تحليل مستويات الأعطال في شبكة النقل السورية 230 kV

الدكتور خالد الحمصي[1] الدكتور حسان السويدان[2]

الملخص

تكتسب مسألة تحليل الأعطال في منظومة القدرة الكهربائية أهمية خاصة إذْ يتم فيها حساب مستويات العطل على قضبان تجميع محطات التحويل وجريان الحمولة في فروع الشبكة المعطلة لتحديد مواصفات القواطع الآلية وعيارات حواكم الحماية لمناطق الشبكة كلّها.

أُجريت في هذا البحث دراسة تحليلية لدارات القصر على الشبكة السورية 230kV وحددت مستويات العطل على قضبان تجميع محطات التحويل في حالات القصر ثلاثي الطور والأحادي الطور مع الأرض، وقورنت استطاعة القصر باستطاعة القطع للقواطع الآلية المركبة على هذه الشبكة.

تبين نتائج الدراسة زيادة مستويات العطل على شبكة النقل السورية نتيجة لزيادة عدد محطات التوليد الجديدة والتوسع في محطات التوليد القائمة المربوطة عليها وخاصة عند عمل هذه الشبكة ضمن شبكة الارتباط الثمانية.

كذلك يبّين البحث أن مستويات العطل في نقاط كثيرة من الشبكة المدروسة تتجاوز استطاعة القطع التصميمية للقواطع الآلية المركبة عليها؛ مما يؤدي إلى حالات عمل غير نظامية تؤثر في أمان عمل النظام الكهربائي وموثوقيتها وتعرض الأجزاء المختلفة من الشبكة لأضرار كبيرة نتيجة إخفاق هذه القواطع في أداء عملها بالشكل المناسب.

الكلمات المفتاحية: تحليل الأعطال، دارة القصر، استطاعة القصر، استطاعة القطع، شبكة النقل، القواطع الآلية، مستوى العطل، قضبان التجميع، تيار العطل.

[1] وزارة الكهرباء.

[2] كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة دمشق.

1 - مقدمة Introduction:

تمثل دارات القصر في الشبكات الكهربائية حالات عمل غير نظامية ينجم عنها انهيار الجريان الطبيعي للتيار باتجاه الأحمال، وفي معظم الحالات يكون مسار دارة القصر بين الأطوار أو بين أحد الأطوار (أو أكثر) والأرض.

وتتميز مسارات دارات القصر بأنها ذات ممانعات منخفضة؛ مما يؤدي إلى قيم عالية لتيارات هذه الدارات.

ويعدُّ انهيار العازلية، بسبب ارتفاع التوتر الناتج إما عن ضربات البرق أو توترات الفصل والوصل، من أهم أسباب حدوث دارات القصر على الخطوط الهوائية، أضف إلى ذلك الرياح والجليد والأشجار التي تؤدي إلى انهيار النواقل وسلاسل العوازل ميكانيكياً.وكذلك يمكن أن يشكل الضباب وتوضع الرذاذ المالح والغبار الملوث على العوازل شروطاً ملائمة لانهيار هذه العوازل.

وتحدث دارات القصر على المولدات والمحركات والمحولات نتيجة زيادة الحمل الحراري عليها لمدد طويلة من الزمن؛ مما يؤدي إلى تخريب المادة العازلة فيها.

وتعدُّ دراسة النظام الكهربائي في حالات دارات القصر ذات أهمية خاصة لتحديد مستويات العطل على قضبان تجميع وضمان تحمل القواطع لتيارات هذه الدارات، ولمعرفة جريان الحمولة في النظام الناجم عن دارات القصر ولتحديد عيارات حواكم الحماية، وأخيراً للتحقق من العيارات الحرارية للتجهيزات مثل الكابلات والخطوط الهوائية.

يجب تصميم القواطع المستخدمة لحماية الدارات الكهربائية بحيث تعمل بصورة طبيعية في النظام دون أن تتعرض للعطب حتى في حالات التيارات الكبيرة للأعطال.

ولاختيار القواطع بالعيارات المناسبة تجب معرفة التيار الأعظمي الذي يمكن أن يجري في دارات القصر وطويلة التيارات خلال مدد تلك الدارات، لتعيير تجهيزات الحماية بحيث تعمل في حالات القصر وليس في حالات العمل النظامية [1].

2- النموذج الرياضي لحسابات تيارات دارات القصر Model of Short Circuit Calculation Mathematical

تتميز الأعطال الكهربائية بتغير في طويلة تيار دارة القصر نتيجة لتأثير الممانعة المكافئة للنظام عند نقطة العطل التي تؤدي إلى تخامد المركبة المستمرة DC، وكذلك تأثير الآلات الدوارة التي ينجم عنها تخامد المركبة المتناوبة AC.

2-1- تأثير ممانعة النظام Effect of Impedance System:

عند حدوث العطل فإن تيارات النظام لا تتغير آنياً بسبب المقاومات المكافئة للنظام والمفاعلات عند نقطة العطل التي تؤدي إلى تخامد المركبة المستمرة. وتتعلق نسبة التخامد بالقيمة اللحظية للتوتر لحظة حدوث العطل، وبقيمة عامل الاستطاعة للنظام عند نقطة العطل.

ولإنجاز الحسابات المطلوبة تجب معالجة الأعطال الكهربائية كتابع للزمن من لحظة بداية حدوث العطل عند $t = 0^+$ حتى بلوغ الشروط المستقرة، ومن ثَمَّ من الضروري استخدام المعادلات التفاضلية عند حساب هذه التيارات.

يعطى تيار العطل في الجزء من الشبكة غيرالحاوية على آلات دوارة بالعلاقات[2] :

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \alpha - \gamma) - I_m e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\alpha - \gamma) \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

$$I_m = \frac{V_m}{Z} \quad \text{.....(2)}$$

$$Z = \sqrt{\left(R^2 + \omega^2 L^2\right)} \quad \text{.....(3)}$$

$$\tau = \frac{L}{R} \quad \text{.....(4)}$$

$$\gamma = \tan^{-1}\frac{\omega L}{R} \quad \text{.....(5)}$$

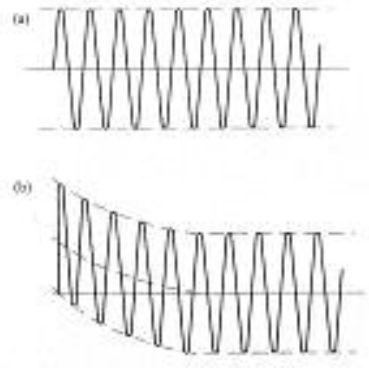
إذْ:

α: زاوية الإغلاق التي تحدد نقطة حدوث العطل على المنحنى الجيبي للتوتر.

نلاحظ من المعادلة (1) أن تيار العطل يتكون من مركبتين: مركبة متناوبة AC تتغير جيبياً، ومركبة مستمرة متخامدة أسياً بثابت زمني $\frac{L}{R}$. وتكون القيمة الابتدائية لهذه المركبة أعظمية عند $\alpha - \gamma = \pm\frac{\pi}{2}$، وتأخذ هذه المركبة القيمة صفر عند $\alpha = \gamma$، كما هو مبين في الشكل (1).

وهناك صعوبة في التنبؤ بالنقطة على المنحنى الجيبي التي سيحدث عندها العطل، ومن ثَمَّ المطال الذي ستصل إليه المركبة المستمرة.

إذا تم فصل الدارة بسبب العطل عندما تكون المركبة الجيبية عند قيمتها السالبة فإن المركبة DC تصل إلى قيمتها العظمى النظرية بعد نصف دورة.



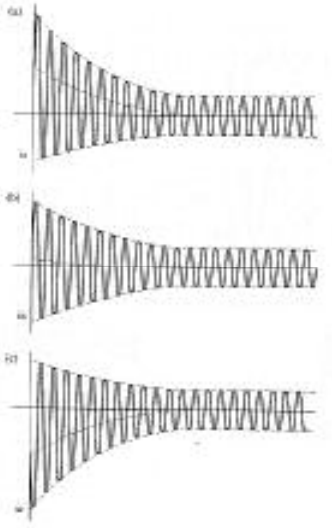
الشكل (1) تغير تيار العطل مع الزمن

a : عند $\alpha - \gamma = 0$

b : عند $\alpha - \gamma = \frac{\pi}{2}$

2-2- تأثير الآلات الدوارة Effect of Synchronous Machines

عندما يحدث العطل بالقرب من أطراف الآلات الدوارة يحدث تخامد لمركبة التيار المتناوب، ويعود ذلك إلى أن الفيض المغناطيسي في ملفات الآلة لا يتغير آنياً بسبب طبيعة الدارات المغناطيسية المؤثرة. ويمكن ملاحظة انخفاض قيمة التيار بسبب الانخفاض التدريجي في الفيض المغناطيسي الناتج عن انخفاض القوة المحركة المغناطيسية لتيار التحريض في الشكل (2)، ويعرف ذلك بأثر رد فعل المتحرض[4].



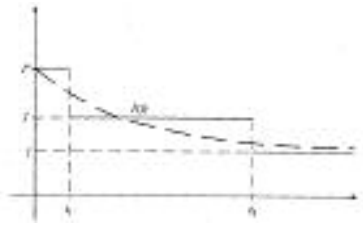
الشكل (2) التيارات العابرة لدارة القصر في المولد التزامني

a : على الطور a، b : على الطور b، c : على الطور c

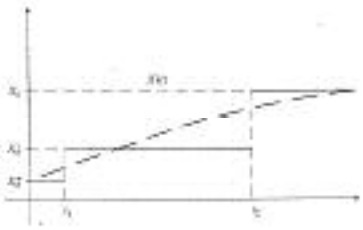
فيزيائياً ترتبط قيمة مفاعلة الآلة بالزمن، وهذا يجعل الحسابات صعبة جداً، إلاَ أنه في معظم التطبيقات العملية يمكن اعتبار تغير المفاعلة في ثلاث مراحل فقط دون أن يؤدي ذلك إلى أخطاء كبيرة.

ويتضح من الشكل (3) أن تغير التيار بالزمن $I(t)$ يمر بثلاثة مستويات I, I', I''، التيار تحت العابر، التيار العابر، وتيار الحالة الدائمة على التوالي.

يرمز لقيم المفاعلة على المحور المباشر بـ $Xd, X'd, X''d$ ، ويبين الشكل (4) تغير قيم هذه المفاعلات مع الزمن [3].



الشكل (3) تغير قيمة التيار مع الزمن خلال مرحلة العطل



الشكل (4) تغير مفاعلة المولد مع الزمن خلال فترة العطل

2-3- الخطوط الهوائية Overhead Lines:

يمثّل خط النقل الهوائي بدارة π باستخدام المحددات المجمعة مع استخدام عوامل تصحيح معينة تأخذ بالحسبان أن بارامترات الخط من حيث الممانعة Impedance والمسايرة Admittance موزعة على كامل طول الخط [11,12].

وعادة من أجل الخطوط القصيرة تُهمل السماحية التفرعية؛ الأمر الذي يسهل الحسابات بصورة كبيرة. أما من أجل الخطوط الطويلة فإنه عند حسابات الأعطال لا يمكن إهمال هذه السماحية.

ويبّين الجدول /1/ محددات الخطوط ألمنيوم – فولاذ الشائعة الاستخدام في شبكة النقل السورية 230kV عند التردد 50Hz.

الجدول /1/ محددات الخطوط المستخدمة في الشبكة السورية 230kV

TYPE	Cross Section	R (Ω/Km)	X (Ω/Km)	ωc (Ω/Km)	
Al /St	400/51	0.077	0.413	2.734×10^{-6}	

2-4- الكابلات Cables:

يمكن تطبيق العلاقات الناظمة للخط الهوائي على الكابلات للحصول على محدداتها في الحالة العامة عندما تتوضع النواقل بشكل متناظر. أما التأثيرات الثانوية الناجمة عن الغلاف والحجاب فإنه لا يمكن دائماً حسابها، والأفضل في هذه الحالة أخذها من معطيات الشركة الصانعة.

2-5- المحولات Transformers:

يمثّل المحول ثنائي الملفات، في الشبكة الكهربائية، بدارة مكافئة T إذْ يمثل العنصر التسلسلي ممانعة القصر والعنصر التفرعي ممانعة التهييج.ويجب الانتباه إلى أنه في حالة المحولات المتعددة الملفات يجب نسب الممانعات كلّها إلى أساس واحد.

إن ممانعة العناصر الساكنة Static Elements مستقلة عن المركبات المتناظرة للتوتر المطبق، ولذلك فإن ممانعة المحول للتيارات السالبة والموجبة هي نفسها. وعند تحديد الممانعة الصفرية Zero Impedance فإنه يجب الأخذ بالحسبان طريقة توصيل الملفات وكيفية تأريض نقطة النجمة، وفي بعض الحالات طريقة بناء المحول.

إن وجود مسار للتيارات الصفرية يعني أنه في حالة حدوث عطل إلى الأرض فإن تيارات عدم التوازن ستجري في ملفات المحول، وعادةً تُهمل فرعة المغنطة من الدارة المكافئة للمحول نظراً إلى صغرها مقارنة بالممانعة التسلسلية [10,11].

من أجل المحولات ثلاثية الملفات تُستخدم دارة مكافئة بثلاث نهايات، وتحدد ممانعات التتابع الموجب للمانعات الثلاث من خلال تجربة القصرلكل ملفين على حدة.

3- نماذج تيارات العطل Fault Current Models:

تتغير مستويات دارة القصر خلال العطل بصورة ملموسة نظراً إلى الانخفاض السريع للتيار بسبب رد فعل المتحرض للآلات التزامنية والتأخير الزمني للقوس الكهربائي.

لهذا فإنه يجب حساب تيارات دارة القصر بعناية للحصول على القيمة الصحيحة لكل حالة من الحالات. وتصنف النظم القياسية ANSI/IEEE،C37 والنظم الدولية IEC6090 تيارات دارة القصر ضمن أربعة نماذج :التيار اللحظي Momentary Current أو تيار الدورة الأولى، التيار الأعظمي Peak Current، تيار الفصل أو القطعInterrupting or Breaking Current و تيار الحالة الثابتة Steady-state Current.

التيارات اللحظية أو تيارات الدارة الأولى هي التيارات خلال النصف الأول من الدور بعد بدء العطل، ويشار في النظم الأوربية إلى هذه القيم بـ I''_K، وهذه القيم هي التي تتحسس بها تجهيزات الحماية للقواطع الآلية عند حدوث العطل. وتحسب هذه التيارات بوجود المركبة المستمرة وبفرض أن المركبة المتناوبة غير متناقصة في المصدر، وتستخدم المفاعلات تحت العابرة $X''d$ في عملية الحساب [4].

وتوافق التيارات العظمى القيم العظمى خلال الدورة الأولى بعد حدوث العطل، وتختلف عن تيارات الدورة الأولى بأنها كليةً غير متناظرة. أمَّا تيارات الفصل فهي القيم التي يجب فصلها من قبل تجهيزات الحماية، وتدعى هذه القيم في النظم الأوربية بتيارات الفصل، وتحسب عادةً في المجال من ثلاث إلى خمس دورات، وتشمل هذه التيارات المركبة المستمرة DC وبعض الانخفاض في المركبة المتناوبة.

و توافق تيارات الحالة الثابتة للدارة القصيرة القيم بين الدورات 6 و30، وهذه التيارات لا تحوي مركبة مستمرة DC، وتستخدم المفاعلات العابرة $X'd$ في عملية حسابها مع إهمال الأثر التحريضي التزامني.

ويبّين الجدول /2/ قيم المفاعلات المستخدمة في عملية حساب القيم المختلفة لتيار القصر استناداً إلى النظم القياسية IEEE 399-1990. ويمكن لأجل كل حالة حساب القيم الفعلية v.m.s المتناظرة أو غير المتناظرة، وذلك حسب الحالة إن كانت متضمنة المركبة المستمرة DC أو غير متضمنة هذه المركبة.

تحسب القيم الفعلية غير المتناظرة للمركبات المستمرة و المتناوبة من العلاقة [4] :

$$I = \sqrt{I_{DC}^2 + I_{AC}^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(6)$$

ويتم الحصول على القيمة الأعظمية بضرب القيمة الفعلية بـ $\sqrt{2}$.

الجدول /2/ قيم المفاعلات المستخدمة في حسابات تيارات العطل

حسب IEEE399-1990

4- حساب تيارات العطل Fault Current Calculation:

يستخدم التيار اللحظي عند تحديد تيار الإغلاق للقواطع، بعد نصف الدورة الأولى تتخامد المركبة

المتناوبة والمركبة المستمرة بمقدار 15% من قيمتها الابتدائية ومن ثَمَّ من المعادلة (6) تكون القيمة الفعالة للتيار:

$$I = \sqrt{\left(\frac{0.9\sqrt{2}V}{X''_d}\right)^2 + \left(\frac{0.9V}{X''_d}\right)^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (7)$$
$$= \frac{1.56V}{X''_d} = 1.56\, I_{sy}$$

إذْ:

I_{sy} : المركبة المتناوبة المتناظرة لتيار العطل

وعادة تستخدم الشركات الصانعة العامل 1.6 في مثل هذه الحسابات.

ويتم الحصول على مركبة القمة (المركبة العظمى) عن طريق جمع المركبة المتناوبة إلى المركبة المستمرة، وتجدر الملاحظة إلى أنه في هذه الحالة تضرب المركبة المتناوبة بالمقدار $\sqrt{2}$ ومن ثَمَّ:

$$I_{peak} = I_{DC} + I_{AC}$$
$$= \left(\frac{0.9\sqrt{2}V}{X''_d}\right) + \left(\frac{0.9\sqrt{2}V}{X''_d}\right) \quad \ldots\ldots\ldots \quad (8)$$
$$= 2.55\ I_{sy}$$

تستخدم القيمة الفعلية لتيار القطع عند تحديد تيار القطع غير المتناظر $I_{asy.\text{int}}$ للقاطع. وتدخل في هذه القيمة الفعلية مركبة التيار المتناوب AC ومركبة التيار المستمر DC وبذلك يكون:

$$I_{asy.\text{int}} = \sqrt{I_{DC}^2 + I_{AC}^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (9)$$

وبالتعويض عن المركبة المستمرة بالعلاقة الأسيّة المتخامدة نحصل على:

$$I_{asy.\text{int}} = \sqrt{\left(\sqrt{2}I_{sy.\text{int}}\ e^{-(R/L)t}\right)^2 + I_{sy.\text{int}}^2} \quad \ldots\ldots \quad (10)$$
$$= I_{sy.\text{int}}\sqrt{2e^{-2(R/L)t} + 1}$$

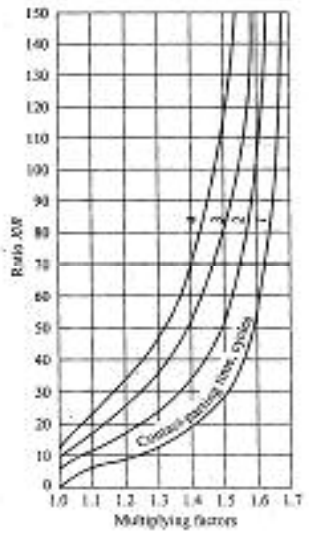
أي إنَّ:

$$I_{asy.\text{int}} = K\ I_{sy} \quad \ldots \qquad (11)$$

وتتراوح قيمة العامل K بين $\sqrt{3}$ عند $t = 0$ و 1 عند القيم الكبيرة لـ t.

ويبيَّن الشكل (5) العلاقة $\frac{I_{asy.\text{int}}}{I_{sy}}$ لأجل قيم مختلفة للنسبة $\frac{X}{R}$، ولأجل فترات زمنية مختلفة لفصل تماسات القاطع، وذلك وفقاً للنظم القياسية ANSI C37.5-1979.

وفي دراسات تنسيق الحمايات تستخدم القيم الفعالة للتيار المتناظر في تعيير التأخير الزمني للحواكم، أمَّا من أجل تعيير العناصر الآنية فتستخدم القيم نفسها، ولكن بعد ضربها بعامل خاص لكل نوع من التطبيقات.



الشكل (5) عوامل الضرب للأعطال الثلاثية الطور، وطور مع الأرض استناداً إلى المواصفات القياسية IEEE C 37.5-1979.

5 - حساب تيارات دارات القصر على الشبكة السورية: Fault Current Calculation on Syrian Network

استناداً إلى الدراسة السابقة والبيانات المقدمة من وزارة الكهرباء سيتم حساب دارات القصر على الشبكة السورية 230kV لتحديد سويات العطل على قضبان التجميع لمحطات التحويل وإيجاد التيارات في فروع الشبكة في أثناء حدوث العطل للتأكد من سعات

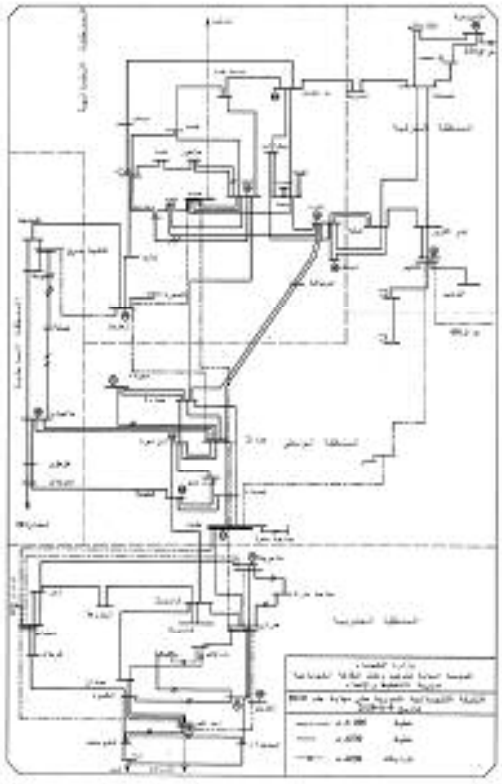
القطع للقواطع المركبة وعيارات دارات الحماية، ويّبين الشكل(6) شبكة النقل السورية 230-400kV، وفيه نلاحظ أن الشبكة 230kV لا تزال تشكل شبكة النقل الرئيسية في المنظومة السورية على الرغم من دخول عدد من محطات التحويل وخطوط النقل 400kV [13].

وسيتم التركيز في هذا البحث على القصر ثلاثي الطور المتناظر الذي يشمل الأطوار الثلاثة معاً، والذي يمثل أقسى أنواع الأعطال الكهربائية على الشبكة، ويتميز بأكبر تيار عطل.

فضلاً عن العطل أحادي الطور نظراً إلى أنَّ معظم الأعطال (نحو 70%) التي تحدث على الشبكات الكهربائية هي من هذا النوع ويمكن أن يؤدي هذا النوع من الأعطال إلى مرور تيار عطل أكبر من تيار العطل المتوازن في بعض الحالات، مثلاً عندما يحدث العطل على قضبان تجميع محطات التوليد مباشرةً أو في حال وجود مجموعة من المحولات المربوطة على التفرع في محطات التحويل حيث يكون تيار العطل أكبر بنحو 20% من تيار العطل الثلاثي الطور بسبب تيارات جسم المحولة التي تخفض المفاعلة الصفرية للمحولة بصورة ملحوظة، وكذلك عند وجود محولات نقطتها النجمية مؤرضة بشكل مباشر[2].

وفي مثل هذه الحالات نعتمد العطل طوراً مع الأرض لاختيار القاطع الآلي وليس العطل المتوازن.

تبدأ عملية الحساب من مخطط الخط الواحد للشبكة وتحديد الممانعات المكافئة لعناصر النظام الكهربائي الفعالة منها (الآلات الدوارة) وغير الفعالة (خطوط – محولات)، وسيتم استخدام المفاعلة تحت العابرة $X''d$ للمولدات وستمثل الخطوط الهوائية بدارة π والمحولات بدارة T حيث يمثل العنصر التسلسلي ممانعة القصر والعنصر التفرعي ممانعة التهييج، أمَّا الحمولات فسيتم تمثيلها بسماحياتها وباستخدام توترات قضبان التجميع قبل العطل.



الشكل (6) الشبكة الكهربائية السورية 230-400kV

وسنعتمد قيم توترات قضبان التجميع قبل العطل من دراسة جريان الحمولة للنظام الكهربائي.

سَتُدْرَسُ دارة القصر الثلاثية الطور المتناظرة على أساس طور واحد، أمَّا الطوران الآخران فيحملان تيارات مماثلة تختلف عن بعضها بعضاً بزاوية الطور.

وسَتُنْجَزُ حسابات العطل باستخدام طريقة مصفوفة ممانعات العقد Z_{bus} وفقاً لما يأتي:

أولاً: العطل الثلاثي الطور المتناظر

سَيُحْسَبُ تيار العطل على قضيب التجميع K مثلاً من العلاقة [5]:

$$I_K(F) = \frac{V_K(0)}{Z_{KK} + Z_f} \quad \dots (12)$$

إذْ :

$V_K(0)$: توتر العقدة k قبل حدوث العطل ويأخذ من نتائج حساب جريان الحمولة على الشبكة قبل حدوث العطل

Z_{KK}: الممانعة الذاتية للعقدة k في مصفوفة ممانعات العقد

Z_f : ممانعة العطل وتفرض مساوية للصفر نظراً إلى عدم توافر معلومات عنها.

أي أنَّه لتحديد مستوى العطل على أي قضيب تجميع نحتاج فقط إلى الممانعة الذاتية لكل عقدة من العقد وتوتر هذه العقد قبل حدوث العطل.

ونحسب توتر قضبان التجميع في أثناء العطل عن طريق تحديد تغير التوتر في شبكة ثيفنين وتطبيق مبدأ التراكم، وذلك بجمع التوتر قبل العطل لكل قضيب تجميع مع تغيير التوتر لقضيب التجميع أي :

$$V_i(F) = V_i(0) - \frac{Z_{iK}}{Z_{KK} + Z_f} \quad \ldots\ldots (13)$$

إذْ :

$V_i(0)$: توتر العقدة إلى قبل حدوث العطل

Z_{iK}: الممانعة المتبادلة بين العقدة i والعقدة k

وبعد معرفة توترات قضبان التجميع في أثناء العطل يحسب تيار العطل في الخطوط، مثلاً يحسب تيار العطل المار في الخط الواصل بين قضيب التجميع i و قضيب التجميع j الذي ممانعته Z_{ij} من العلاقة:

$$I_{ij}(F) = \frac{V_i(F) - V_j(F)}{Z_{ij}} \quad \ldots \quad (14)$$

وهذا التيار هو جزء من تيار العطل المار من العقدة i إلى العقدة j من الشبكة التي حدث فيها العطل.

أمَّا العطل طور مع الأرض فالمعروف أن هذا العطل غير متناظر لذلك سيتم استخدام طريقة المركبات المتناظرة لحساب هذا النوع من الأعطال انطلاقاً من قيمة التوتر قبل حدوث العطل، والممانعات الموجبة Z_1 والسالبة Z_2 و الصفرية Z_0.

ولمَّا كان المولد مصمماً ليعطي توترات متوازنة فإن التوترات المولدة تكون ذات مركبة موجبة فقط، ومن ثَمَّ فإن الشبكة الموجبة فقط تحوي منبعاً للقوة المحركة الكهربائية e.m.f على التسلسل مع الممانعة الموجبة، أما الشبكة السالبة والصفرية فلا تحتوي على منابع للقوة المحركة الكهربائية، وتحتوي فقط على الممانعات السالبة والصفرية على التوالي.

ومن المعروف أن الممانعة الموجبة والسالبة لدارات الخطوط الهوائية متساوية، في حين تختلف الممانعة الصفرية عن الممانعة الموجبة والسالبة حيث يختلف الحقل المغناطيسي الناتج عن التيارات الموجبة والسالبة عن الحقل المغناطيسي الناتج عن التيارات الصفرية.

فيما يخصُّ المحولات $Z_1 = Z_2$ لأن هذه الممانعات غير متعلقة بتعاقب الأطوار شريطة أن تكون التوترات المطبقة متوازنة، تكون الممانعة الصفرية إما مساوية للممانعة الموجبة والسالبة أو لا نهائية وذلك تبعاً لتوصيلات المحولة. وعادةً تكون المقاومة الأومية للملفات صغيرة، ويمكن إهمالها في حسابات دارات القصر.

عند نمذجة المولدات تم أهملت المقاومة الأومية للملفات، واستخدمت فقط مفاعلات الآلات التزامنية: المفاعلة تحت العابرة X''_dو المفاعلة العابرة X'_d، وذلك تبعاً لزمن فصل العطل إذْ تم استخدام المفاعلة تحت العابرة لحظة حدوث العطل، أما المفاعلة العابرة فيتم استخدامها في حالة التأخير الزمني حيث ينخفض مستوى العطل خلال 0.1sec إلى قيم يتم تحديدها استناداً إلى هذه المفاعلة.عند وصول تيار العطل إلى

الحالة المستقرة يتم تحديد تيار العطل تبعاً لقيمة المفاعلة التزامنية للآلة.

ويبيّن الجدول /3/ قيم المفاعلات للآلات التزامنية بالكميات الواحدية [6]:

الجدول /3/ قيم المفاعلات للآلات التزامنية بالكميات الواحدية

Type and rating of machine	Positive sequence			Negative sequence	Zero sequence	Short-circuit ratio
	X_d''	X_d'	X_d	X_2	X_0	
11 kV Salient-pole alternator without dampers	22.0	33.0	110	22.0	6.0	—
11.8 kV 60 MW 75 MVA Turbo-alternator	12.5	17.5	201	13.5	6.3	0.59
11.8 kV 36 MW 70 MVA Gas-turbine turbo-alternator	10.0	14.0	175	13.0	5.0	0.68
11.8 kV 70 MW 87.5 MVA Gas-turbine turbo-alternator	14.0	19.0	195	16.0	7.5	0.55
13.8 kV 100 MW 125 MVA Turbo-alternator	20.0	28.0	206	22.4	9.4	0.58
16.0 kV 275 MW 324 MVA Turbo-alternator	16.0	21.5	160	18.0	6.0	0.40
18.5 kV 300 MW 353 MVa Turbo-alternator	19.0	25.5	265	19.0	11.0	0.40
23 kV 500 MW 588 MVA Turbo-alternator	20.5	28.0	255	20.0	6.0–12.0	0.40
23 kV 600 MW 776 MVA Turbo-alternator	23.0	28.0	307	26.0	15.0	0.50

وتبلغ قيمة التيار المار في الممانعة Z_n بين الحيادي و الأرض ثلاثة أمثال التيار الصفري، كما أن الممانعة الصفرية لها القيمة:

$$Z_0 = Z_n + Z_{e0} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (15)$$

وتحسب قيمة التوترات للطور a من العلاقات:

$$V_{a1} = E_a - I_{a1}Z_1$$
$$V_{a2} = -I_{a2}Z_2 \quad \ldots\ldots\ldots(16)$$
$$V_{a0} = -I_{a0}Z_0$$

إذْ :

E_a :القوة المحركة الكهربائية للشبكة الموجبة.

Z_1 : الممانعة الموجبة للمولد.

Z_2 : الممانعة السالبة للولد.

Z_0 : الممانعة الصفرية، وتساوي الممانعة الصفرية للمولد (Zgo) فضلاً عن ثلاثة أمثال الممانعة إلى الأرض.

ترتبط الشبكات الموجبة والسالبة والصفرية التي تحمل التيارات I_0, I_1, I_2 مع بعضها بعضاً بطريقة معينة لتمثيل شروط العطل غير المتوازن، فمثلاً في حالة عطل طور مع الأرض تمثل شروط هذا العطل بالمعادلات:

$$I_b = 0 \ , I_c = 0 \ , V_a = 0 \ldots\ldots(17)$$

تكون الشبكات المتعاقبة في هذه الحالة متصلة على التسلسل، وتحسب المركبة الموجبة للتيار بطريقة مصفوفة ممانعات العقد من العلاقة [7]:

$$I_{1K} = \frac{V_{1K}^0}{Z_{1K} + Z_{2K} + Z_{oK} + 3Z_f} \ldots\ldots\ldots (18)$$

وفي هذا النوع من الأعطال تكون قيمة المركبة السالبة والصفرية لتيار العطل مساوية لقيمة المركبة الموجبة أي:

$$I_{2K} = I_{0K} = I_{1K} \ldots\ldots.(19)$$

ومن ثَمَّ فإن تيار العطل الكلي لطور مع الأرض يكون:

$$I_K = 3I_{1K} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(20)$$

أما توترات قضبان التجميع في أثناء العطل فيتم تحديد كل منها عن طريق تحديد المركبات الثلاث لكل توتر من العلاقات الآتية:

$$V_{1K}(F) = V_{1K}^0 - Z_{1K}I_{1K} \quad ;i = 1,2,\ldots..n \ldots\ldots\ldots\ldots(21)$$
$$V_{2K}(F) = -Z_{2K}I_{2K}$$
$$V_{0K}(F) = -Z_{0K}I_{0K}$$

وتحسب التيارات في الخطوط بدلالة توترات العقد في أثناء العطل وممانعات هذه الخطوط وعلى نحوٍ مشابه لحالة تيار العطل الثلاثي الطور.

أُجْرِيَتْ سلسلة من الحسابات للتحقق من مستويات العطل على عقد الشبكة 230kV وفروعها المختلفة وذلك بواسطة برنامج تحليل الشبكات الكهربائية PSS/E، وهو برنامج تفاعلي مع المستثمر نستطيع من خلاله دراسة الأعطال بأنواعها المختلفة على عقد الشبكة وفروعها استناداً إلى الخوارزمية المبينة في

الشكل(7). ونقدم فيما يأتي شرحاً موجزاً عن البرنامج وإمكاناته وطريقة إدخال المعطيات وإخراج النتائج:

يعدُّ البرنامج PSS/E برنامجاً شاملاً لتحليل الشبكات الكهربائية، ويشمل ذلك جريان الحمولة وحسابات الأعطال ودراسات الاستقرار[8].

ويضم النموذج الخاص بحسابات دارات القصر عدة خوارزميات لتلبية النواحي المختلفة لتحليل الأعطال سواء كانت ثلاثية الطور أم أحادية الطور أو طوراً مع طور. وتشكل نتائج جريان الحمولة القاعدة الأساس لعمل هذه الخوارزميات، وتعتمد على نظام المركبات المتناظرة الموجبة والسالبة والصفرية والدارات المكافئة لعناصر نظم القدرة الكهربائية اللازمة لتشكيل مصفوفة الممانعات للنظام.

يتم إدخال المعطيات إلى البرنامج عن طريق الملفات العاملة Working Files وتضم معطيات العقد Bus Data والأحمال Load Data والخطوط Branch Data والمحولات Transformers وتصنف هذه الملفات وفقاً لما يأتي:

Power Flow Row Data: وتضم معطيات جريان الحمولة لتشكيل حالة العمل الأساس Initial Working Case

Machine Impedance Data Files: وتغطي معطيات وحدات التوليد في عقد التوليد

Sequence Data Files: وتضم معطيات المركبات السالبة والصفرية لعناصر النظام

Drawing Coordinate Data Files: وتضم الإحداثيات اللازمة لبناء مخطط الخط الواحد لنظام القدرة الكهربائية

Fault Specification Data Files : وتضم البيانات الخاصة بالأعطال من حيث نوعها ومكان حدوثها.

وللتأكد من المعطيات المقدمة يتم تدقيقها من خلال برامج جزئية خاصة، ومن ثم تطبع لتدقيقها من قبل المستثمر.

ونظراً إلى الحجم الكبير الذي تشغله هذه البيانات سنكتفي بعرض بيانات العمل الابتدائية للمولدات الكهربائية في محطات التوليد، كما هي مبينة في الجدول/4/.

الجدول/4/ بيانات العمل الابتدائية للمولدات الكهربائية العاملة في محطات التوليد

X------ BUS -----X	ID	MACHINE INITIAL CONDITIONS ETERM	EFD	POWER	VARS	P.F.	ANGLE
25954 SWDPT01 10.5	1	1.0500	3.0327	20.00	11.56	0.8659	39.25
25955 SWDPTG0210.5	1	1.0500	3.0327	20.00	11.56	0.8659	39.25
31141 TISHST0115.0	1	1.0000	3.0875	177.74	156.72	0.7522	27.88
31142 TISHST0215.0	1	1.0000	3.2035	208.00	157.92	0.7849	31.27
31143 TISHGT0115.0	1	1.0100	2.7062	100.00	82.94	0.7697	22.76
31144 TISHGT0215.0	1	1.0100	2.7062	100.00	82.94	0.7697	22.76
31201 NASRST0115.0	1	1.0100	2.5997	100.00	75.65	0.7975	24.63
31202 NASRST0215.0	1	1.0100	2.6262	100.00	77.48	0.7985	24.32
31203 NASRST0315.0	1	1.0100	2.6262	100.00	77.48	0.7985	24.32
32401 JANDGT0115.0	1	1.0600	2.5077	100.00	61.22	0.8529	19.14
32402 JANDGT0215.0	1	1.0600	2.5077	100.00	61.22	0.8529	19.14
32403 JANDST0135.0	1	1.0600	2.4388	100.00	61.40	0.8522	18.33
32404 JANDST0315.0	1	1.0600	2.4962	100.00	60.22	0.8567	19.29
32405 JANDST0415.0	1	1.0600	2.5724	100.00	66.35	0.8333	21.03
32406 JANDST0215.0	1	1.0600	2.5130	100.00	67.50	0.8388	36.09
32441 MEHRGT0115.0	1	1.0600	2.4073	120.00	91.63	0.9670	51.10
32442 MEHRST0212.0	1	1.0600	2.4065	120.00	91.57	0.9671	51.06
32444 MEHRST0415.0	1	1.0400	2.1377	160.00	49.89	0.9563	45.96
32478 ZANST01 15.0	1	1.0781	2.8611	220.00	140.80	0.8350	41.86
32479 ZANST02 15.0	1	1.0779	2.8536	220.00	144.90	0.8367	41.96
32473 ZANST03 15.0	1	1.0554	2.4649	220.00	90.00	0.9255	47.94
33513 BANIST0315.5	1	1.0100	2.3751	160.00	71.85	0.9122	37.41
33514 BANIST0415.5	1	1.0100	2.3861	160.00	72.85	0.9103	37.30
34611 ZAYDGT0115.0	1	1.0500	2.4164	100.00	64.85	0.8398	35.88
34612 ZAYDGT0215.0	1	1.0500	2.4164	100.00	64.85	0.8398	35.88
34613 ZAYDGT0315.0	1	1.0500	2.4164	100.00	64.85	0.8398	35.88
34651 ALEPST0115.0	1	1.0300	2.6994	213.00	76.55	0.9411	55.77
34652 ALEPST0215.0	1	1.0300	2.7001	213.00	76.65	0.9409	55.78
34653 ALEPST0315.0	1	1.0300	2.6999	213.00	76.56	0.9411	55.77
34654 ALEPST0415.0	1	1.0300	2.5975	200.00	73.50	0.9385	54.15
34655 ALEPST0515.0	1	1.0300	2.6925	213.00	75.65	0.9423	55.93
34721 DAMST01 13.8	1	1.0500	2.1174	85.00	66.39	0.7881	28.87
34722 DAMST02 13.8	1	1.0500	2.0898	85.00	64.18	0.7981	29.56
34726 DAMST04 13.8	1	1.0500	2.0898	85.00	64.18	0.7981	29.56
35701 BATHST0113.8	1	1.0327	1.4971	16.00	2.08	0.9923	22.45
35702 BATHST0213.8	1	1.0325	1.4966	16.00	2.08	0.9923	22.60
35703 BATHST0313.8	1	1.0325	1.4966	16.00	2.08	0.9923	22.60
35711 THAMST0113.8	1	1.0000	1.5404	85.00	26.90	0.9541	32.05
35712 THAMST0213.8	1	1.0000	1.4784	85.00	20.84	0.9712	34.19
35713 THAMST0313.8	1	1.0000	1.4784	85.00	20.84	0.9712	34.19
35714 THAMST0413.8	1	1.0000	1.4784	85.00	20.84	0.9712	34.19
35715 THAMST0513.8	1	1.0000	1.4784	85.00	20.84	0.9712	34.19
35716 THAMST0613.8	1	1.0000	1.4784	85.00	20.84	0.9712	34.19
35921 TADMST0110.5	1	1.0000	2.8248	32.00	17.39	0.8786	36.51
35922 TADMST0210.5	1	1.0000	2.7529	30.00	17.30	0.8663	34.69
35923 TADMST0310.5	1	1.0000	2.8248	32.00	17.39	0.8786	36.51
35951 SMEDGT0111.5	1	1.1000	2.9748	30.00	22.22	0.8036	32.33
35952 SMEDGT0211.5	1	1.1000	3.1310	34.00	23.49	0.8228	35.22
35953 SMEDGT0311.5	1	1.1000	2.9671	28.00	22.98	0.7730	29.94
35954 SMEDGT0411.5	1	1.1000	3.1605	35.00	23.58	0.8293	36.05
35955 SMEDGT0511.5	1	1.1000	2.9748	30.00	22.22	0.8036	32.33
46101 BIRSGSK115.8	1	1.0767	1.3646	55.00	2.00	0.9993	23.88
46102 BIRSGSK215.8	1	1.0756	1.3522	50.00	2.00	0.9992	20.16
46103 BIRSGSK315.8	1	1.0767	1.3646	55.00	2.00	0.9993	23.88
46104 BIRSGSK415.8	1	1.0756	1.3522	50.00	2.00	0.9992	20.16
62428 NOMSREL115.0	1	0.9855	1.5110	28.00	14.00	0.8944	26.52
65954 SWDPTG0410.5	1	1.0282	1.8920	15.00	2.00	0.9932	43.77
65955 SWDPTG0510.5	1	1.0282	1.8920	15.00	2.00	0.9932	43.77

إذْ:

ID: رمز مرجعي إذا كانت قيمته مساوية للواحد فهذا يعني أن المولد في حالة عمل، أما إذا كانت مساوية للصفر فذلك يدل على أن المولد خارج الخدمة

ETERM: التوتر على أقطاب المولد

EFD: توتر دارة التهييج
POWER: الاستطاعة الفعلية على خرج المولد
VARS: الاستطاعة الردية على خرج المولد
P.F.: عامل الاستطاعة
ANGEL: زاوية العمل(العزم) الابتدائية

أمَّا نتائج الحسابات فتُنقلُ إلى ملف خاص بالنتائج التي يتم ترتيبها على شكل جداول يمكن قراءتها على شاشة الحاسب مباشرة أو إخراجها بشكل مطبوع Printout.

تم بدايةً إنجاز حساب المركبة المتناظرة المتناوبة من تيار العطل الثلاثي والأحادي الطور على عقد الشبكة والخطوط المتصلة بها جميعها دون تأخير زمني، وتبّين الجداول /5/و/6/ هذه النتائج على كل من عقدة عدرا /2/ وحماه/2/ والخطوط المتصلة بها كأمثلة على هذه الحسابات.

وبيّن الجدول /7/ ملخصاً لنتائج الحسابات على العقد جميعها، ونسجل الملاحظات التالية على نتائج هذه الدراسة:

1- تراوحت قيمة تيار العطل (المركبة المتناوبة) في حالة العطل الثلاثي الطور بين قيمة عظمى 30.618KA على محطة حماه/2 / وقيمة دنيا 2.25KA على محطة الدوير، وفي حالة العطل الأحادي بين قيمة عظمى 25.897KA على محطة حماه /2/ وقيمة 2.44KA على محطة الدوير.

2- يلاحظ زيادة مستويات العطل على ما كانت عليه قبل العام 2000، وذلك نتيجة دخول عدد من محطات التوليد الجديدة، فضلاً عن التوسعات في بعض محطات التوليد القائمة، مما أسهم في زيادة عدد المنابع المغذية لنقطة العطل. ومن المتوقع زيادة سوية العطل مرة أخرى نتيجة عمل المنظومة الكهربائية السورية ضمن شبكة الارتباط الثمانية.

3- قيمة تيار العطل الثلاثي الطور أكبر من قيمة تيار العطل الأحادي الطور في كثير من عقد الشبكة، غير أن هناك بعض العقد مثل التيم و حلب / A / وحلب /B / وعدرا /2/ والميدان /2/ التي يكون فيها تيار العطل الأحادي الطور، أكبر من تيار العطل الثلاثي الطور ويعود السبب في ذلك إلى صغر قيمة الممانعة الصفرية للمولدات، أو وجود عدد من المحولات المربوطة على التفرع أو مؤرضة بشكل مباشر في محطات التحويل لتلك العقد.

4- تراوحت قيمة زاوية العطل في المجال [70-،85-] درجة؛ مما يشير إلى عامل استطاعة متدنٍ في حالات الأعطال نظراً إلى الطبيعة الردية للشبكة في هذه الحالات.