ميزان الطاقة – أي انحراف قليل من التوليد والاستهلاك ، وهذا شيء شائع – يسبب انحراف التردد عن القيمة الاسمية، وإذا زاد الخلل في ميزان الطاقة يزداد الانحراف في التردد إلى الحدود غير المسموحة مما يسبب اضطراب في عمل الآلات والتجهيزات الكهربائية، وقد يسبب أيضاً في بعض الحالات عدم استقرار في نظام القدرة . ولتصحيح الخلل يمكن استخدام حماية من

انخفاض التردد تفصل بعض الأحمال بشكل آلي حسب الأولوية، وقد يكون الفصل يدوياً أيضاً بهدف إيجاد توازن واستقرار في نظام القدرة .

هـ– اضطرابات في التوتر :

تظهر بعض الاضطرابات في التوتر في أثناء عمل نظام القدرة وخاصة في حالات العمل غير الطبيعي التي تسببها زيادات التوتر الناتجة من عوامل متعددة (جوية – عمليات وصل وفصل بعض التجهيزات والآلات ، حالات طنين ، سوء عمل بعض منظمات التشغيل .. إلخ) تؤدي إلى إجهادات كبيرة على عناصر نظام القدرة قد تلحق الضرر والتلف بها، لذا يجب تأمين حماية من زيادة التوتر. كما أن الانخفاض في التوتر لمدة طويلة مع استجرار ثابت للاستطاعة يؤدي إلى زيادة الحمل في عناصر نظام القدرة وسوء التغذية الكهربائية للمستهلكين ، في مثل هذه الحالات يجب العمل على تنظيم التوتر تحت الحمل . بشكل عام إن الاهتزاز في التوتر يؤثر أيضاً بشكل سلبي في الإضاءة والعمر الفني لمصابيح الإنارة ، وكذلك في سرعة دوران المحركات الكهربائية، وهنا لابد من القول إن بعض الاهتزازات ناتجة من الأقواس الكهربائية والأفران ، وكذلك من دارات التحكم الترانزستورية، ويمكن التخلص من هذه الظواهر بإزالة الأسباب والمعالجات الفنية لتلك الحالات .

و– ظهور التوافقيات العليا :

يسبب نشوء التوافقيات العليا تشويه شكل الموجة الجيبية للتيار والتوتر، وبالتالي تؤدي إلى زيادة الضياعات في الشبكة، والمدروجات العالية جداً تُعد ملوثات للشبكة الكهربائية ومنابع للضجيج ، ويمكن التخلص من هذه الظواهر بوضع فلاتر تنقية للموجة الكهربائية في مكان نشوء التوافقيات .

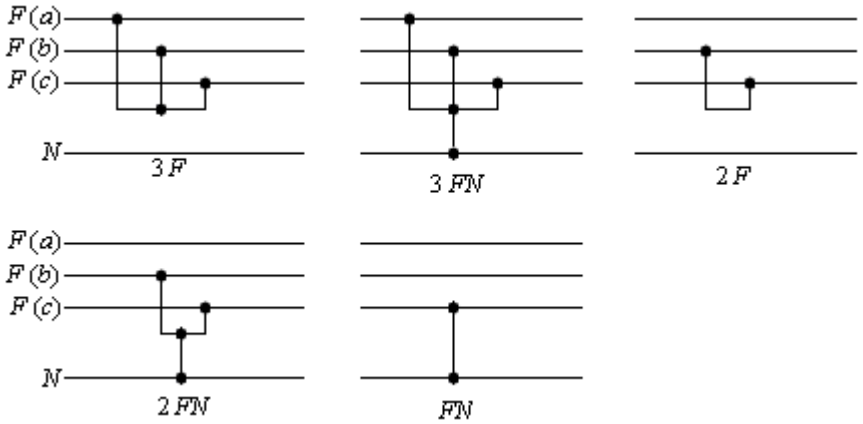
١–٢–٢ أعطال القصر :

يكون نظام القدرة عادة ثلاثي الطور وفي حالة توازن في ظروف التشغيل الطبيعية، ولكن عند حدوث أي قصر فإن النظام يتحول إلى جملة غير متوازنة للتيارات والجهود ما عدا العطل ثلاثي الطور والذي يُعد عطلاً متناظراً . باستخدام المركبات المتناظرة ، وبتعديل منابع النظام بمنبع في نقطة العطل وإيجاد الدارة المكافئة له ، بعد حدوث القصر يمكن دراسة شروط العطل

وتحليلها . ويُعرّف القصر بأنه تلامس نقاط مختلفة التوتر في الجملة الكهربائية بعضها مع بعض أو تلامسها مع الأرض بشكل مباشر، فنسمي الحالة الأولى حالة قصر بين الأطوار، والحالة الثانية حالة قصر مع الأرض ، وتحصل حالات قصر بين ملفات الطور الواحد كما في المولدات والمحولات . ونرمز لحالات القصر كما يلي :

قصر ثلاثي الطور	$3F$
قصر ثلاثي الطور مع الأرض	$3FN$
قصر بين طورين	$2F$
قصر طورين مع الأرض	$2FN$
قصر طور مع الأرض	FN

وسوف نكتفي بدراسة أعطال القصر فقط ، لأنها مفيدة في تعيير عناصر الحماية والتحكم وتنسيقها . وقبل البدء بتحليل حالات القصر هذه لابد أن نذكر أيضاً أعطالاً أخرى تطرأ على الشبكة مثل انقطاع أحد ألأطوار، أو انقطاع خطين ، أو عدم إغلاق القاطع الآلي أو قواطع الوصل والفصل ، هذه الحالات جميعها تؤدي إلى عدم التناظر في الشبكة وتنخفض الاستطاعة المنقولة على الخطوط ، وقد تسبب عدم استقرار النظام . ونبين في الشكل (١-٦) حالات القصر المختلفة التي تطرأ على نظام القدرة الكهربائي .



الشكل (١-٦) يبين حالات القصر المختلفة

أولاً– حسابات الأعطال المتناظرة Symmetrical Faulte :

آ– استطاعة القصر الثلاثية :

يعرف القصر بين الأطوار الثلاثة بأنه عطل متناظر، ويكون هذا العطل عادة مسبباً عن أعطال أخرى غير متناظرة بشكل عام. ويتم حساب استطاعة القصر $MVA_{s.c}$ في مختلف الشبكات عند تصميمها بقصد اختيار استطاعة القصر للقواطع الآلية العائدة لهذه الشبكات . تصمم شبكات التوتر المختلفة على استطاعة قصر، ويبين الجدول (١-١) حدودها الدنيا .

الجدول (١-١) يبين استطاعات القصر

التوتر *kV*	20	66	250	400
استطاعة القصر *MVA*	250	1500	5000	10000

وعادة ، يتم افتراض أعطال متناظرة على قضبان التجميع الرئيسة في المحطات لحساب استطاعات القصر التي بمعرفتها يمكن حساب التأثيرات للقوى الديناميكية الناتجة من تيارات القصر والتي تؤخذ بالاعتبار عند التصميمات الميكانيكية في محطات التوليد .

تحسب استطاعة القصر من العلاقة الآتية :

$$(MVA)_{s.c} = \frac{(MVA)_{base}}{Z_{eq}} \qquad (1.2)$$

حيث $(MVA)_{base}$: الاستطاعة المختارة كأساس للاستطاعة الظاهرية .

Z_{eq} : الممانعة المكافئة للشبكة مقاسة بالنسبة إلى نقطة العطل مقدرة بالقيمة الواحدية ومنسوبة إلى أساس الاستطاعة الظاهرية المختارة .

يحسب تيار القصر من العلاقة الآتية :

$$I_{s.c} = \frac{(MVA)_{s.c}}{\sqrt{3}\ (kV)} \qquad (1.3)$$

حيث (kV) : هو توتر الأساس في الجهة التي يقع فيها القاطع الآلي أو النقطة التي يراد حساب تيار العطل فيها .

يحسب تيار العطل بالقيمة الواحدية من العلاقة الآتية :

$$I_{s.c} = \frac{1}{(Z_{eq})\,pu} \qquad (1.4)$$

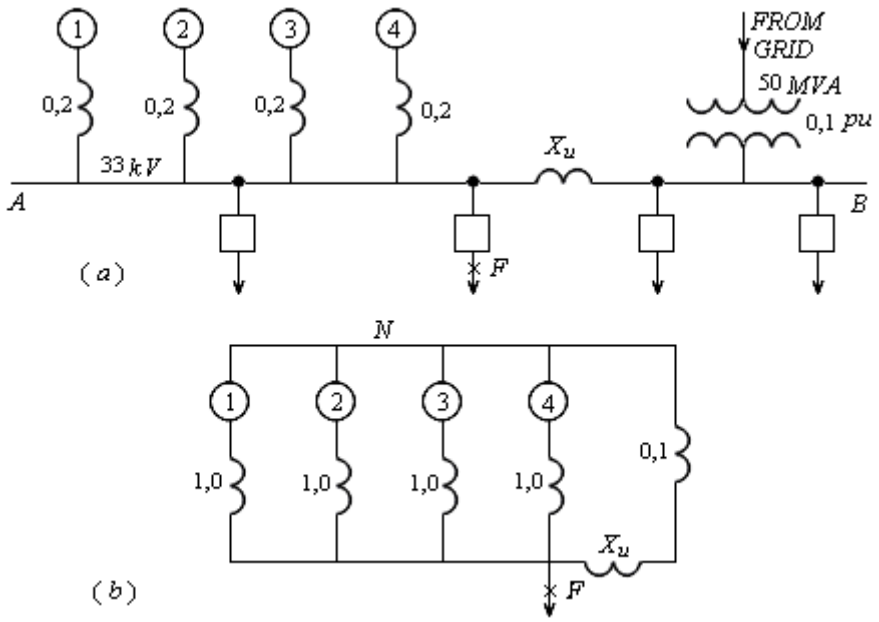
هذا ونشير إلى أنه في حسابات القصر تهمل الأحمال في معظم الأحيان لأن ممانعاتها تكون أكبر بكثير من الممانعة المكافئة لعناصر الشبكة . كما وتهمل عادة المقاومات المادية للخطوط والمحولات والمنوبات لعدم تأثيرها بشكل ملموس في قيمة Z_{eq} .

مثال (١): يبين الشكل (١-٧) قضيب تجميع $33[kV]$ مؤلف من قسمين A ، B متصلين عبر مفاعلة X_u .

يغذى القسم A من أربع مولدات ، استطاعة المولدة $10[MVA]$ ، $X_g = 0{,}2[pu]$.

ويغذى القسم B من الشبكة عبر محولة $50[MVA]$ ، $X_T = 0{,}1[pu]$. استطاعة القصر $500[MVA]$ لكل قاطع . والمطلوب :

أوجد قيمة المفاعلة X_u كي لا تصبح قواطع الدارة محملة بشكل كبير عند حدوث قصر متناظر F على أحد الخطوط المغذاة من المحطة .



الشكل (١-٧)

الحل : نعتبر استطاعة الأساس : $S_b = 50[MVA]$

تكون مفاعلة كل مولد : $[pu]\ X_G = 0,2.\frac{50}{10} = 1$

المفاعلة المشتركة للمولدات : $X_{\underset{1-4}{G}} = \frac{1}{4} = 0,25\ [pu]$

المفاعلة المكافئة للمفاعلة والمحول : $X_T = X_u + 0,1$

نحسب المفاعلة الكلية بالاعتماد على نظرية ثفينين :

$$X_T = \frac{0,25(X_u + 0,1)}{0,25 + X_u + 0,1} = \frac{0,25(X_u + 0,1)}{X_u + 0,35}$$

استطاعة القصر عند النقطة F :

$$S_{s.c} = \frac{S_b}{X_T} = \frac{50(X_u + 0,35)}{0,25(X_u + 0,1)}$$

يجب ألاً تتجاوز استطاعة القصر $500[MVA]$ كي لا تجهد القواطع ، أي :

$$\frac{50(X_u + 0,35)}{0,25(X_u + 0,1)} = 500\ [MVA]$$

ومنه :

$$X_u + 0,35 = \frac{500 \times 0,25}{50}(X_u + 0,1)$$

$$2,5\,X_u - X_u = 0,35 - 0,25$$

$$X_u = \frac{0,1}{1,5} = \frac{1}{15} \quad [pu]$$

يحسب تيار الحمل الأعظمي منسوب الاستطاعة $500[MVA]$ من العلاقة الآتية :

$$I = \frac{S_b}{\sqrt{3}\ V_l} = \frac{50.10^6}{\sqrt{3}\ .33.10^3} = 874,8 \quad [A]$$

توتر الطور :

$$V_n = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{33000}{\sqrt{3}} = 19052,6 \quad [V]$$

المفاعلة بالقيمة الواحدية :

$$\frac{I\, X_\Omega}{V_n} = \frac{1}{15} = \frac{874,8\, X_\Omega}{19052,6}$$

$$X_\Omega = \frac{19052,6}{15.874,8} = 1,452 \quad [\Omega]$$

تحسب المفاعلة بالطريقة الآتية أيضاً :

$$Z_{pu} = Z(\Omega)\frac{[(MVA)_b].3\phi}{(MV_{lb})^2} = \frac{1}{15} = X_\Omega \frac{50}{(33)^2}$$

$$X(\Omega) = \frac{(33)^2}{15.50} = 1,452 \quad [\Omega]$$

ب– عطل ثلاثي الطور :

يُعد هذا العطل من أهم الأعطال في أنظمة القدرة الكهربائية، إذ يستفاد من تيار هذا العطل في تحديد مقدرة القصر للقاطع الآلي وإمكانه واستطاعته . وتعتمد طريقة حساب هذا التيار كالآتي :

- يتمثل نظام القدرة المعطى على شروط العطل بالدارة المكافئة للتتابع الموجب وبشكل أحادي الطور وكمرجع للطور a .
- جعل هذه الدارة اعتماداً على قيم أساس التوتر والتيار والممانعة .
- تحويل هذه القيم إلى القيم الأصلية .

يعتمد تمثيل نظام القدرة على تمثيل كل عنصر بالدارة المكافئة للتتابع الموجب ، أي مخطط الممانعة للطور الواحد لقيم أساس واحدة .

ج– حساب تيار العطل الكلي :

إذا كان العطل $3F$ أو $3FN$ فإن شروط نقطة العطل في نظام القدرة تعطى حسب الآتي :

$$V_a = V_b = V_c \qquad (1.5)$$

$$I_a + I_b + I_c = 0 \qquad (1.6)$$

كل القيم للتيارات والجهود هي قيم طور إلى حيادي من دون تيار حمولة .

إن تيار التتابع الصفري والسالب $I_2 = I_0 = 0$ ، لأن :

$$1 + a + a^2 = 0$$

أيضاً :

$$V_a + V_b + V_c = 0$$

$$V_a = V_b = V_c = 0$$

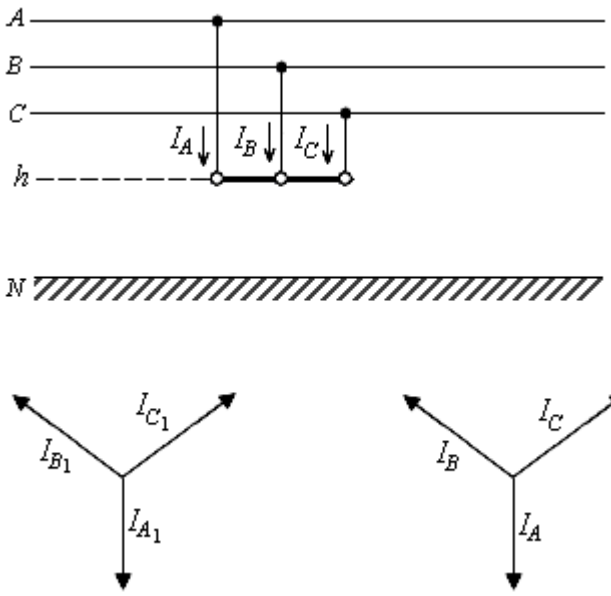
وينتج أن تيار العطل الكلي :

$$I_1 = \frac{V_{an}}{Z_1} \qquad (1.7)$$

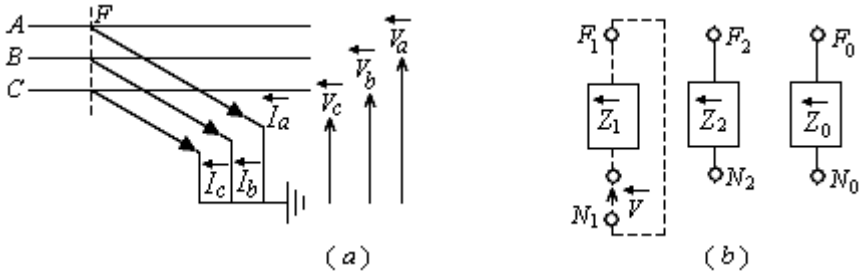
أي في حالة عطل ثلاثي الطور فإن تيار التتابع الموجب يساوي حاصل قسمة توتر نقطة النجم V_{an} قبل حدوث العطل على Z_1 ممانعة التتابع الموجب المكافئة على أطراف نقطة العطل مع الحيادي ، أي :

$$I_a = I_b = I_c = I_1 \qquad (1.8)$$

توضح الأشكال (١-٨)، و(١-٩)، طريقة تمثيل العطل ثلاثي الطور في نظام القدرة ، وتوصيل دارة التتابعات .

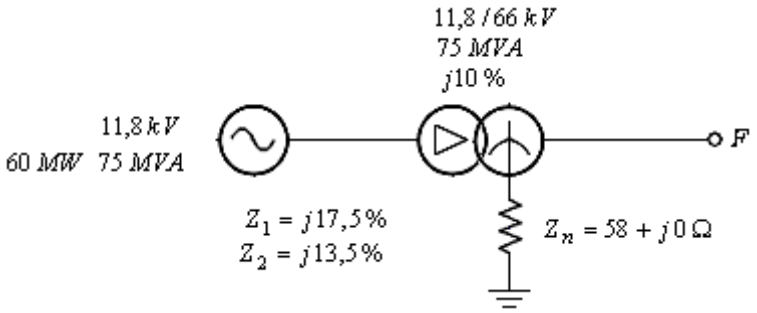


الشكل (١-٨) يبين عطل ثلاثي الطور والمخطط الشعاعي للتيار ومركبات التيار



الشكل (١-٩) يبين عطل ثلاثي الطور مع الأرض والدارة المكافئة Z_1

مثال (٢): من الشكل (١-١٠)، أوجد تيار العطل ثلاثي الطور في النقطة F . اعتبر توتر نقطة العطل قبل العطل $70[kV]$ ، واستطاعة الأساس $75[MVA]$.



الشكل (١-١٠)

الحل : ممانعة المولدة $Z_{G_1}(pu)$ على أساس $75[MVA]$ تساوي :

$$Z_{G_1}(pu) = j\frac{17,5}{100}.\frac{75}{75} = j\,0,175 \quad [pu]$$

ممانعة المحولة على قيمة الأساس نفسها تساوي :

$$Z_{T_1}(pu) = j\frac{10}{100}.\frac{75}{75} = j\,0,1 \quad [pu]$$

إن ممانعة التتابع الموجب Z_1 المكافئة عند نقطة العطل F تساوي مجموع الممانعات على التسلسل ، أي :

$$Z_1 = Z_{G_1} + Z_{T_1} = j\,0,175 + j\,0,1 = j\,0,275 \quad [pu]$$

إذا عَدَدنا توتر الأساس عند نقطة العطل $66[kV]$ ، يكون توتر نقطة العطل بالواحدة يساوي الآتي :

$$V_{an} = \frac{70}{6,6} = 1,06 \quad [pu]$$

ومنه :

$$I_L = \frac{1,06}{j\,0,275} = -j\,3,856$$

أو :

$$I_a = I_b = I_c = I_1 = 3,856$$

$$I_{base} = \frac{75.10^3}{\sqrt{3}\,.66} = 656 \quad [A]$$

تيار العطل ثلاثي الطور عند النقطة F :

$$I_{sc} = I_{base}.I_1 = 3,856 \times 656 = 2530 \quad [A]$$

ثانياً– حسابات الأعطال غير المتناظرة :

تمثل حالات القصر FN خطأً مع الأرض الشائعة غير المتناظرة. دراسة هذه الأعطال تفيد في معرفة شرط نظام القدرة ، والتي تتضمن طويلة تيار العطل واتجاهه وتوزيعه والتوتر

مكان تطبيق الزواجل ، لذا يمكن تصميم الحماية اللازمة واختيار زواجل الحماية وتعييرها لحماية كل عنصر من نظام القدرة للاستجابة للعطل بزمن أصغري بعد معرفة هذه المعلومات.

آ– المركبات المتناظرة :

ندرس المركبات المتناظرة لنظام القدرة لنتمكن من تحليل الشروط غير المتناظرة في نظام ثلاثي الطور، وذلك عن طريق تمثيل أشعة التوترات والتيارات بمجموعة من الأشعة المتناظرة والتي تتألف من :

- مجموعة التتابع الموجب (1) Positive Sequence
- مجموعة التتابع السالب (2) Negative Sequence
- مجموعة التتابع الصفري (0) Zero Sequence

إذا رمزنا للأطوار الثلاثة لنظام ثلاثي بـ a,b,c يكون التتابع الموجب للأطوار هو a,b,c ، والتتابع السالب للأطوار هو a,c,b .

نستخدم المركبات المتناظرة لحساب التيارات والتوترات والممانعات لنظام القدرة عند حدوث أعطال عليه .

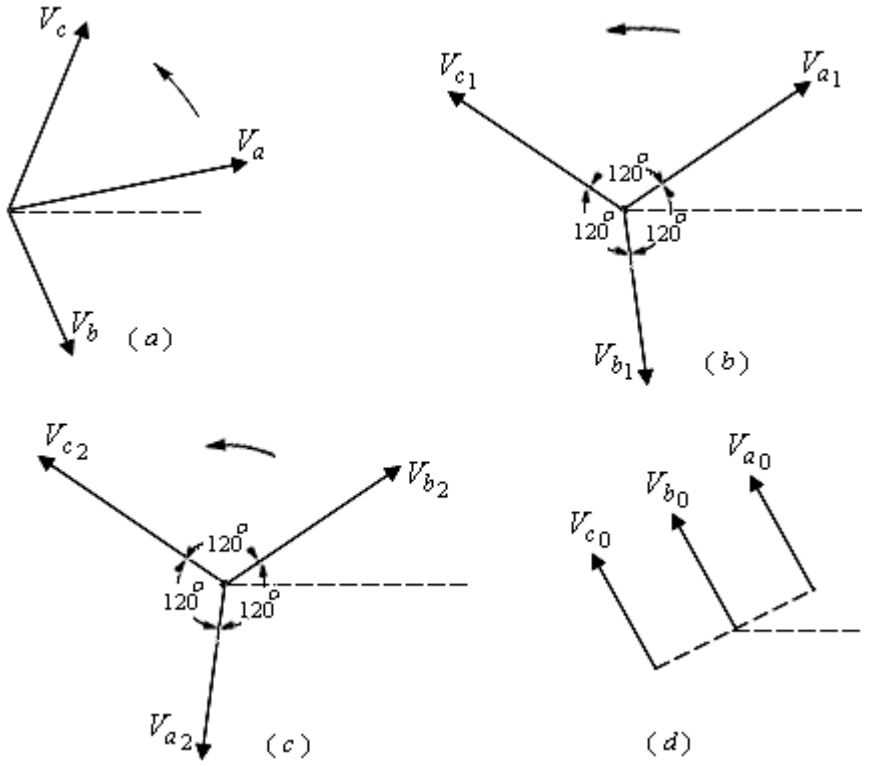
إذا عددنا التوترات V_a , V_b , V_c في نظام قدرة ثلاثي غير متوازن يمكن أن نكتب المركبات المتوازنة لهذا النظام كالآتي :

$V_{a_0} , V_{b_0} , V_{c_0}$ مركبات التتابع الصفري .

$V_{a_1} , V_{b_1} , V_{c_1}$ مركبات التتابع الموجب .

$V_{a_2} , V_{b_2} , V_{c_2}$ مركبات التتابع السالب .

يبين الشكل (١–١١) نظام قدرة غير متوازن ، والمركبات المتناظرة لهذا النظام .



الشكل (١-١١) يبين نظام قدرة غير متوازن ، والمركبات المتناظرة لهذا النظام

a- نظام غير متوازن ، b- المركبات الموجبة .

c- المركبات السالبة ، d- المركبات الصفرية .

كما أن شعاع كل طور من أطوار النظام هو المجموع الشعاعي لمركبات الطور الموجبة والسالبة والصفرية ، أي :

$$\left.\begin{aligned} V_a &= V_{a_0} + V_{a_1} + V_{a_2} \\ V_b &= V_{b_0} + V_{b_1} + V_{b_2} \\ V_c &= V_{c_0} + V_{c_1} + V_{c_2} \end{aligned}\right\} \qquad (1.9)$$

إذا أخذنا عامل التشغيل (a) بالاعتبار يمكن أن نحسب توترات الأطوار بدلالة مركبات الطور (a) الذي نختاره بوصفه مرجعاً ، وبذلك يمكن أن نكتب الآتي :

$$\left.\begin{aligned} V_a &= V_{a_1} + V_{a_2} + V_{a_0} \\ V_b &= a^2 V_{a_1} + a V_{a_2} + V_{a_0} \\ V_c &= a\, V_{a_1} + a^2 V_{a_2} + V_{a_0} \end{aligned}\right\} \qquad (1.10)$$

ويمكن كتابة التيارات أيضاً على الشكل الآتي :

$$\left.\begin{aligned} I_a &= I_1 + I_2 + I_0 \\ I_b &= a^2 I_1 + a\, I_2 + I_0 \\ I_c &= a\, I_1 + a^2 I_2 + I_0 \end{aligned}\right\} \qquad (1.11)$$

حيث عامل التشغيل a $\left(a = -\frac{1}{2} + j\,\frac{\sqrt{3}}{2} = 1\angle 120^o\right)$ هو شعاع عندما نضرب أي من قيمة شعاعية به يعمل على تدويرها بزاوية 120^o .

ب– ممانعات التتابع :

إن القيم Z_1, Z_2, Z_0 تمثل ممانعات النظام الموجبة والسالبة والصفرية من أجل التيارات الموجبة والسالبة والصفرية ، لذا يجب معرفة قيم هذه الممانعات لعناصر نظام القدرة من أجل حساب التيارات وتصميم الحماية اللازمة .

– في الآلات المتواقتة : تمثل الآلات بثلاث ممانعات هي :

X''_d : تمثل الممانعة فوق العابرة .

X'_d : تمثل الممانعة العابرة .

X_d : تمثل المفاعلة المتوافقة بالنسبة إلى التتابع الموجب . .

إن هذه الممانعات ضرورية لحساب تيارات الدارة القصيرة لأزمنة مختلفة .

بما أن المفاعلة فوق العابرة X''_d تعطي أعلى قيمة لتيار العطل البدائي ، تستعمل لحسابات التيارات القصيرة لتطبيق الزواجل ، بينما X'_d تستعمل من أجل دراسة الاستقرار.

ويمكن عدُّ مفاعلة التتابع السالب X_2 للآلة المتواقتة مساوية إلى المفاعلة X''_d ، بينما تكون مفاعلة التتابع الصفري X_0 أقل من هذه القيم ، ويجب أن تحتوي دارة التتابع الموجب على منبع للجهد الذي يمثل توتر الطور مع الحيادي .

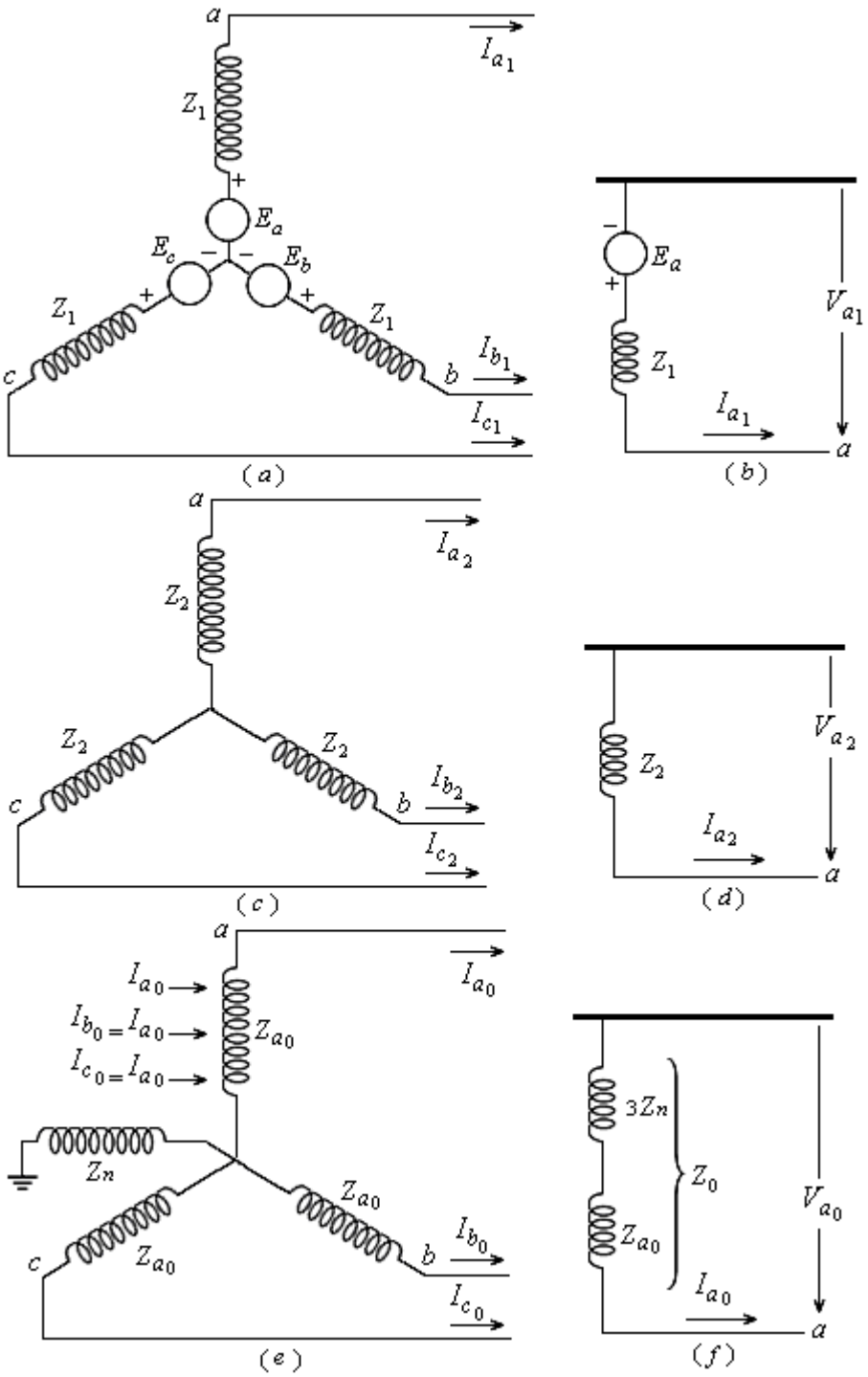
– في المحولات : مفاعلة التتابع الموجب والسالب للمحولات جميعها تكون متساوية، بينما مفاعلة التتابع الصفري ، إما أن تكون مساوية لممانعة التتابع الموجب ، وإما ذات قيمة لا نهائية، وهذا يعتمد على نوع نظام التأريض .

– في خطوط النقل : تُعد مفاعلات التتابع الموجب والسالب متساوية في خطوط النقل ، بينما مفاعلة التتابع الصفري تختلف عنهما ، حيث X_0 تمثل ممانعة الحلقة الأرضية التي تساوي إلى ممانعة الناقل مع الأرض وناقل العودة ويساوي عادة $X_0 = (2-3)\,X_1$ وربما أكثر من ذلك .

ج– دارات التتابع :

يفترض أن يكون نظام القدرة متناظراً لحظة ما قبل حدوث العطل ، أما في أثناء دراسة العطل فيجب تمثيل النظام بثلاث دارات مستقلة عن بعضها، وهي دارات التتابع الموجب والسالب والصفري (حسب نوع العطل)، كما يجب دراسة ممانعات التأريض وتمثيلها في الشبكة بثلاثة أضعاف قيمتها الأصلية، ومن الضروري دراسة سريان تيار التتابع الصفري في جملة ثلاثية الطور لمعرفة اختلافه في الأطوار (a,b,c) . بعد توصيل دارات التتابع الموجب والسالب والصفري يمكن حساب التوترات $(V_1\,,\,V_2\,,\,V_0)$ عند نقطة العطل .

يبين الشكل (١–١٢) الدارة المكافئة لمولدة ثلاثية الطور مع الدارات المكافئة الموجبة والسالبة والصفرية .



الشكل (١-١٢) يبين الدارات والممانعات المكافئة الموجبة والسالبة والصفرية

دارة التتابع الصفري يمر فيها التيار الصفري عبر ممانعة تعطى بالعلاقة الآتية :

$$Z_0 = 3Z_n + Z_{a_0}$$

من الشكل (١-١٢) نكتب المعادلات الآتية :

$$\left.\begin{aligned} V_{a_1} &= E_a - I_{a_1} Z_1 \\ V_{a_2} &= -I_{a_2} Z_2 \\ V_{a_0} &= -I_{a_0} Z_0 \end{aligned}\right\} \qquad (1.12)$$

حيث E_a : التوتر الطوري في حالة لاحمل وتساوي V_{an} .

Z_1 : ممانعة التتابع الموجب للمولد .

Z_2 : ممانعة التتابع السالب للمولد .

Z_0 : ممانعة التتابع الصفري للمولد + ثلاثة أمثال ممانعة تأريض نقطة الحياد.

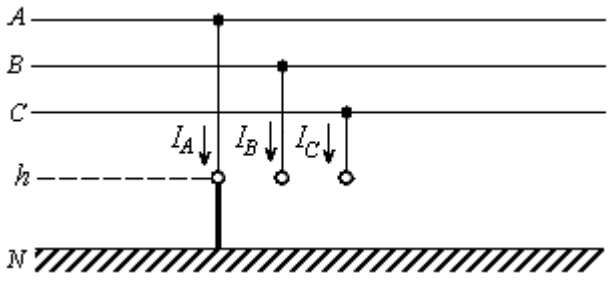
تطبق هذه المعادلات على المولدات كلها في حالة عدم التناظر، وهي نقطة الانطلاق لحسابات الأعطال .

د- المعادلات من أجل الأنواع المختلفة للأعطال :

نحسب أهم تيارات القصر وتوتراتها بين الأطوار والأرض ، بمعرفة التيار والجهد في نقطة العطل وفي أقسام مختلفة من عناصر الجملة، وبإهمال تيار الحمولة وممانعة العطل يمكن تحديد شروط العطل وتصميم الحماية اللازمة لعناصر نظام القدرة .

١- عطل خط مع الأرض (*SLG*) أو *FN* : Single Line to Ground

نلاحظ من الشكل (١-١٣) حالة قصر الطور (a) مع الأرض .



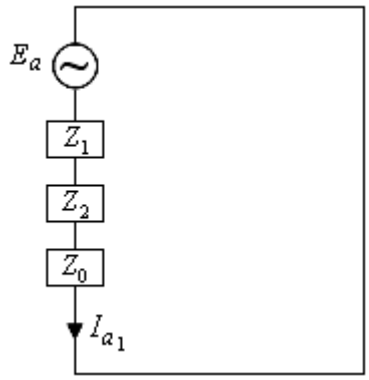
الشكل (١-١٣) يبين حالة قصر *FN* طور مع الأرض

إن شروط العطل في الجملة $V_a = 0$ ، وهو التوتر عند نقطة العطل :

$$I_b = 0 \ ; \ I_c = 0 \ ; \ I_a = I_f \qquad (1.13)$$

أي التيارات I_c , I_b لا تغذي العطل .

يتم توصيل مركبات التتابع للمانعات Z_0 , Z_2 , Z_1 على التسلسل كما هو موضح في الشكل (١-١٤).



الشكل (١-١٤) توصيل مركبات التتابع على التسلسل

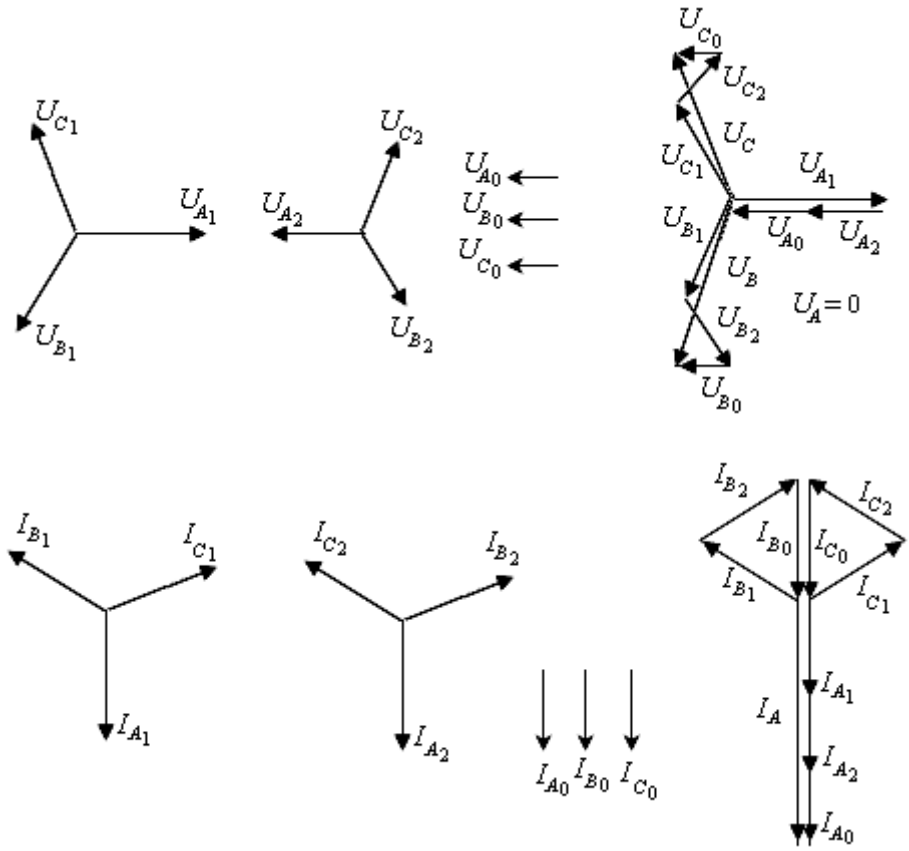
بعد الدراسة والتحليل نجد أن :

$$I_{a_1} = I_{a_2} = I_{a_0} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \qquad (1.14)$$

ونبين في الشكل (١-١٥) مخططاً شعاعياً لمركبات التيار والتوتر السالبة والموجبة والصفرية، وكذلك مخططاً شعاعياً للتيارات والتوترات في حالة العطل (FN).

إن ما يقارب 95% من الأعطال التي تحدث في الشبكات الكهربائية هي من هذا النوع وقد تكون هذه الأعطال دائمة أو عابرة . ويمكن لهذا العطل أن يؤدي إلى مرور تيار قصر أكبر من تيار القصر ثلاثي الطور، وذلك في بعض الحالات الخاصة كما في الحالة عندما $Z_1 = Z_2 = Z_0$ فإن تيار عطل خط مع الأرض يكون مساوياً للتيار الناتج من قصر ثلاثي الطور متناظر.

فيما عدا ذلك ، يكون بشكل عام $Z_0 > Z_1 = Z_2$ ، وهذه الحالة واضحة في خطوط نقل القدرة إذ تصل قيمة الممانعة الصفرية إلى حوالي $Z_0 = (2,5-3) Z_1$ ، أو أكثر للخطوط ذات الدارات المتعددة ، وفي هذه الحالة يكون : $I_{sc3\phi} > I_{sc1\phi}$



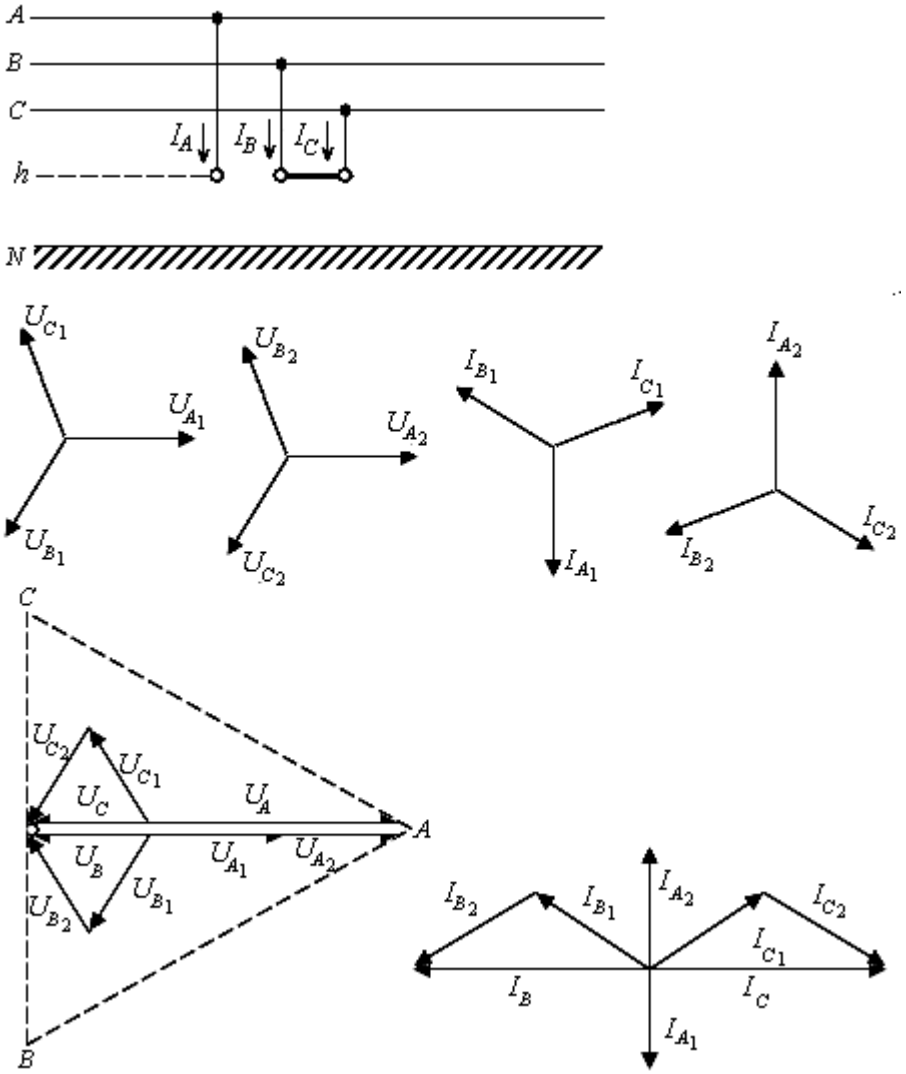
الشكل (١-١٥) يبين مركبات التيار والتوتر وقيم التوتر الخطي والتيار بدلالة المركبات المتناظرة

في حال كان العطل قريباً جداً من المنوبة أو على أطراف المنوبة حيث تكون ممانعات المنوبة هي المؤثرة في تيار العطل ، إذ تكون في مثل هذه الحالات Z_2 أو $Z_0 < Z_1$ ، وإذا افترضنا أن تأريض المنوبة مباشر، فهذا يعني أن Z_0 الكلية تكون أصغر، أي تيار العطل في هذه الحالة يكون $I_{sc1\phi} > I_{sc3\phi}$.

في الخطوط القصيرة ، حيث لا تكون ممانعة الخطوط هي الممانعة الغالبة في الدارة ، فيمكن أن تكون $Z_0 \approx Z_1$ ، وفي هذه الحالة يكون $I_{sc1\phi} = I_{sc3\phi}$.

٢- عطل خط – خط ($L-L$) أو $2F$: Double Phase Fault

يبين الشكل (١-١٦) شروط نقطة العطل لحالة قصر مباشر بين الطورين b و c التي توضحها المعادلات الآتية :



الشكل (١-١٦) حالة قصر $2F$ طورين مع بعض

- قيم التيار مكان العطل هي :

$$\left.\begin{aligned} I_A &= 0 \\ I_B &= -I_C = I_F \end{aligned}\right\} \qquad (1.15)$$

- القيم الطورية للتوتر مكان العطل هي :

$$V_B = V_C \rightarrow V_{BC} = 0 \qquad (1.16)$$

التيارات التتابعية في نقطة العطل : $I_{a_0} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) = 0$

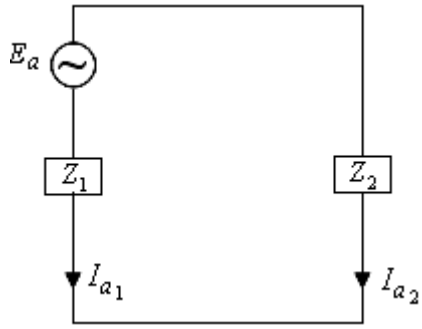
أي لا يوجد مركبة صفرية للتيار، وأن : $I_{a_1} = -I_{a_2}$

التوترات التتابعية في نقطة العطل : $V_{a_1} = V_{a_2}$

ويبين الشكل (١-١٧) الدارة المكافئة لهذا العطل . ومنه نكتب :

$$I_{a_1} = I_{a_2} = \frac{E_a}{Z_1 + Z_2} \qquad (1.17)$$

حيث E_a : توتر نقطة العطل قبل حدوث العطل وتعطى عادة بـ $1\ [pu]$.



الشكل (١-١٧) يبين الدارة المكافئة للعطل $2F$

هذا النوع من الأعطال يفيد في حساب مركبات التتابع السالب التي تستخدم لحماية مولدات القدرة الكهربائية من السخونة الناتجة من الأعطال بين الأطوار.

٣- عطل خطين مع الأرض ($2LG$) أو $2FN$: Double Phase to Earth Fault

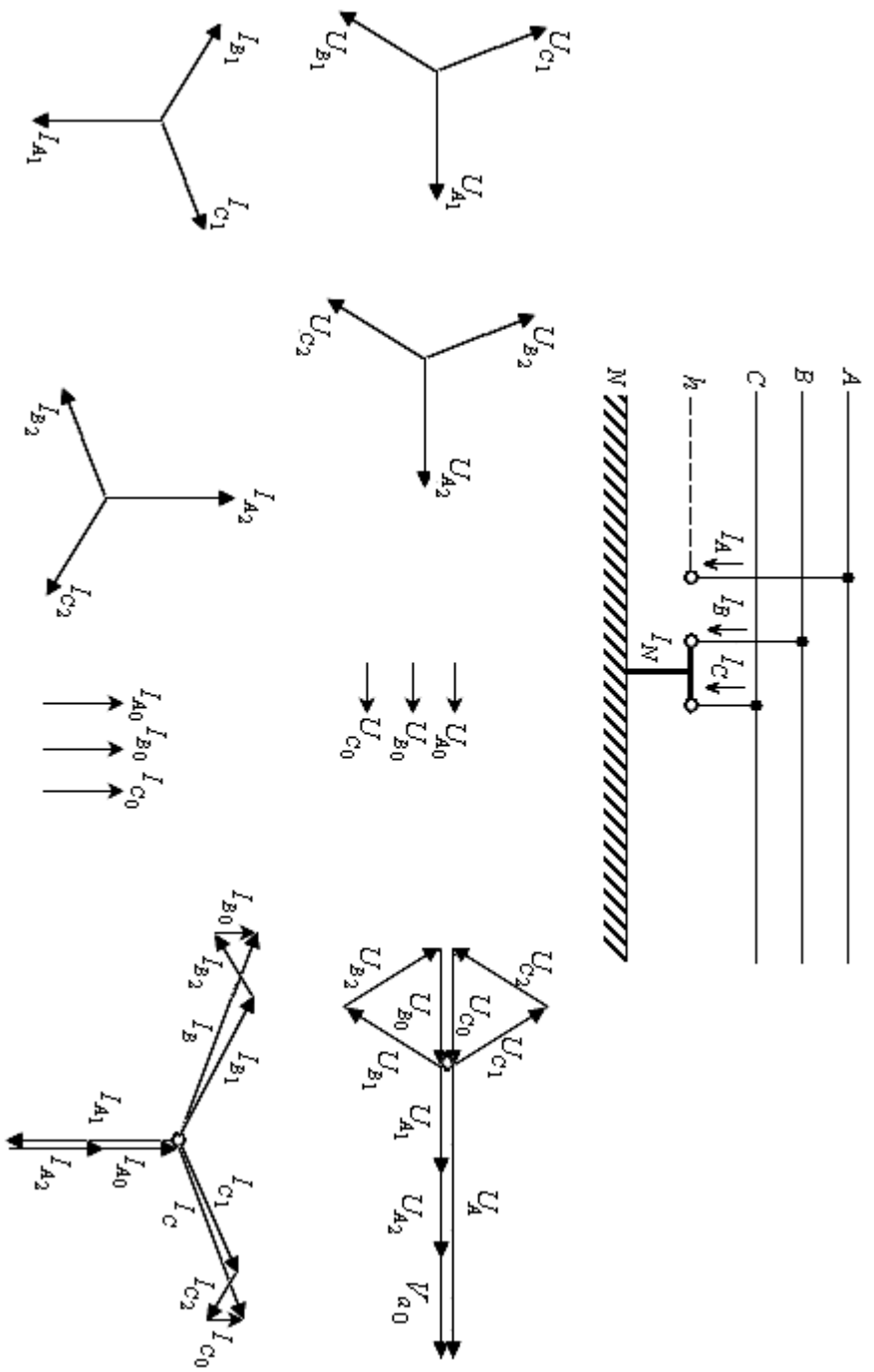
يبين الشكل (١-١٨) حالة قصر بين الطورين B وC والأرض N ، وأيضاً المخططات الشعاعية للتيار والتوتر ومركباتهما المتناظرة .

شروط نقطة العطل :

- التيار : $I_A = 0$

$$I_F = I_B + I_C = 3I_{A_0} \qquad (1.18)$$

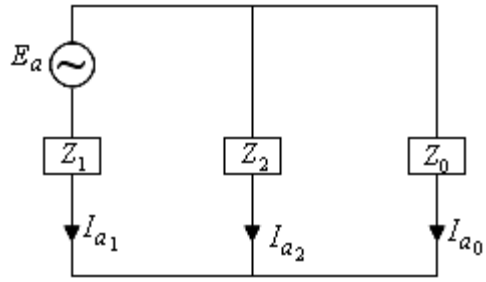
- التوتر : $U_B = U_C = 0$



الشكل (١–١٨) يبين حالة قصر $2\ F\ N$ والمخططات الشعاعية

والمركبات الموجبة والسالبة والصفرية

ويبين الشكل (١-١٩) الدارة المكافئة لحالة القصر هذه .

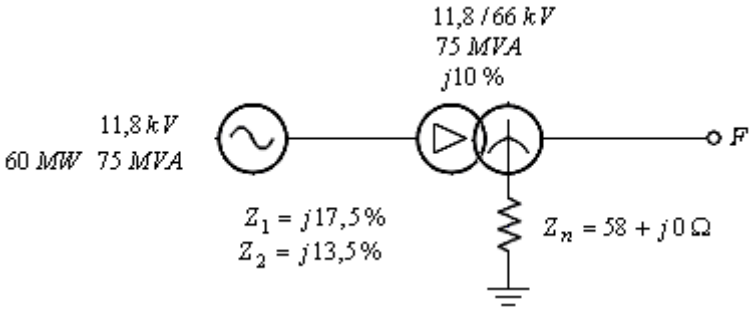


الشكل (١-١٩) يبين الدارة المكافئة للقصر $F\,N$ 2 طورين مع الأرض

استناداً للمعادلات السابقة ، ومن الشكل المكافئ ، يمكن أن نكتب الآتي :

$$\left.\begin{aligned} I_{a_1} &= \frac{E_a}{Z_1 + \dfrac{Z_0 . Z_2}{Z_0 + Z_2}} \\ I_{a_2} &= -I_{a_1}\ \frac{Z_0}{Z_2 + Z_0} \\ I_{a_0} &= -I_{a_1}\ \frac{Z_2}{Z_0 + Z_2} \end{aligned}\right\} \qquad (1.19)$$

مثال (٣): للدارة المبينة في الشكل (١-٢٠)، أوجد تيار العطل في النقطة F لحالة قصر الطور a مع الأرض FN ، وأوجد تيار العطل لقصر الطور b مع c .



الشكل (١-٢٠)

الحل : لدينا قيم الأساس : $S_b = 100\ [MVA]$

نحسب قيم ممانعات التتابع الموجب والسالب والصفري إلى الوحدة والأساس الجديد :

$$Z_{g_1} = \frac{j17,5}{100} . \frac{100}{75} = j\,0,234 \quad [pu]$$

ممانعات المولدة :

$$Z_{g_2} = \frac{j13,5}{100} . \frac{100}{75} = j\,0,18 \quad [pu]$$

ممانعات المحولة :

$$Z_{t_1} = Z_{t_2} = Z_{t_0} = \frac{j10}{100} . \frac{100}{75} = j\,0,133 \quad [pu]$$

ممانعة التتابع الصفري لمقاومة التأريض :

$$Z_{n_0} = 3Z_n = 3(58 + j\,0) = 174 \quad [\Omega]$$

نحول الممانعة الصفرية إلى الوحدة الأساس $[MVA]$ 100 ، وتوتر $[kV]$ 66 فيكون :

$$I_{base} = \frac{S_b}{\sqrt{3}\ kVb} = \frac{100.10^3}{\sqrt{3}\ .66} = 874,77 \quad [A]$$

$$V_{a-n} = \frac{66.10^3}{\sqrt{3}} = 38105 \quad [V]$$

أساس الممانعة $$Z_b = \frac{Z_{bn}}{I_b} = \frac{38105}{874,77} = 43,6 \quad [\Omega]$$

$$Z_{n_0} = \frac{174}{43,6} = 3,99 \quad [pu]$$

من المثال السابق ، وعلى اعتبار توتر الأساس لنقطة العطل هو $[kV]$66 ، وتوتر الأساس من طرف المولدة $[kV]$70 ، يكون توتر نقطة العطل قبل العطل هو :

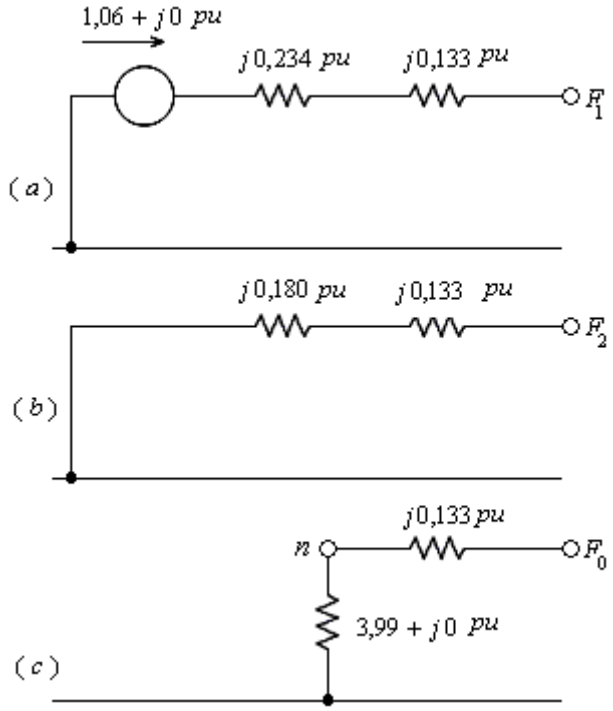
$$V_{an}(pu) = \frac{70}{66} = 1,06 \quad [pu]$$

يوضح الشكل (١-٢١) دارات التتابع الموجب والسالب والصفري المكافئ بين نقطة العطل F_0, F_2, F_1 والحيادي N_0, N_2, N_1 ، حيث :

$$Z_1 = j\,0,234 + j\,0,133 = j\,0,367 \quad [pu]$$

$$Z_2 = j\,0{,}18 + j\,0{,}133 = j\,0{,}313 \quad [pu]$$

$$Z_0 = 3{,}99 + j\,0{,}133 = 3{,}99 + j\,0{,}133 \quad [pu]$$



الشكل (١-٢١) دارات التتابع الموجب والسالب والصفري

a- التتابع الموجب ، b- التتابع السالب ، c- التتابع الصفري بين نقطة العطل والحيادي

آ- حالة قصر طور مع الأرض *FN* :

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{V_{an}}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

$$= \frac{1{,}06}{j\,(0{,}367 + 0{,}313 + 0{,}133) + 3{,}99} = \frac{1{,}06}{3{,}99 + j\,813}$$

ومنه :

$$I_1 = I_2 = I_0 = (0{,}255 - j\,0{,}052) \quad [pu]$$

عندها يمكن حساب التيارات المطلوبة في الأطوار a, b, c عند نقطة العطل :

$$I_a = I_1 + I_2 + I_0 = 3I_1$$

$$I_a = (0{,}765 - j\,0{,}156) \quad [pu]$$

$$I_b = a^2 I_1 + a\,I_2 + I_0$$

$$I_b = (a^2 + a + 1)\,I_1 = 0$$

$$I_c = a\,I_1 + a^2 I_2 + I_0 = 0$$

$$I_a = 683 \angle -11^o \qquad [A]$$

$$I_b = 0 \;\; ; \;\; I_c = 0$$

ب– حالة عطل خط – خط $2F$:

$$I_1 = \frac{V_{an}}{Z_1 + Z_2} \quad ; \quad I_2 = \frac{-V_{an}}{Z_1 + Z_2} \quad ; \quad I_0 = 0$$

$$I_1 = \frac{1{,}06 + j\,0}{j\,0{,}68} = -j\,1{,}56 \qquad [pu]$$

$$I_2 = j\,1{,}56 \quad [pu]$$

تيارات الأطوار لنظام القدرة عند نقطة العطل تساوي :

$$I_a = I_1 + I_2 = 0 \qquad [pu]$$

$$I_b = a^2 I_1 + a\,I_2 = I_1(a^2 - a) = -2{,}7 + j\,0 \quad [pu]$$

$$I_c = 2{,}7 + j\,0 \qquad [pu]$$

بعد جداء هذه القيم بتيار الأساس $874[A]$ نحصل على :

$$I_a = 0$$

$$I_b = 2360 \angle +180^o \quad [A]$$

$$I_c = 2360 \angle 0^o \qquad [A]$$

١–٣ الظواهر المرافقة لظهور عطل على الشبكة :

من المفيد دراسة المتغيرات والظواهر الكهربائية الطارئة على نظام القدرة في أثناء حدوث عطل ما عليه من أجل اختيار نوع حاكمة الحماية اللازم استخدامها للتحسس للظاهرة ، والكشف عن الأعطال ودارات القصر في العناصر المختلفة للشبكة . إن وجود عطل في الشبكة يغير بصورة عامة من قيم التوترات والتيارات الخاصة بعنصر الشبكة المحمي ، وإن هذه التغيرات

تؤثر بشكل مباشر في حاكمات خاصة بالتوتر والتيار ومن ثم في الممانعة. لذا يجب تحديد المتغيرات جميعها التي تحدث على الشبكة في أثناء حدوث العطل وخاصة قيم التيار والتوتر للأطوار والزوايا بينها، وكذلك التغيرات التي تحدث على المركبات المتناظرة لتلك القيم وعلى قيم الممانعة والاستطاعة بهدف الاستفادة منها لتطبيق نوع الحماية اللازمة ومعايرتها بشكل جيد لتأمين الحماية اللازمة. ونذكر فيما يلي أهم هذه الظواهر:

آ– تزايد قيم التيار وانخفاض قيم التوتر :

عند حدوث دارة قصر على الشبكة، فإن قيمة التيار تتزايد ، في حين أن قيمة التوتر تتناقص . لكن في بعض الحالات هذه المتغيرات لا تؤمن معياراً أكيداً لوجود عطل فعلي على الشبكة، إذ إن بعض الأعطال لا تسبب تزايداً في قيمة التيار أو هبوطاً في التوتر، وقد يحدث التغير في حال زيادة الحمل أو في وضع محولة تحت التوتر أو خروج إحدى المولدات المتحرضة بشكل زائد عن الشبكة، لذا لا يمكن الاعتماد فقط على تزايد قيم التيار مع أنها معيار وحيد لحدوث عطل على الشبكة .

ب– تغيرات قيم الممانعة الظاهرية :

يمكن دمج تغيرات التوتر والتيار مع دراسة تغير قيم الممانعة الظاهرية على الشبكة، تقاس الممانعة بين الطور A والطور B مثلاً لحاصل قسمة تفاضل التوتر على تفاضل التيار للطور الأول والثاني ، حيث :

$$\frac{U_A - U_B}{I_A - I_B} \qquad (1.20)$$

حيث U_B, U_A : هي قيم التوتر الطوري .

I_B, I_A : هي قيم تيار الأطوار A و B .

تتناقص قيم الممانعة الظاهرية بشكل مفاجئ لحظة حدوث العطل وهي أكبر بكثير من تغير قيمتها عند تغير الحمولة، وهذا المعيار يُعد دقيقاً لتأكيد حدوث عطل على الشبكة .

ج– ظهور المركبات المتناظرة :

إن الأعطال غير المتناظرة جميعها التي تحدث على الشبكة تسبب ظهور المركبات السالبة والصفرية والموجبة وذلك حسب نوع القصر، وتكون تلك المركبات ذات قيمة عظمى

عندما تكون قرب دارة القصر، لذا يمكن تشبيه حدوث عطل غير متناظر على الشبكة كمولد استطاعة سالبة أو صفرية .

إن ظهور المركبات المتناظرة للتيارات والتوترات يؤكد وجود عدم توازن في الشبكة، قد لا يكون سببه قصراً على الشبكة أو فشلاً في العازلية، بل يكون سببه انقطاع أحد الأطوار من دون أي تماس مع الأرض ، مع ملاحظة أن الأعطال ثلاثية الطور لا تولد مركبات متناظرة في الشبكة .

د- عدم توازن تيار الدخل والخرج في عنصر الشبكة :

في حالة التشغيل الطبيعي تكون شدة تيار الخرج مقاربة لشدة تيار الدخل في عنصر الشبكة مع الأخذ بالاعتبار نسبة التحويل في المحولات وإهمال المفاقيد والضياعات البسيطة، لكن حين حدوث دارة قصر معينة يصبح التفاضل بين قيمة تيار الدخل والخرج كبيراً ، وهذه الحالة تُعد معياراً لحدوث عطل في عنصر الشبكة، وبدل أن نستعمل طريقة التفاضل الشعاعي لتيارات الدخل والخرج للتحقق من وجود دارة قصر نستعمل طريقة تفاضل زاوية الطور، إذ إنه في حال حدوث عطل خارجي يصبح التفاضل (180^o)، ويمكن أيضاً الاستفادة من اختلاف اتجاه جريان الاستطاعة، إذ ينعكس اتجاه الاستطاعة في حالة العمل الطبيعي عنه في حال دارة القصر.

يمكن اعتماد الطرق التفاضلية جميعها كأساس لتصميم حاكمات الحماية المسماة بالتفاضلية أو بحماية مقارنة الأطوار حيث نقارن استطاعة الدخل والخرج للعنصر. وحتى تتم عملية إجراء المقارنة يجب استعمال دارة مساعدة تصل بين مدخل ومخرج عنصر الشبكة المراد حمايته، وهذه الدارة تتألف عادة من أسلاك وصل عندما تكون المسافة قصيرة ، أما في حالة حماية خط نقل مثلاً، نستعمل خط النقل نفسه كوساطة لإجراء مقارنة قيم الدخل والخرج باستعمال ترددات عالية، وهذه التيارات تسمى التيارات الحاملة تنتقل من بداية الخط إلى الطرف الآخر منه . وفي النتيجة تحدد معايير حدوث العطل بالمتغيرات الآتية .

- زيادة التيار $I(A)$.
- انخفاض الجهد $U(V)$.
- انخفاض قيمة الممانعة الظاهرية $Z[\Omega]$.

- ظهور المركبات المتناظرة .
- تباين قيم الدخل والخرج لتيار عنصر الشبكة .
- انعكاس اتجاه جريان استطاعة الدخل والخرج .

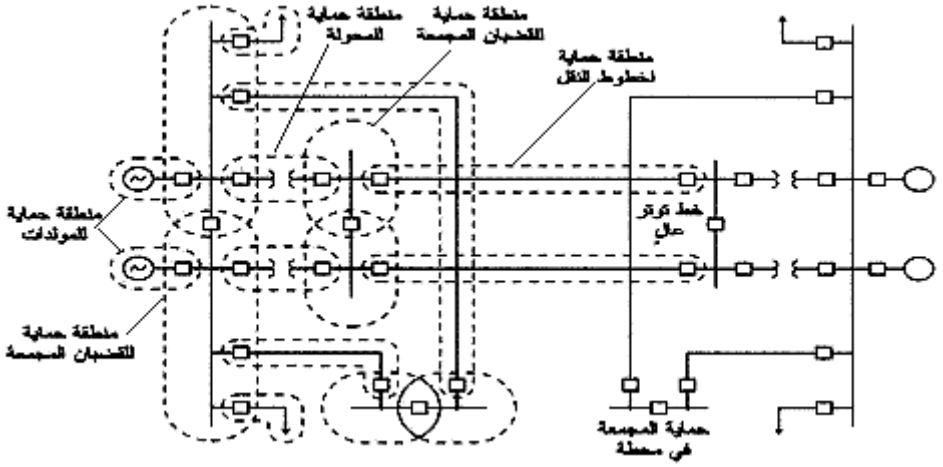
ولتكون الحماية أكثر وثوقية نستعمل أكثر من معيار لتحسس العطل في حماية عناصر الشبكة .

١-٤ تقسيم الشبكة إلى مناطق حماية Protective Zone :

عند تصميم شبكة كهربائية معينة، أو جزء منها، يجب أن نخطط لنظام حماية متكامل من حيث :

- اختيار مواضع قواطع التيار، فمثلاً تركيب قاطع لكل وحدة يُراد فصلها لعمليات التشغيل والصيانة المرغوبة إضافة إلى فصلها خلال حالات القصر.

- اختيار نظام الحماية وحاكمات الحماية في الشبكة لكل عنصر يُراد حمايته. يتم تقسيم الشبكة إلى مناطق محمية اعتماداً على أهمية العنصر المراد حمايته ومكانه واحتمالات تعرضه لحالات القصر أو التشغيل غير العادي .



الشكل (١-٢٢) حماية شبكة كهربائية بتقسيمها إلى مناطق حماية وفق الأجزاء المنقطة

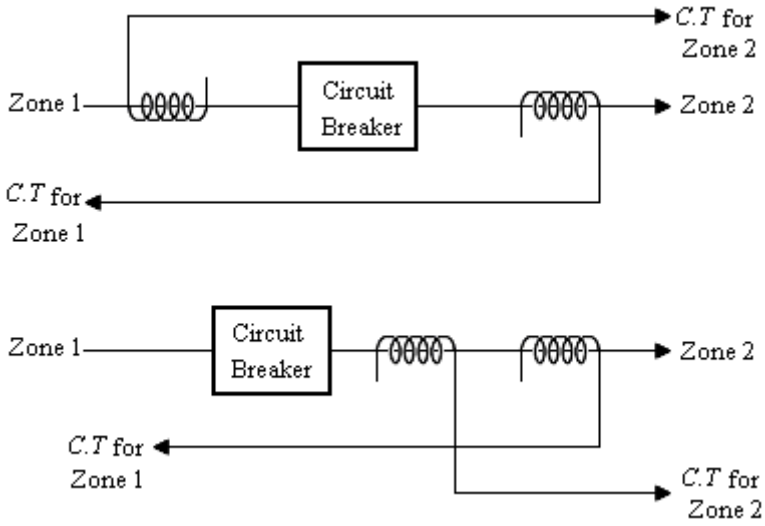
فإذا أخذنا نظام القدرة المبين في الشكل (١-٢٢) نجد أنه تم تقسيمه إلى مناطق حماية بحيث تُعتبر المنطقة من المولد إلى القاطع الخاص به هي المنطقة المحمية للمولدات ، بينما

تُعد المنطقة من القاطع الأول في بداية الخط إلى القاطع الثاني في نهاية الخط بمنطقة الحماية لخط القدرة ، كذلك المنطقة المحمية للمحولة هي بين القاطعين على طرفي كل محول .

وعلى ذلك ، يُعرف الجزء من الشبكة الكهربائية (مولدة – خط – محولة ...) المحمي بنظام حماية معين بالمنطقة المحمية (protective zone) ، وإذا كانت الشبكة الكهربائية متداخلة فإن بعض الأجزاء تكون محمية بأكثر من منطقة حماية. وعند تصميم الشبكة يجب مراعاة عدم ترك أي جزء من الشبكة من دون حماية، كما أن الأجزاء المحمية بأكثر من منطقة تعرف بالمنطقة المتداخلة (overlap). فمن الشكل السالف نجد معنى المنطقة المتداخلة، حيث قاطع المولدة مشترك مع المنطقة المحمية للمولدة والمنطقة المحمية لقضبان التجميع الرئيسة .

الجدير بالذكر، أن حدود المنطقة المحمية تحدد بموضع وجود محولة التيار، أو بموضع وجود القاطع الآلي ، وتكون أجهزة الحماية المركبة على منطقة محمية معينة مسؤولة عن أعطال هذه المنطقة فقط ، ولا تكون مسؤولة عن أعطال المناطق المجاورة .

حماية المناطق المشتركة أو المتداخلة يتم عن طريق توصيل حاكمات الحماية ومحولات التيار حسب الشكل (١-٢٣) الذي بيّن تداخل الحماية حول القاطع الآلي .



الشكل (١-٢٣) مبدأ تداخل الحماية حول القاطع الآلي

حيث عند أي عطل في المنطقة بين المحولات سوف تعمل حاكمات الحماية للمنطقة (1 و 2) وتفصل القواطع في المنطقتين .

ويفضل تخفيض عدد الأجزاء المعزولة من الشبكة بسبب العطل قدر الإمكان ، وجعله مقصوراً على الجزء المصاب حصراً . ويجب عند دراسة نظام الحماية تصميم مناطق الحماية الاحتياطية وأجهزتها لمجابهة احتمال فشل أجهزة الحماية الأساسية، ولتأمين حماية الأجزاء الموجودة في دارة الحماية والتي لم يتم تغطيتها من الحماية الرئيسة بسبب مكان تطبيق محولات التيار والجهد . في بعض نظم الحماية ليس بالضرورة استخدام حماية مستقلة على أنها حماية احتياطية بل نستفيد من التدرج الزمني كحماية احتياطية كما في الحمايات المسافية، وحمايات التيار المتدرجة بالزمن . وفي بعض عناصر نظام القدرة يفضل أن تكون الحماية الاحتياطية مستقلة عن الحماية الأساسية لزيادة الوثوقية .

١-٥ الشروط الواجب توافرها في منظومة الحماية :

عند تصميم أي نظام حماية لمنظومة كهربائية يجب تحقيق الشروط والمبادئ الآتية :

آ- الموثوقية Reliability :

نادراً ما يتطلب من أجهزة الحماية القيام بالعمل ، إلا أنه عندما يُطلب منها ذلك ألاَّ تفشل في عملها، وأن تعمل فقط عند ظهور العطل على بعض عناصر القدرة ، ولتحقيق ذلك يجب أن تتصف مكونات نظام الحماية بالمتانة وجودة التصنيع ، بحيث تكون مقاومة للأحمال الزائدة والتوترات المرتفعة، والاهتزازات الميكانيكية والتغيرات الحرارية، وأن تكون أجزاؤها محمية من التأكسد ومحكمة ضد الغبار، ووصلاتها مثبتة بشكل جيد . يمكن الحصول على مستوٍ للموثوقية عالٍ نسبياً عبر التبسيط في بنية الحاكمات . تتبع موثوقية عمل الحماية بدرجة عالية إلى بقائها وثباتها ومتابعة صيانتها واختبارها، ويجب على الحماية ألاَّ تتغير مواصفاتها مع الزمن ، حتى بعد زمن طويل للاستثمار.

ب- السرعة Speed :

إن عمل الحماية بأسرع ما يمكن لعزل العطل عن الشبكة يقلل من الأضرار والانهيارات التي يسببها العطل وخاصة حالات القصر، وبالتالي يسمح باستمرار التغذية الكهربائية في

الأجزاء السليمة من النظام ، ويساعد على استمرار استقرار الشبكة (stability) خاصة عندما يكون العطل على خطوط التوتر العالي أو المولدات أو المحولات والحمولات الكبيرة .

ويمكن تعريف زمن عزل العطل بأنه الزمن الذي يبدأ من لحظة حدوث القصر حتى لحظة فصل القاطع الآلي ، وهذا يساوي مجموع زمن عمل الحاكمة والزمن الذي يستغرقه القاطع الآلي ، أي :

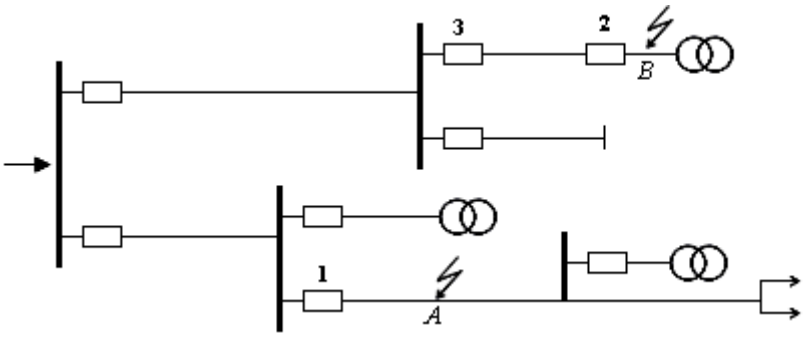
زمن عزل العطل = زمن عمل الحاكمة + زمن عمل القاطع الآلي

في حال كان زمن فصل العطل أقل من $0,2[sec]$ فإن الأضرار الناتجة من القصر تكون في أدنى درجاتها . ونذكر أنه في بعض أنواع الحمايات التفاضلية المستخدمة لحماية المولدات والمحولات وبعض الخطوط القصيرة تعمل بشكل لحظي ، لكن يجب تعيير أجهزة الحماية على زمن تشغيل بحيث تحقق الانتقائية وفصل العنصر المعطوب بأقل زمن ، ومن الممكن تجاوز التأثيرات الحرارية والديناميكية الناتجة من تيارات القصر، مع ملاحظة أن الأعطال ثلاثية الطور لها تأثير ملحوظ في مقدرة النظام على البقاء متماسكاً، لذلك يجب أن تُفصل تلك الأعطال بشكل سريع .

ج– الانتقائية والتميز Selectivity and Descrimination :

تعني الانتقائية، أن أجهزة الحماية يجب أن تختار الجزء الذي وقع عليه العطل من الشبكة الكهربائية وتعزله عن باقي الأجزاء بسرعة قدر الإمكان ، حتى لا يسبب مخاطر ومشكلات نتيجة العطل . بينما يعني التميز أن تميز الحاكمات بين حالات التشغيل العادية والحالات غير العادية في المنطقة المحمية الخاصة بها، وليس في الأجزاء الأخرى من الشبكة ويبين الشكل (١–٢٤) شبكة شعاعية، ندرس فيها كيفية تحقيق الانتقائية إذ يجب أن يقوم أقرب قاطع عن مكان حدوث القصر من جهة التغذية بفصل العطل ، فعند حدوث عطل (A) على الشبكة يقوم القاطع (1) بفصل العطل عن التغذية، وفي حالة العطل (B) تفصل الحماية القاطعين (2) و(3) لأنه لا معنى لبقاء القاطع (3) في الخدمة. في حالة الشبكات الحلقية، والانتقائية تعني فصل القاطعين المجاورين لمكان حدوث القصر. ويُعتمد لتحقيق الانتقائية وخاصة في الشبكات الشعاعية على التدرج الزمني لعمل أجهزة الحماية، وتكون هذه الحمايات

عادة حمايات زيادة التيار والحماية المسافية بزمن متدرج . وهناك أنظمة حماية تتعلق فقط بشروط العطل في منطقة محددة وتسمى الحماية الواحدية أو المحدودة Unit Protection، وهي لا تتعلق بتدرج الزمن ، بل تعمل بسرعة عالية أو تعتمد على مقارنة كميتين في حدود منطقة الحماية، ومثال ذلك على هذا النوع من الحمايات الحماية التفاضلية، وحمايات تماس الجسم .. إلخ .



الشكل (١-٢٤)

د- الحساسية Sensitivity :

وتعني أن تعمل حاكمة الحماية عند أقل كمية كهربائية معيرة عندها الحاكمة، فمثلاً، حاكمة التيار يجب أن تتحسس لأقل تيار قصر يمر بالمنطقة المحمية. وتعتمد قيمة أقل تيار قصر لشبكة كهربائية ما على الافتراضات الآتية :

- حدوث قصر عند نهاية الخط .
- وجود مولد واحد فقط على أنه مصدر تغذية في الشبكة المعنية .
- وجود مقاومة قوس كبيرة مكان حدوث القصر.

وتتعلق هذه الافتراضات بطبيعة الشبكة المدروسة وشكلها .

تعرف حساسية حاكمة الحماية باستخدام عامل الحساسية K_S بالعلاقة الآتية :

$$K_S = \frac{I_{sc}(min)}{I_0} \qquad (1.20)$$

حيث I_{sc} : هي قيمة أقل تيار قصر يمر بالمنطقة المحمية .

I_0 : هي قيمة أقل تيار لتشغيل الحاكمة .

يجب مراعاة ألاَّ يكون تيار تشغيل الحاكمة صغيراً نسبياً للأسباب الآتية :

– كي لا تعمل حاكمة الحماية عند تيار الحمل الأعظمي .

– كي لا تعمل حاكمة الحماية عند حالات قصر خارج منطقة الحماية الخاصة بها.

وعند اختيار حساسية حاكمات الحماية نتبع الآتي :

– قيمة أقل تيار قصر في المنطقة المحمية .

– قيم تيارات التشغيل المطلوبة لعمل حاكمات الحماية الأساسية والحماية الاحتياطية.

هـ– الاقتصادية Economics :

تتعلق اقتصادية الحماية في تكاليفها الإنشائية والاستثمارية، وتُعد أجهزة الحماية اقتصادية عندما تقدم أفضل أداء في أقل كلفة ممكنة، وهذا يتوقف على بساطة بنيتها والجودة العالية لمواصفات العناصر الداخلة في صناعتها.

وبشكل عام ، فإن تكاليف أجهزة الحماية تكون منخفضة بشكلٍ لا يقارن بالنسبة إلى تكاليف التجهيزات والعناصر المحمية، وفي حال حماية عناصر ذات أهمية في نظم القدرة من الضروري استخدام حمايات بمواصفات فنية عالية حتى لو كان ثمنها أعلى بكثير من الحمايات ذات المواصفات الأدنى .