

حساب تيار القصر الأحادي الطور للخطوط الهوائية ذات التوتر $380 V$ بالأخذ بالحسبان عناصر تأريض الناقل الصفري

د. علاء الدين حسام الدين*

(تاريخ الإيداع 30 / 6 / 2011. قُبِلَ للنشر في 11 / 8 / 2011)

□ ملخص □

عند حدوث قصر أحادي الطور في نهاية الخطوط الهوائية ذات التوتر المنخفض $380/220 V$ من المهم معرفة قيمة تيار القصر في مكان وجود الحماية من أجل اختبار حساسيتها. إلا أن حساب تيار القصر يتم بدون الأخذ بالحسبان مقاومة عناصر التأريض، فالمراجع العلمية تعطي قيمة الممانعة الطولية لحلقة ناقل الطور والناقل الصفري في خطوط النقل الهوائية بإهمال عناصر تأريض الناقل الصفري.

نحاول في بحثنا هذا اقتراح طريقة تأخذ بالحسبان عناصر التأريض المذكورة، وذلك عند حساب تيار القصر الأحادي الطور في نهاية خط النقل الهوائي المحمل بحمولة مركزة.

استخلصت النتائج اعتماداً على برنامج *MATLAB*، وقد أظهرت ضرورة أخذ وحدات التأريض بالحسبان عند حساب تيار القصر الأحادي الطور، كما أنه من الضروري إدخال عوامل تصحيح على العلاقات الرياضية التي يتم من خلالها حساب تيار القصر الأحادي الطور، حيث يقدم هذا البحث عوامل التصحيح المذكورة بالنسبة لنواقل الخطوط الهوائية المستخدمة في شبكات التوتر المنخفض.

الكلمات المفتاحية: عناصر التأريض، الخطوط الهوائية، تيار القصر.

* أستاذ مساعد في قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Single phase short circuit calculation for 380 V overhead lines considering the elements used in neutral conductor earthing

Dr. Alaa Eldin Housam Eldin *

(Received 30 / 6 / 2011. Accepted 11 / 8 / 2011)

□ ABSTRACT □

When a single phase short circuit happens at the end of overhead lines 380/220 V, it is important to know the value of short current in the place where protection is in order to test its sensitivity.

The short circuit current calculation is carried out without considering the resistance of earthing elements. The scientific references give the value of longitudinal impedance of the phase conductor loop and neutral conductor in overhead lines by ignoring the elements of neutral conductor earthing.

In our research, we are trying to suggest a method considering earthing elements, when we calculate the single phase short circuit current at the end of overhead line loaded by concentrated load.

The MATLAB has been used to get the results. The results showed the necessity of considering earthing units in calculating the single phase short circuit, and it is necessary to insert a correction factor in the mathematical equations which are used to calculate the single phase short circuit factor for overhead lines conductors which are used in low voltage networks.

Keywords: Earthing Elements, Overhead Lines, short circuit current.

* Assistant Professor at Electrical Engineering Department, Faculty of Mechanical & Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

عند حدوث قصر أحادي الطور في نهاية الخطوط الهوائية ذات التوتر المنخفض $380/220 V$ من المهم معرفة قيمة تيار القصر في مكان وجود الحماية من أجل اختبار حساسيتها. إلا أن حساب تيار القصر يتم بدون الأخذ بالحسبان مقاومة عناصر التأريض. فالمراجع العلمية تعطي قيمة الممانعة الطولية لحلقة ناقل الطور والناقل الصفري في خطوط النقل الهوائية بإهمال عناصر تأريض الناقل الصفري.

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف البحث إلى دراسة تأثير وحدات التأريض للناقل الصفري للخطوط الهوائية ذات الجهد $380 V$ المحملة بحمولة مركزة في نهايتها، واقتراح طريقة تأخذ بالحسبان عناصر التأريض المذكورة، وذلك عند حساب تيار القصر الأحادي الطور في نهاية خط النقل الهوائي المحمل بحمولة مركزة، مما يساهم في اختبار حساسية الحماية المركبة على خطوط النقل بشكل سليم .

طرائق البحث ومواده:

لاختبار حساسية حماية الخطوط الهوائية ذات التوتر $380 V$ للقصر الأحادي الطور، لا بد من معرفة قيمة التيار في مكان توضع الحماية عند حدوث قصر أحادي الطور في نهاية الخط، والذي يتم حسابه وفقاً للعلاقة التالية [1], [2]:

$$I_K^{(1)} = \frac{U_n(ph)}{\frac{Z_T^{(1)}}{3} + Z} \quad (1)$$

حيث:

$U_n(ph)$ - التوتر الاسمي الطوري لملف الثانوي لمحور خط النقل.
 $Z_T^{(1)}$ - الممانعة الكلية للمحول عند حدوث قصر أحادي الطور.
 Z - الممانعة الكلية للحلقة المكونة من ناقل الطور والناقل الصفري.

تقدم المراجع العلمية قيمة الممانعة الطولية لحلقة ناقل الطور والناقل الصفري في خطوط النقل الهوائية Z_T بإهمال عناصر تأريض الناقل الصفري [1]، واستناداً لذلك سنحاول في بحثنا هذا اقتراح طريقة تأخذ بالحسبان عناصر التأريض المذكورة، وذلك عند حساب تيار القصر الأحادي الطور في نهاية خط النقل الهوائي المحمل بحمولة مركزة.

يمكن تمثيل مخطط التتابع الصفري لمثل هذه الخطوط كما هو موضح بالشكل (I).

- المصفوفة $\underline{Z}_{PH,N}$:

$$\underline{Z}_{PhN,1} = R_1 + jX_M \quad (6)$$

$$\underline{Z}_{PhN,m} = R_{EU} + jX_M \quad (7)$$

باقي عناصر المصفوفة $\underline{Z}_{PH,N}$ تكون مساوية jX_M .
حيث:

R_{EU} - المقاومة الفعلية لوحدة التأسيس المكررة.
 R_N, X_N - المفاعلة التحريضية والمقاومة الفعلية للناقل الصفري.
 X_M - المفاعلة التحريضية التبادلية بين الطور والناقل الصفري.
 R_1 - المقاومة الفعلية للفرع I ، الشكل (1)، وتعطى بالعلاقة:

$$R_1 = \frac{R_{N,T} \cdot R_{EU}}{R_{N,T} + R_{EU}} \quad (8)$$

حيث:

$R_{N,T}$ - المقاومة الفعلية لوحدة تأسيس حيايدي المحولة.

إذا كانت $m=1$ فإن العلاقة (2) تأخذ الشكل:

$$\underline{K}_1 = \frac{R_1 + R_{EU} + jX_N}{R_1 + R_{EU} + R_N + jX_N} \quad (9)$$

يتم الحصول على مقاومة التتابع الصفري لـ i جزء من الخط، والمحددة بين وحدات التأسيس المتجاورة، وذلك بإدخال هذه الوحدات في الحساب، وفق المعادلات التالية [3],[4]:

- يتم حساب مقاومات فروع الدارات المكافئة، الموافقة لناقل الطور من العلاقة:

$$\underline{Z}_{Pho,i} = R_{Ph} + j(X_{Ph} + 2X_M - 3 \cdot \underline{k}_i \cdot X_M) \quad (10)$$

- يتم حساب مقاومات فروع الدارات المكافئة، الموافقة للناقل الصفري من العلاقة:

$$\underline{Z}_{No,i} = 3 \cdot \underline{K}_i \cdot R_M + j3 \cdot (3 \cdot \underline{k}_i \cdot X_N - X_M) \quad (11)$$

حيث:

R_{Ph}, X_{Ph} - المفاعلة التحريضية والمقاومة الفعلية الطور.
 \underline{k}_i - عنصر المصفوفة \underline{K} الموافق للجزء المدروس من الخط.

للحصول على ممانعة التتابع الصفري للخطوط نجمع ممانعات جميع الأجزاء:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{O,EU} = \sum_{i=1}^m (\underline{Z}_{Ph,O,i} + \underline{Z}_{N,O,i}) = m [R_{Ph} + j(X_{Ph} - X_M)] + \\ + 3 \sum_{i=1}^m \underline{k}_i [R_N + j(X_N - X_M)] \quad (12) \end{aligned}$$

الممانعة الطولية للتتابع الصفري:

$$\underline{Z}_{O,EU,l} = \frac{\underline{Z}_{O,EU}}{l} = \frac{\underline{Z}_{O,EU}}{m \cdot l_i} = R_{Ph,l} + j(X_{Ph,l} - X_{M,l}) + 3 \cdot \underline{K} \cdot [R_{N,l} + j(X_{N,l} - X_{M,l})] \quad (13)$$

حيث:

$$\underline{K} = \sum_{i=1}^m \frac{k_i}{m} \quad (14)$$

 l - طول الخط. l_i - طول أحد أجزاء الخط. $R_{Ph,l}, R_{N,l}$ - المقاومة الفعلية الطولية للطور وللناقل الصفري. $X_{Ph,l}, X_{N,l}$ - المفاعلة التحريضية الذاتية الطولية للطور وللناقل الصفري. $X_{M,l}$ - المفاعلة الطولية للتحريض المتبادل بين النواقل.

الممانعة الطولية للتتابع المباشر [5]:

$$\underline{Z}_{1,l} = R_{Ph,l} + j(X_{Ph,l} - X_{M,l}) \quad (15)$$

وبالتالي:

$$\underline{Z}_{O,EU,l} = \underline{Z}_{1,l} + 3 \cdot \underline{K} \cdot [R_{N,l} + j(X_{N,l} - X_{M,l})] \quad (16)$$

يتم حساب المفاعلة التحريضية الذاتية الطولية للناقل، والمفاعلة التحريضية المتبادلة بين النواقل وفق

العلاقات:

$$X_{N,l} = 0.1445 \cdot \left(\lg \frac{2000}{r} - 0.326 \right) \quad (17)$$

$$X_{M,l} = 0.1445 \cdot \left(\lg \frac{2000}{D} - 0.435 \right) \quad (18)$$

حيث:

 r - نصف قطر مقطع الناقل، [m]. D - المسافة بين محاور النواقل، [m]. $X_{N,l}, X_{M,l}$ - واحدهما [Ω/km].

تم استنتاج هذه المعادلات من علاقات التحريض لناقل واحد، ومن التحريض المتبادل بين مجموعة نواقل

موصولة تفرعياً [6].

تؤخذ القيمة الحسابية لمفاعلة التحريض المتبادل كقيمة وسطية للمفاعلات المتبادلة بين جميع أزواج النواقل،

وذلك من أجل جميع الحالات الممكنة لتوضّعها، وهي تبلغ حوالي [Ω/km] 0.458.

من جهة ثانية، وللسهولة، يمكن إهمال تأثير الحمولة على الناقل الصفري عند حدوث قصر أحادي الطور

[7]، وبالتالي فإنه عند حدوث قصر أرضي معدي لأحد الأطوار في نهاية الخط، يمكن التعبير عن التيار المار في ناقل الطور في مكان القصر باحتساب وحدات التأثير وفق العلاقة:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{K,EU}^{(1)} &= \frac{3 \cdot \underline{U}_{Ph}}{2 \cdot \underline{Z}_{T,1} + \underline{Z}_{T,0} + 2 \cdot \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{0,EU}} = \\ &= \frac{\underline{U}_{Ph}}{\frac{(2 \cdot \underline{Z}_{T,1} + \underline{Z}_{T,0})}{3} + \frac{(2 \cdot \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{0,EU})}{3}} = \frac{\underline{U}_{Ph}}{\frac{\underline{Z}_T^{(1)}}{3} + \underline{Z}_{EU}} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\underline{I}_{K,EU}^{(1)} \approx \frac{\underline{U}_{n,Ph}}{\frac{\underline{Z}_T^{(1)}}{3} + \underline{Z}_{EU}} \quad (20)$$

حيث:

$\underline{Z}_{T,1}, \underline{Z}_{T,0}$ - ممانعات التتابع الصفري والمباشر.

\underline{Z}_1 - ممانعة التتابع المباشر للخط.

\underline{Z}_{EU} - ممانعة الحلقة المكونة من ناقل الطور والناقل الصفري باحتساب وحدات التأثير.

من العلاقة (19) نجد:

$$\underline{Z}_{EU,l} = \frac{(2 \cdot \underline{Z}_{1,l} + \underline{Z}_{0,EU,l})}{3} \quad (21)$$

وفقاً للمعادلة (16) نجد:

$$\underline{Z}_{EU,l} = \underline{Z}_{1,l} + \underline{K} \cdot [R_{N,l} + j(X_{N,l} - X_{M,l})] \quad (22)$$

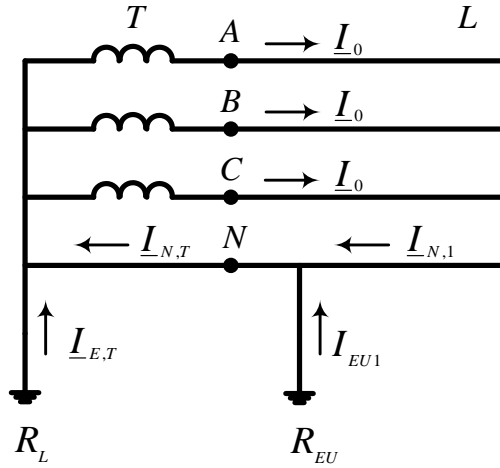
عند عدم وجود وحدات تأثير يكون التيار في الناقل الصفري مساوٍ لثلاثة أضعاف تيار التتابع الصفري في الخط، وبالتالي فإن جميع عناصر المصفوفة \underline{K} تكون مساوية (1). لذلك وبتعويض $\underline{K} = 1$ في العلاقة (22) فإننا نحصل على الممانعة الطولية لحلقة الطور والناقل الصفري بدون احتساب وحدات التأثير. إذا اعتبرنا أن:

$$K_Z = \frac{\underline{Z}_{EU,l}}{\underline{Z}_1} \quad (23)$$

فإننا نستطيع التعبير عن الممانعة \underline{Z}_{EU} وفق العلاقة:

$$\underline{Z}_{EU} = K_Z \cdot \underline{Z}_1 \cdot l \quad (24)$$

يمكن تمثيل تيارات الأطوار الثلاثة وتيار الحيادي وتيار التتابع الصفري في الشبكة الهوائية وفق الدارة المبينة بالشكل (2)، [8], [9].



الشكل (2) دارة لتحديد التيار في الناقل الصفري، حيث:
 T - الملفات الثانوية للمحول، L - خط النقل، EUI - وحدة التأريض على المسند الأول.

اعتماداً على الدارة المبينة في الشكل (2) يكون:

$$K_N = \frac{I_{N,T}}{3I_0} = \left| \frac{I_{N,T}}{3I_0} \right| = \left| \frac{3I_0 - I_{E,T}}{3I_0} \right| = \left| 1 - \frac{I_{E,T}}{3I_0} \right| = \left| 1 - \frac{(3I_0 - I_{N,1})}{3I_0} \cdot \frac{R_{EU}}{(R_L + R_{EU})} \right| =$$

$$= \left| 1 - (1 - K_1) \cdot \frac{R_{EU}}{R_L + R_{EU}} \right| = \left| \frac{R_L + K_1 \cdot R_{EU}}{R_L + R_{EU}} \right| \quad (25)$$

حيث:

$I_{N,T}$ - تيار الناقل الصفري.

I_0 - تيار التتابع الصفري في الخط.

$\frac{I_{N,1}}{3I_0}$ - أول عناصر أعمدة المصفوفة K ، والمحدد وفق العلاقات (2) أو (9).

عند عدم حمولة يكون:

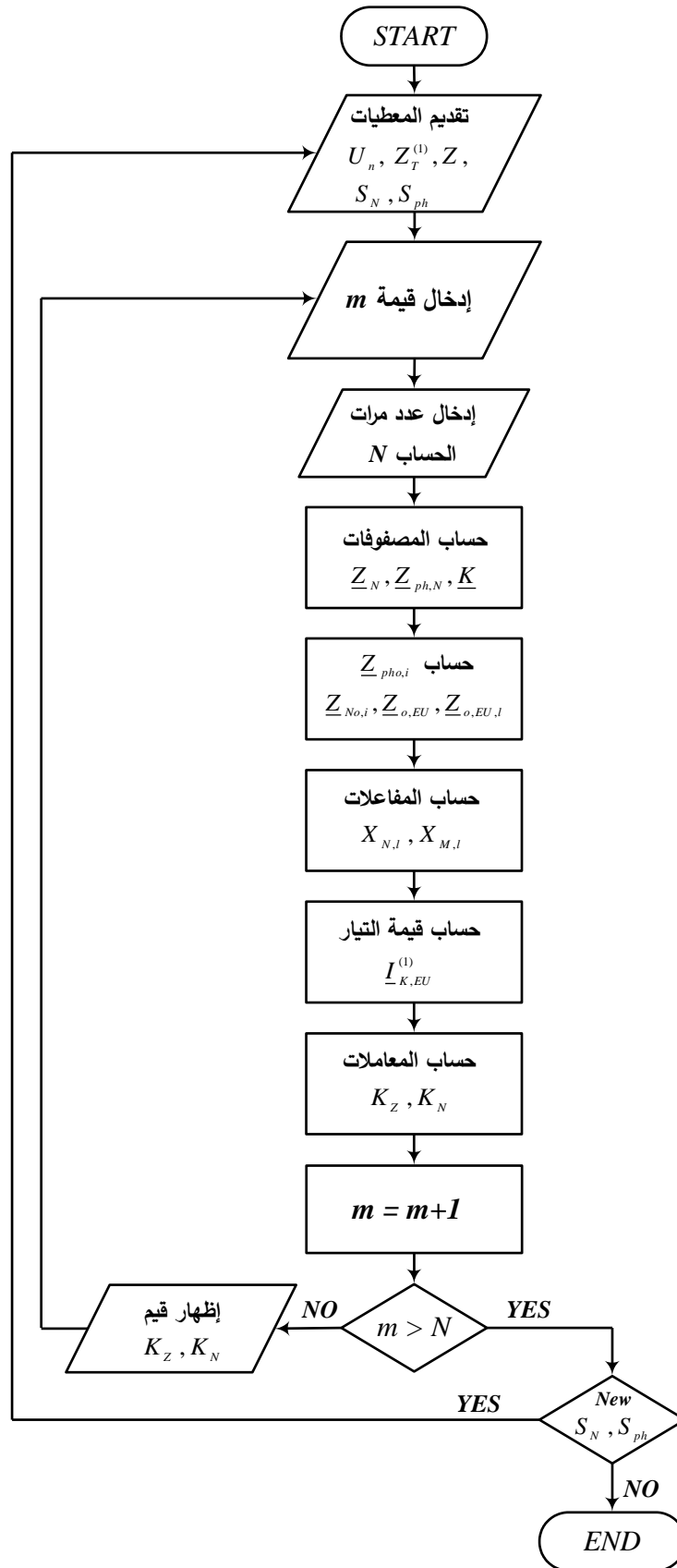
$$3I_0 = I_{K,EU}^{(1)}$$

وبالتالي:

$$K_N = \frac{I_{N,T}}{I_{K,EU}^{(1)}} \quad (26)$$

النتائج والمناقشة:

تم وفقاً للمعادلات السابقة وضع برنامج حاسوبي باستخدام بيئة *MATLAB* لحساب الممانعة Z_l والعاملين K_N و K_Z ، وذلك من أجل مقاطع الأسلاك الأكثر استخداماً لنواقل الأطوار (S_{ph})، وللناقل الصفري (S_N) للخطوط الهوائية ذات الجهد $380 V$ وفق معطيات الشبكة السورية، وذلك استناداً للخوارزمية المبينة بالشكل (3).



الشكل (3) خوارزمية حساب عملي التصحيح K_Z و K_N .

تم تنسيق النتائج كما يلي:

يبين الجدول (1) قيم الممانعة Z_l حسب مقطع الناقل الصفري:

الجدول (1) قيم الممانعة Z_l حسب مقطع الناقل الصفري.

قيمة الممانعة Z_l , [$m\Omega/m$] حسب مقطع الناقل الصفري [mm^2].					مقطع ناقل الطور mm^2
70	50	35	25	16	
-	-	-	-	3.74	16
-	-	-	2.37	3.05	25
-	-	1.82	2.09	-	35
-	1.34	1.57	1.85	-	50
1.04	1.18	1.41	-	-	70

تم تحديد عامل التصحيح K_Z بدلالة عدد أجزاء (حلقات) الناقل الصفري m ، وذلك بالنسبة لنفس المقاطع المبينة في الجدول السابق للنواقل الطورية وللناقل الصفري، ويبين الجدول (2) قيم هذا العامل:

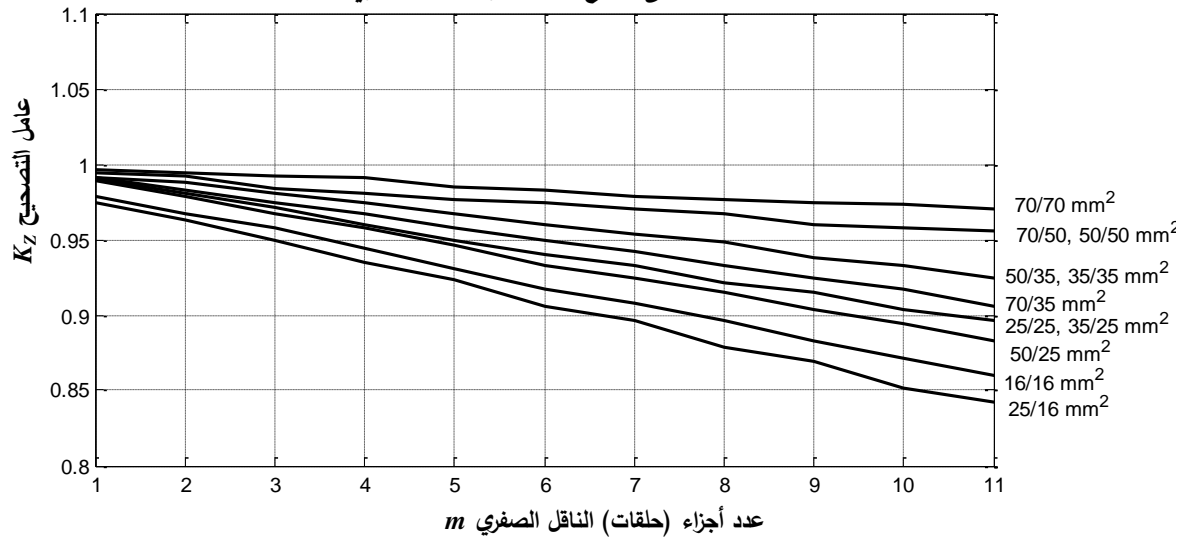
الجدول (2) قيم عامل التصحيح K_Z بدلالة عدد أجزاء (حلقات) الناقل الصفري m ،

وذلك بالنسبة لنفس المقاطع المبينة في الجدول (1) للنواقل الطورية وللناقل الصفري.

$\frac{A_{Ph}[mm^2]}{A_N[mm^2]}$	70/70	70/50 50/50	50/35 35/35	70/35	25/25 35/25	50/25	16/16	25/16
$m = 1$	0.996	0.994	0.991	0.991	0.99	0.989	0.979	0.975
$m = 2$	0.994	0.992	0.988	0.983	0.981	0.979	0.967	0.963
$m = 3$	0.992	0.984	0.981	0.975	0.971	0.967	0.958	0.95
$m = 4$	0.991	0.981	0.975	0.967	0.96	0.958	0.944	0.935
$m = 5$	0.985	0.977	0.967	0.958	0.95	0.946	0.931	0.923
$m = 6$	0.983	0.975	0.96	0.95	0.94	0.933	0.917	0.906
$m = 7$	0.979	0.97	0.954	0.942	0.933	0.925	0.908	0.896
$m = 8$	0.977	0.967	0.948	0.933	0.921	0.915	0.896	0.879
$m = 9$	0.975	0.96	0.938	0.925	0.915	0.904	0.883	0.869
$m = 10$	0.973	0.958	0.933	0.917	0.904	0.894	0.871	0.852
$m = 11$	0.97	0.956	0.925	0.906	0.896	0.883	0.86	0.842

يبين الشكل (4) علاقة عامل التصحيح K_Z بدلالة عدد حلقات النواقل الصفرية m ، ومقاطع نواقل الأطوار والناقل الصفري حسب قيم الجدول (2):

تحديد عامل التصحيح K_z اعتماداً على عدد أجزاء الناقل الصفري m ،
وعلى مقاطع ناقل الطور والناقل الصفري



الشكل (4) عامل التصحيح K_z .

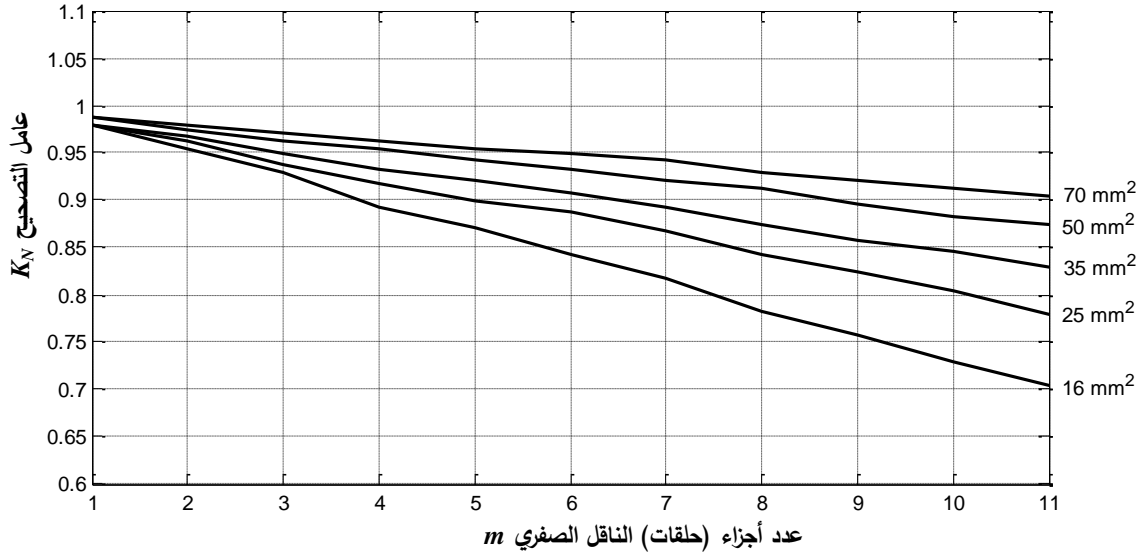
تم تحديد عامل التصحيح K_N بدلالة عدد أجزاء (حلقات) الناقل الصفري m ، وذلك بالنسبة لمقطع الناقل الصفري، ويبين الجدول (3) قيم هذا العامل:

الجدول (3) قيم عامل التصحيح K_N بدلالة عدد أجزاء (حلقات) الناقل الصفري m ،
وذلك بالنسبة لمقطع الناقل الصفري.

$A_N [mm^2]$	70	50	35	25	16
$m = 1$	0.988	0.988	0.979	0.979	0.979
$m = 2$	0.98	0.975	0.967	0.963	0.954
$m = 3$	0.971	0.963	0.95	0.938	0.93
$m = 4$	0.963	0.954	0.933	0.917	0.892
$m = 5$	0.954	0.942	0.921	0.9	0.871
$m = 6$	0.95	0.933	0.908	0.888	0.842
$m = 7$	0.942	0.921	0.892	0.867	0.817
$m = 8$	0.93	0.913	0.875	0.842	0.783
$m = 9$	0.921	0.896	0.858	0.825	0.758
$m = 10$	0.912	0.883	0.846	0.804	0.729
$m = 11$	0.904	0.875	0.829	0.78	0.704

يبين الشكل (5) علاقة عامل التصحيح K_N بدلالة عدد حلقات النواقل الصفرية m ، ومقطع الناقل الصفري حسب قيم الجدول (3):

تحديد عامل التصحيح K_N اعتماداً على عدد أجزاء الناقل الصفري m وعلى مقطع هذا الناقل



الشكل (5) عامل التصحيح K_N .

تؤخذ المسافة بين وحدات التأريض عادة مساويةً 100 m ، وتبلغ ممانعة كلٍ منها حوالي $10\ \Omega$ ، كما أن ممانعة وحدة تأريض حيادي المحول تبلغ حوالي $1\ \Omega$. وتعد هذه القيم هي الحد الأدنى، ويكون أثر وحدات التأريض عندها أعظمياً. ونشير هنا إلى أن المقاومة الفعلية للنواقل أخذت مساويةً للمقاومة الكهربائية عند الدرجة 20°C .

بأخذ المعطيات السابقة بالحسبان يمكن حساب:

تيار الخط بدون أخذ تأثير وحدات التأريض وفق العلاقة (1).

تيار ناقل الطور عند الأثر الأعظمي لوحدة التأريض وفق العلاقة (20)، وذلك بتحديد Z_{EU} من العلاقة (24).

تيار الناقل الصفري عند التأثير الأعظمي لوحدة التأريض:

$$I_{N,T} = K_N \cdot \underline{I}_{K,EU}^{(1)} \quad (27)$$

الحسابات المعتمدة على الطريقة السابقة أظهرت أنه عند أخذ وحدات التأريض بالحسبان فإن التيار في الطور المصاب بالعطل يكون دائماً أكبر من التيار المحسوب وفق العلاقة (1). في هذه الحالة فإن الخطأ النسبي من أجل الطول الفعلي للخط يبلغ حوالي 13% . وفيما يتعلق بالتيار في الناقل الصفري فإنه يبدو أقل من قيمة التيار المحسوب بدون أخذ وحدات التأريض بالحسبان، وهنا فإن القيمة الأعظمية بالنسبة للخطأ تبلغ حوالي 16% .

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

1. تم وضع النموذج الرياضي لدراسة تأثير وحدات التأريض في الناقل الصفري للخطوط الهوائية ذات الجهد $380 V$.
2. تم بالاستناد إلى النموذج الرياضي تحديد عوامل التصحيح التي يجب أخذها بالحسبان عند حساب تيار القصر الأحادي الطور باستخدام العلاقة (I) ، وذلك وفقاً لمقطع الناقل الصفري.
3. أظهرت نتائج البحث أنه عند أخذ وحدات التأريض بالحسبان فإن التيار في الطور المصاب بالعطل يكون دائماً أكبر من التيار المحسوب وفق العلاقة (I) ، وفي هذه الحالة فإن الخطأ النسبي من أجل الطول الفعلي للخط يبلغ حوالي 13% .
4. أظهرت النتائج أن قيمة تيار الناقل الصفري تكون أقل من قيمة التيار المحسوب بدون أخذ وحدات التأريض بالحسبان، وتبلغ القيمة الأعظمية بالنسبة للخطأ حوالي 16% .

التوصيات:

1. نتيجةً للتأثير الكبير لوحدة التأريض في الناقل الصفري للخطوط ذات الجهد $380 V$ بحمولة مركزة فإنه من الضروري أخذ هذه الوحدات بالحسبان عند حساب تيار القصر الأحادي الطور، مما يعطي نتائج جيدة في مجال تنسيق الحماليات.
2. من الضروري إدخال عوامل تصحيح إلى العلاقة (I) ، والتي تم اقتراحها في هذا البحث.

المراجع:

1. VIV CHEN, Application Guide for the protection at L.V. Distribution Systems. Published by Circuit Breaker Industries Ltd. South Africa, 1997,234.
2. БЕЛЯЕВ А. В. Выбор аппаратуры защит и кабелей в сетях 0.4 кВ. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние,1988, 32-40.
3. АНДРЕЕВ В. А., Дубов А. Л. Шишкин В. Ф. Влияние заземляющих устройств нулевого провода на токи нулевой последовательности в воздушных сетях напряжением 0.38 кВ.//Электричество-1989.-№12,19-25.
4. EG-0 Power System Earthing Guide - Part 1:management principles version 1, Energy Networks Association (ENA), May 2010, 115.
5. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах.- М.- Л.: Энергия, 1964.
6. Общая электротехника: Учеб. пособие для вузов/ под ред. д-ра техн. наук А. Т. Блажкина. -4-е изд., перераб. и доп. Л: Энергоатомиздат, Ленингр. Отд-ние, 1986, 562.
7. НЕЙФЕЛЬД М. Р. Заземление, защитные меры электробезопасности. – 4-е изд.- М. – Энергия, 1971,44-56.
8. د. علاء الدين حسام الدين – د. طارق إبراهيم. حماية نظم القدرة الكهربائية، جامعة تشرين، 2002، 530.
9. د. هاني عبيد. حسابات قصر الدارة: المدخل الهندسي لحسابات تيار قصر الدارة في المشاريع الصناعية والتجارية. دار الشروق للنشر والتوزيع، عمان – الأردن 2001، 326.