

دراسة أثر التأريض المكرر للناقل الصفري على ضياعات الاستطاعة في الشبكات الكهربائية $0.4[kV]$

الدكتور مسلم العبد الله*

الدكتور فيصل شعبان**

(تاريخ الإيداع 16 / 3 / 2010. قُبل للنشر في 15 / 6 / 2010)

□ ملخص □

يقدم هذا البحث أسلوباً يوضح كيفية اعتبار التأريض المكرر للناقل الصفري عند حساب مختلف أنظمة العمل وضياع الاستطاعة الكهربائية في شبكات التوزيع الكهربائية ذات الجهد $0.4[kV]$ ، وذلك باستخدام طريقة جهود العقد التي تسمح بتدقيق وسائط (بارامترات) نظام الناقل الصفري. بالنتيجة تم التوصل إلى أن اعتبار التأريض المكرر للناقل الصفري سيؤثر على وسائط النظام وعلى ضياع الاستطاعة في شبكة $0.4[kV]$ ، وأن قوة التأثير تتناسب طردياً مع درجة عدم تناظر تيارات أحمال الأطوار في الشبكة، وعكساً مع مقاومة أجهزة التأريض والمؤرضات (الكتروادات التأريض).

الكلمات المفتاحية: الناقل الصفري، ضياع الاستطاعة، الشبكة الكهربائية، أجهزة التأريض.

* أستاذ مساعد - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - جامعة البعث - حمص - سورية.

** أستاذ مساعد - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Studying The Effect of Repeated Earthing of Zero Conductor on Electric Power Losses in 0.4[Kv] Electrical Networks

Dr. Msallam Alabdallah*
Dr. Faisal Shaaban**

(Received 16 / 3 / 2010. Accepted 15 / 6 / 2010)

□ ABSTRACT □

This research explains the effect of repeated earthing of zero conductor on electric power losses in distribution networks with 0.4 [kV], using the method of nodal potentials. That method allows us to check the parameters of zero conductors.

The results have been shown that repeated earthing of zero conductor affects the mode parameters and electric power losses in 0.4 [kV] distribution networks, with the fact that influence force in direct proportion to the unsymmetrical degrees of load phase currents and inverse proportion to the resistance of earthing devices and rods .

Key words: Zero conductor, power losses, electrical network, earthing devices.

*Assistant professor, Electrical power Department, Albaath University, Homs, Syria.

**Assistant professor, Electrical power Department, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

تقوم الأقسام الفنية - الإنتاجية ودوائر التصميم في المؤسسات الكهربائية دائماً بإجراء حسابات أنظمة الشبكات الكهربائية المنفذة والمصممة للتنفيذ ذات الجهد $0.4[kV]$. ويتم عادة حساب النظام باستخدام الخوارزمية المبسطة التي تعتمد على المبادئ الآتية [1]:

1- يتم تحديد الممانعات الكلية Z_i لفروع شبكة التوزيع الكهربائية اعتماداً على المعطيات المتوفرة عن أطوال وأنواع نواقل هذه الشبكة:

$$Z_i = R_i + jx_i = (R_{0i} l_i) + j(x_{0i} l_i) \quad (1)$$

حيث R_{0i}, x_{0i} : المقاومة الفعلية النوعية والمفاعلة التحريضية النوعية للناقل.

l_i : طول الفرع (i).

وباعتبار أن الأطوار A, B, C والخط الصفري N يمكن أن تكون منفذة بنواقل مختلفة، فإن الممانعات $Z_{Ai}; Z_{Bi}; Z_{Ci}; Z_{Ni}$ ستحسب باستخدام العلاقة (1) بشكل مستقل.

2- يتم تحديد التيارات الكلية (العقدية) التي تستجرها الأحمال I_{Kj} اعتماداً على القيم المعطاة للاستطاعات الفعلية والرديدة للأحمال في عقد شبكة التوزيع الكهربائية:

$$I_{Kj} = \frac{P_{Kj} + jQ_{Kj}}{U_K} \quad (2)$$

حيث U_K : توتر الطور على قضبان الجهد المنخفض لمحولات محطات التحويل $20 / 0.4 [kV]$.

P_{Kj}, jQ_{Kj} : الاستطاعات الفعلية والرديدة الطورية للأحمال في عقد الشبكة $0.38[kV]$ ؛ $K = A, B, C$

3- يتم إيجاد التيارات في نواقل فروع شبكة التوزيع الكهربائية I_{Ki} حسب قانون كيرشوف الأول:

$$I_{Ki} = \sum_{j=1}^n I_{Kj} \quad (3)$$

حيث n : عدد عقد الحملات الكهربائية في الشبكة.

أما التيار في الناقل الصفري I_{Ni} فيحدد كمجموع تيارات الأطوار، وهو يساوي الصفر في حالة الحمولة المتناظرة:

$$I_{Ni} = I_{Ai} + I_{Bi} + I_{Ci} \quad (4)$$

4- تحسب هبوطات الجهد في الأطوار عند الحمولة غير المتناظرة ΔU_{Ki} عبر المركبات المتناظرة [2,3,4]

من العلاقة الآتية:

$$\Delta U_{Ki} = I_{Ki} Z_i + I_{0i} (Z_{0i} + Z_i) \quad (5)$$

حيث I_{Ki} : تيار الطور في الفرع (i)، والذي يساوي مجموع المركبات المتناظرة للتيارات ذات التتابع المباشر والعكسي والصفري.

Z_i : الممانعة الكلية ذات التتابع المباشر والعكسي للفرع (i).

I_{0i}, Z_{0i} : التيار والممانعة الكلية لمركبة التتابع الصفري.

وفي الحياة العملية يكون من الأسهل إجراء حسابات الشبكات [0.4kV] باستخدام القيم الطورية. ومن أجل الشبكات الكهربائية رباعية النواقل التي يكون فيها الناقل الصفري هو الناقل الرابع ، فيمكن أن نكتب [2]:

$$\underline{Z}_0 = \underline{Z}_K + 3\underline{Z}_N \quad (6)$$

$$\underline{I}_N = 3\underline{I}_0 \quad (7)$$

حيث \underline{Z}_K : الممانعة الكلية للناقل الطوري.

\underline{Z}_N : الممانعة الكلية للناقل الصفري.

\underline{I}_N : التيار في الناقل الصفري.

لو بدلنا كل من العلاقتين (6) و (7) في العلاقة (5) لحصلنا على علاقة أكثر بساطة لاستخدامها في الحسابات العملية لتحديد قيمة ΔU_{Ki} بالقيم الطورية:

$$\Delta U_{Ki} = \underline{I}_{Ki} \underline{Z}_{Ki} + \underline{I}_{Ni} \underline{Z}_{Ni} \quad (8)$$

5- يتم إيجاد الجهود في عقد الشبكة على شكل فرق بين جهد العقدة السابقة \underline{U}_{Kj-1} وهبوط الجهد في الفرع

ΔU_{Ki} :

$$\underline{U}_{KJ} = \underline{U}_{KJ-1} - \Delta U_{Ki}; K = A, B, C \quad (9)$$

6- يتم تحديد ضياعات الاستطاعة الفعلية في فروع شبكة التوزيع الكهربائية على الشكل الآتي:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{Ki} &= I_{Ki}^2 \cdot R_{Ki} ; K = A, B, C \\ \Delta P_{Ni} &= I_{Ni}^2 \cdot R_{Ni} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

حيث ΔP_{Ki} : ضياعات الاستطاعة الفعلية في الفرع (i) من الطور.

ΔP_{Ni} : ضياعات الاستطاعة الفعلية في الفرع (i) من الناقل الصفري.

وتصبح ضياعات الاستطاعة الفعلية الإجمالية في الشبكة بكاملها مساوياً:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^m (\Delta P_{Ai} + \Delta P_{Bi} + \Delta P_{Ci} + \Delta P_{Ni}) \quad (11)$$

أو كنسبة مئوية:

$$\Delta P \% = \frac{\Delta P}{P} \cdot 100\% \quad (12)$$

حيث m : عدد فروع شبكة التوزيع الكهربائية المدروسة.

P : الاستطاعة الفعلية الإجمالية في الشبكة المدروسة.

ويتم في الحياة العملية استخدام الطريقة المذكورة بأسلوب أكثر بساطة بحيث لا نأخذ بالحسبان تأثير التأريضات المكررة للناقل الصفري التي وفقاً للمرجع [2,5]، يجب أن تتركب في نهايات خطوط النقل الهوائية، وفي التقريعات الناتجة عن خطوط النقل التي يزيد طولها عن [200m]، وعند مداخل تغذية التجهيزات الكهربائية من الخط الهوائي واللازم تصفيرها.

وحسب شروط الحماية من الجهود الزائدة الناجمة عن الصواعق، فيمكن زيادة عدد مرات التأريض [5].

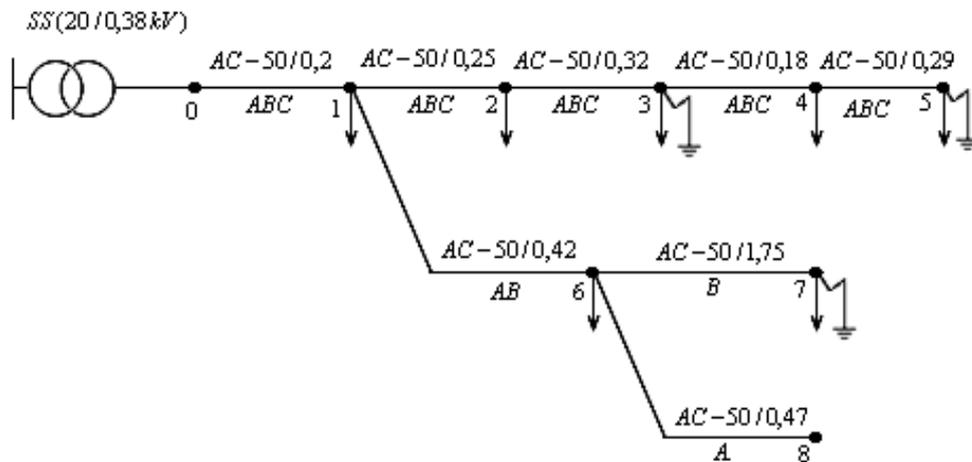
أهمية البحث وأهدافه:

يهدف البحث إلى تقييم أثر اعتبار التأريض المكرر للناقل الصفري على ضياع الاستطاعة الفعلية في شبكة التوزيع الكهربائية ذات الجهد $0.4[kV]$ ، انطلاقاً من معرفة أثر هذا التأريض على بارامترات نظام هذه الشبكة.

طرائق البحث ومواده:

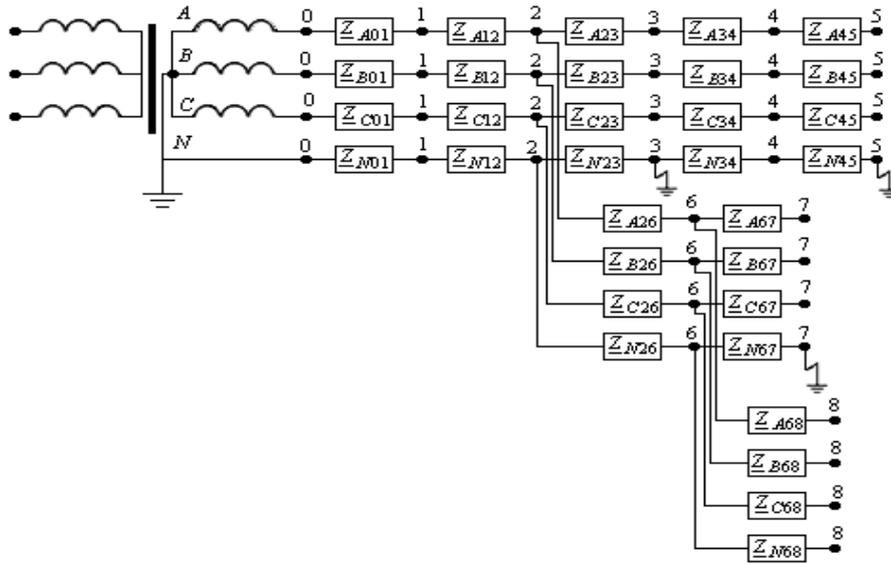
من أجل القيام بإجراء الحسابات اللازمة للتأكيد على جدوى استخدام التأريض المكرر للناقل الصفري وإظهار مدى أهميته، سنأخذ على سبيل المثال شبكة التوزيع الكهربائية الهوائية $0.4[kV]$ ، والذي يوضح الشكل (1) مخططها المبدئي.

ففي الشكل (1) تشير الأحرف A, B, C إلى وجود عدد أطوار مختلف في فروع الشبكة. أطوال الفروع معطاة بالكيلومتر. وبديل الرمز \perp إلى عقد الشبكة التي تم فيها تنفيذ تأريض مكرر للناقل الصفري، وتم تنفيذ التأريض المكرر في العقد 3, 5, 7 وفقاً للمرجع [4]، إذ تشكل العقدة رقم (5) نهاية خط النقل، وتشكل العقدة رقم (7) نهاية فرع من الخط الهوائي بطول $2170[m]$ ، [لاحظ في الشكل أن $1,75 + 0,42 = 2,17km$ ، وفي العقدة رقم (3) يوجد مستهلك كهربائي قابل للتصفير.



الشكل (1) مخطط مبدئي لشبكة التوزيع الكهربائية $0.38 [kV]$

وبين الشكل (2) الدارة المكافئة الحسابية لشبكة التوزيع، ويتضمن الجدول (1) المعطيات الطوبولوجية حسب الدارة المكافئة وقيم Z_i (البند 1 من الخوارزمية).



الشكل (2) مخطط الدارة المكافئة لشبكة التوزيع الكهربائية 0.4 [kV]

الجدول (1): المعطيات الأولية لشبكة التوزيع 0.4[kV]

رقم بداية الفرع	رقم نهاية الفرع	نموذج النواقل	طول الفرع [km]	الممانعة الكلية للفرع [Ω]	
0	1	Ph	AC – 50	0,20	0,12 + j 0,08
		N	AC – 35	0,20	0,15 + j 0,08
1	2	Ph	AC – 50	0,25	0,15 + j 0,1
		N	AC – 35	0,25	0,19 + j 0,1
2	3	Ph	AC – 50	0,32	0,19 + j 0,12
		N	AC – 35	0,32	0,25 + j 0,13
3	4	Ph	AC – 50	0,18	0,11 + j 0,07
		N	AC – 35	0,18	0,14 + j 0,07
4	5	Ph	AC – 50	0,29	0,17 + j 0,11
		N	AC – 35	0,29	0,122 + j 0,12
2	6	Ph	AC – 50	0,42	0,25 + j 0,16
		N	AC – 35	0,42	0,32 + j 0,17
6	7	Ph	AC – 50	1,75	1,04 + j 0,67
		N	AC – 35	1,75	1,35 + j 0,71
6	8	Ph	AC – 50	0,47	0,28 + j 0,18
		N	AC – 35	0,47	0,36 + j 0,19

- الرمز Ph : يدل على الناقل الطوري .
- الرمز N : يدل على الناقل الصفري .

إن معطيات نظام الحمل في عقد شبكة التوزيع محسوبة كتيارات كلية حسب البند الثاني من الخوارزمية المذكورة، وقد تم وضعها في الجدول رقم (2).

الجدول (2): معطيات النظام عن حمولات الشبكة $0.4[kV]$

رقم العقدة	تيار الحمولة [A]		
	الطور A	الطور B	الطور C
1	$2,8e^{-j31,79}$	$5,4e^{j88,21}$	$8,6e^{-j151,79}$
2	$3,8e^{-j31,79}$	$4,4e^{j88,21}$	$9,4e^{-j151,79}$
3	$2,4e^{-j31,79}$	0	$16,7e^{-j151,79}$
4	0	$2,4e^{j88,21}$	$5,2e^{-j151,79}$
5	0	$8,4e^{j88,21}$	$10e^{-j151,79}$
6		$4,4e^{j88,21}$	0
7	0	$10e^{j88,21}$	0
8	$20e^{-j31,79}$	0	0

النتائج والمناقشة:

سنفترض لسهولة الحل أن الجهود على قضبان الجهد المنخفض لمحطة التحويل (SS) متناظرة : زوايا الطور للجهود مزاحة بمقدار 120° بالنسبة إلى بعضها بعضاً، وطويلاتها تساوي $231 [V]$.

يتم حساب التيارات في نواقل فروع الشبكة حسب البند الثالث من الخوارزمية، وعلى سبيل المثال : في الفرع 0

1 - ، لدينا:

$$\underline{I}_{A01} = \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{A3} + \underline{I}_{A6} + \underline{I}_{A8} = 2,80e^{-j31,79} + 3,80e^{-j31,79} + 2,40e^{-j31,79} + 3,20e^{-j31,79} + 20,00e^{-j31,79} = 32,20e^{-j31,79} [A]$$

$$\underline{I}_{B01} = \underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2} + \underline{I}_{B4} + \underline{I}_{B5} + \underline{I}_{B6} + \underline{I}_{B7} = 5,40e^{j88,21} + 4,40e^{j88,21} + 2,40e^{j88,21} + 8,40e^{j88,21} + 4,40e^{j88,21} + 10,00e^{j88,21} = 35,00e^{j88,21} [A]$$

$$\underline{I}_{C01} = \underline{I}_{C1} + \underline{I}_{C2} + \underline{I}_{C3} + \underline{I}_{C4} + \underline{I}_{C5} = 8,60e^{-j151,79} + 9,40e^{-j151,79} + 16,70e^{-j151,79} + 5,20e^{-j151,79} + 10,00e^{-j151,79} = 49,90e^{-j151,79} [A]$$

- التيار في الناقل الصفري حسب العلاقة (4):

$$\underline{I}_{N01} = \underline{I}_{A01} + \underline{I}_{B01} + \underline{I}_{C01} = 32,20e^{-j31,79} + 35,00e^{j88,21} + 49,90e^{-j151,79} = 16,48e^{-j160,25} [A]$$

- هبوط الجهد حسب العلاقة (8):

$$\Delta \underline{U}_{A01} = \underline{I}_{A01} \underline{Z}_{A01} + \underline{I}_{N01} \underline{Z}_{N01} = 32,20e^{-j31,79} \cdot (0,12 + j0,08) + 16,48e^{-j160,25} \cdot (0,15 + j0,08) = 16,48e^{-j38,09} [V]$$

$$\Delta \underline{U}_{B01} = \underline{I}_{B01} \underline{Z}_{B01} + \underline{I}_{N01} \underline{Z}_{N01} = 35,00e^{j88,21} \cdot (0,12 + j0,08) + 16,48e^{-j160,25} \cdot (0,15 + j0,08) = 16,48e^{j154,80} [V]$$

$$\Delta \underline{U}_{C01} = \underline{I}_{C01} \underline{Z}_{C01} + \underline{I}_{N01} \underline{Z}_{N01} = 49,90 e^{-j151,79} \cdot (0,12 + j0,08) + 16,48 e^{-j160,25} \cdot (0,15 + j0,08) = 9,85 e^{-j122,94} [V]$$

$$\Delta \underline{U}_{N01} = \underline{I}_{N01} \underline{Z}_{N01} + \underline{I}_{N01} \underline{Z}_{N01} = 16,48 e^{-j160,25} \cdot (0,15 + j0,08) = 2,87 e^{-j132,72} [V]$$

- الجهد في العقدة وفقاً للعلاقة (9):

$$\underline{U}_{A1} = \underline{U}_{A0} - \Delta \underline{U}_{A01} = 231,00 e^{j0} - 3,29 e^{-j38,09} = 228,42 e^{j0,51} [V]$$

$$\underline{U}_{B1} = \underline{U}_{B0} - \Delta \underline{U}_{B01} = 231,00 e^{j120,00} - 4,97 e^{j154,80} = 226,94 e^{j119,29} [V]$$

$$\underline{U}_{C1} = \underline{U}_{C0} - \Delta \underline{U}_{C01} = 231,00 e^{-j120} - 9,85 e^{-j122,94} = 221,17 e^{-j119,87} [V]$$

$$\underline{U}_{N1} = \Delta \underline{U}_{N0} + \Delta \underline{U}_{N01} = 0 + 2,87 e^{-j132,72} = 2,87 e^{-j132,72} [V]$$

- ضياعات الاستطاعة في النواقل حسب العلاقة (10):

$$\Delta P_{A01} = I_{A01}^2 R_{A01} = (32,20)^2 \cdot 0,12 = 124,42 [W]$$

$$\Delta P_{B01} = I_{B01}^2 R_{B01} = (35,00)^2 \cdot 0,12 = 147,00 [W]$$

$$\Delta P_{C01} = I_{C01}^2 R_{C01} = (49,90)^2 \cdot 0,12 = 298,80 [W]$$

$$\Delta P_{N01} = I_{N01}^2 R_{N01} = (16,48)^2 \cdot 0,15 = 40,74 [W]$$

- ضياعات الاستطاعة الفعلية في مخطط الشبكة:

$$\Delta P = \Delta P_A + \Delta P_B + \Delta P_C + \Delta P_N =$$

$$= 498,56 + 478,47 + 785,81 + 698,21 = 2461,05 [W]$$

ويتم بشكل مشابه إجراء الحسابات لبقية فروع الشبكة المدروسة من دون احتساب تأثير التآريض المكرر للناقل

الصفري، وتوضع نتائج هذه الحسابات في الجدول (3).

الجدول (3): نتائج حساب نظام مخطط الشبكة الكهربائية [الشكل (1)] من دون احتساب تأثير التآريض المكرر للناقل الصفري.

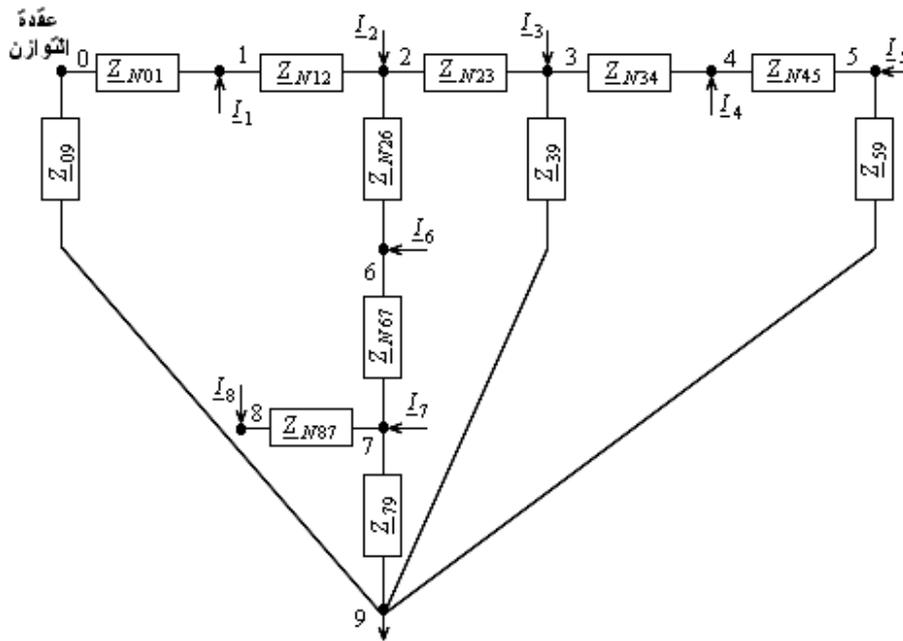
رقم عقدة بداية الفرع	رقم عقدة نهاية الفرع		تيارات الفروع [A]	هبوط الجهد [V]	ضياعات الاستطاعة [W]	جهد عقدة نهاية الفرع [V]
0	1	A	$32,20 e^{-j31,79}$	$3,29 e^{-j38,09}$	124,42	$228,42 e^{j0,51}$
		B	$35,00 e^{j88,21}$	$4,97 e^{j154,80}$	147,00	$226,94 e^{j119,29}$
		C	$49,90 e^{-j151,79}$	$9,85 e^{-j122,94}$	298,80	$221,17 e^{-j119,87}$
		N	$16,48 e^{-j160,25}$	$2,87 e^{-j132,72}$	40,74	$2,87 e^{-j132,72}$
1	2	A	$29,40 e^{-j31,79}$	$4,21 e^{-j28,52}$	127,93	$224,75 e^{j1,03}$
		B	$29,60 e^{j88,21}$	$4,79 e^{j150,45}$	129,67	$222,86 e^{j118,65}$
		C	$41,30 e^{-j151,79}$	$9,84 e^{-j120,56}$	211,33	$200,33 e^{-j119,84}$
		N	$11,80 e^{-j152,63}$	$2,57 e^{-j125,09}$	26,91	$5,43 e^{-j129,12}$
		A	$2,40 e^{-j31,79}$	$6,93 e^{-j137,50}$	1,09	$229,99 e^{-j2,17}$

2	3	B	$10,80e^{j88,21}$	$7,38e^{-j159,33}$	22,10	$221,95e^{j116,76}$
		C	$31,90e^{-j151,79}$	$14,28e^{-j129,74}$	192,78	$197,28e^{-j119,12}$
		N	$26,33e^{-j167,83}$	$17,34e^{-j140,30}$	171,42	$12,72e^{-j135,54}$
3	4	A	0	$2,13e^{j167,92}$	0	$232,08e^{j2,26}$
		B	$10,80e^{j88,21}$	$2,88e^{j163,34}$	12,43	$200,06e^{j116,20}$
		C	$15,20e^{-j151,79}$	$3,69e^{-j144,71}$	24,62	$193,96e^{-j118,65}$
		N	$13,55e^{j164,55}$	$2,13e^{-j167,92}$	25,53	$14,56e^{-j140,03}$
4	5	A	0	$2,35e^{j175,69}$	0	$234,43e^{j2,28}$
		B	$8,40e^{j88,21}$	$3,48e^{j158,18}$	12,11	$217,48e^{j115,59}$
		C	$10,00e^{-j151,79}$	$3,87e^{-j149,50}$	17,17	$190,64e^{-j118,06}$
		N	$9,30e^{j156,78}$	$2,35e^{-j175,69}$	19,40	$16,53e^{-j144,79}$
2	6	A	$23,20e^{-j31,79}$	$13,72e^{j18,02}$	133,83	$211,67e^{-j0,06}$
		B	$14,40e^{j88,21}$	$8,73e^{j62,86}$	51,56	$218,07e^{j120,55}$
		C	-	-	-	-
		N	$20,29e^{j6,15}$	$7,43e^{j33,68}$	133,60	$2,75e^{-j2,01}$
6	7	A	-	-	-	-
		B	$10,00e^{j88,21}$	$27,56e^{j118,11}$	103,60	$190,54e^{j120,90}$
		C	-	-	-	-
		N	$10,00e^{j88,21}$	$15,26e^{j115,75}$	135,27	$14,18e^{j105,85}$
6	8	A	$20,00e^{-j31,79}$	$14,80e^{-j1,89}$	111,30	$196,88e^{-j0,08}$
		B	-	-	-	-
		C	-	-	-	-
		N	$20,00e^{-j31,79}$	$8,19e^{-j4,25}$	145,32	$10,95e^{-j3,69}$
الإجمالي		A	-	-	498,56	-
		B	-	-	478,47	-
		C	-	-	785,81	-
		N	-	-	698,21	-

تمتلك عادة شبكات التوزيع الكهربائية $0.4[kV]$ طوبولوجيا الشجرة المفتوحة، وبسبب أنظمة عملها غير المتناظرة (شديدة عدم التناظر)، فإنه تزود حتماً بناقل صفرى إضافي تقصر فيه تيارات التتابع الصفرى. ويقوم الناقل الصفرى بتوصيل الحياديات المؤرضة لمفات الجهد المنخفض في محولات التغذية في محطات التحويل $20/0.4[kV]$ بحياديات المستهلكين ثلاثيى الطور، وبالناقل العكسية للمستهلكين أحاديى الطور.

ويتم مد النواقل الصفيرية في الشبكات الكهربائية الهوائية أو شبكات الكابلات بالتزامن مع مد النواقل الطورية. ولذلك إذا دُرست شبكة الناقل الصفري بشكل مستقل عن شبكة النواقل الطورية ، فإنه عند تأريضها فقط في حيادي $0.4[kV]$ لمحور التغذية في محطة التحويل $20/0.4[kV]$ ستمتلك شبكة الناقل الصفري طوبولوجيا الشجرة المفتوحة كما هو الأمر بالنسبة إلى شبكة النواقل الطورية. وفي هذه الحالة يمكن استخدام الطريقة الرياضية المستخدمة في حساب شبكات التوزيع الكهربائية المفتوحة والموضحة بشكل وافٍ في المراجع [1,6]، وذلك لتحديد التيارات والجهود وضياعات الاستطاعة في شبكة الناقل الصفري.

إن اعتبار التأريض المكرر، والمركب في شبكة الناقل الصفري، وفقاً للمرجع [5]، سيؤدي إلى ظهور فروع إضافية في الدارة المكافئة توصل الناقل الصفري مع الأرض كما هو موضح في الشكل (3).



الشكل (3) الدارة المكافئة لشبكة الناقل الصفري

عند وجود تأريض ضروري أو حتمي للناقل الصفري في حيادي $0.4[kV]$ لمحور التغذية في محطة التحويل $20/0.4[kV]$ ، فإن الفروع الإضافية الناجمة عن التأريض المكرر ستشكل في الدارة المكافئة حلقات متصلة مع الأرض، وستصبح طوبولوجيا شبكة الناقل الصفري مغلقة.

ونظراً لعدم توفر معطيات دقيقة وكافية عن نظام أحمال المستهلكين ، وبسبب الجهد المنخفض لهذه الشبكة، يمكن إهمال صعوبة طبيعة تسرب تيارات التتابع الصفري إلى الأرض بما لا يؤثر على دقة الحسابات العملية للشبكة، ويمكن أيضاً اعتبار الأرض عقدة من عقد الدارة المكافئة، بحيث تكون موصولة مع الناقل الصفري عن طريق فروع تمثل أجهزة التأريض.

وبأخذ هذه الفرضيات بالحسبان، فإن الدارة المكافئة لشبكة الناقل الصفري في شبكة التوزيع الكهربائية $0.4[kV]$ ستصبح كما هي مبينة في الشكل (3).

في هذه الدارة تمثل العقدة (9) الأرض، أما الفروع (0-9 ; 7-9 ; 5-9) فتمثل ممانعات التسرب لأجهزة التأريض.

إن العقدة (0) في الدارة المكافئة [الشكل (3)] توافق حيادي $0.4[kV]$ لمحور التغذية في محطة التحويل $20/0.4[kV]$ ، ويكمن صفري. وتتلقى هذه الدارة التغذية من منابع التيار في عقد توصيل الأحمال، إذ تحدد قيم تيارات هذه المنابع في كل عقدة كمجموع لتيارات أطوار الحمل.

وباعتبار الطوبولوجيا المغلقة للدارة المكافئة، فإنه لحساب نظام شبكة الناقل الصفري مع الأخذ بالحسبان التأريضات المكررة يلزم استخدام طريقة رياضية تختلف عن تلك الطريقة المطبقة من أجل الشبكات المفتوحة. تُعد طريقة جهود العقد الطريقة الأفضل والأكثر استخداماً لحل مثل هذه المسائل [6]. وتكون جملة معادلات جهود العقد خطية في هذه الحالة، وقابلة للحل بالنسبة إلى جهود النقاط الرئيسية في دارة الناقل الصفري. وكعقدة أساس وتوازن يفضل اختيار العقدة التي توافق حيادي $0.4[kV]$ لمحور التغذية في محطة التحويل $20/0.38[kV]$ ، التي تمتلك عند الجهد المتناظر كمن صفري.

إن معادلات جهود العقد للدارة المكافئة لشبكة الناقل الصفري مع احتساب التأريضات المكررة، ومن أجل كمن صفري لعقدة التوازن، تأخذ الصيغة الآتية [6]:

$$\left. \begin{aligned} \underline{Y}_{11}\underline{U}_1 - \underline{Y}_{12}\underline{U}_2 - \underline{Y}_{13}\underline{U}_3 - \dots - \underline{Y}_{1i}\underline{U}_i &= \underline{I}_1 \\ -\underline{Y}_{21}\underline{U}_1 + \underline{Y}_{22}\underline{U}_2 - \underline{Y}_{23}\underline{U}_3 - \dots - \underline{Y}_{2i}\underline{U}_i &= \underline{I}_2 \\ -\underline{Y}_{31}\underline{U}_1 - \underline{Y}_{32}\underline{U}_2 + \underline{Y}_{33}\underline{U}_3 - \dots - \underline{Y}_{3i}\underline{U}_i &= \underline{I}_3 \\ \vdots & \\ -\underline{Y}_{i1}\underline{U}_1 - \underline{Y}_{i2}\underline{U}_2 - \underline{Y}_{i3}\underline{U}_3 - \dots + \underline{Y}_{ii}\underline{U}_i &= \underline{I}_i \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

حيث :

\underline{Y}_{ij} ($i=1,2,3,\dots$; $j=1,2,3,\dots$; $i \neq j$) : السامحية التبادلية للعقد i و j ، وتساوي مجموع السامحيات العقدية للفروع التي تصل هذه العقد فيما بينها، أو تساوي الصفر إذا لم يكن هناك اتصال بين العقد.

\underline{Y}_{ii} ($i=1,2,3,\dots$) : السامحية الذاتية للعقدة i وتساوي مجموع السامحيات العقدية للفروع المتصلة بهذه العقود كافة بما فيها الفروع التي تصل هذه العقدة مع عقدة التوازن في الدارة المكافئة.

\underline{U}_i : جهد العقدة العقدي، ويساوي فرق الكمن بين العقدة رقم i وعقدة التوازن في الدارة المكافئة.

\underline{I}_i : التيار العقدي المعطى للعقدة رقم i .

وتوضع جملة المعادلات (13) لكل عقدة في الدارة المكافئة ما عدا عقدة التوازن. ويمكن وضع جملة المعادلات (13) في الصيغة المصفوفية:

$$\underline{Y}_Y \underline{U} = \underline{I} \quad (14)$$

حيث :

\underline{Y}_Y : هي المصفوفة العقدية للسامحيات الذاتية والتبادلية للعقد التي يغيب فيها السطر والعمود الموافقين لعقدة التوازن.

\underline{U} , \underline{I} : أعمدة جهود العقد وتيارات العقد العقدية.

وفي جملة المعادلات (14) تُعد جهود العقد لشبكة الناقل الصفري مجهولة، إذ إن معظم العناصر غير القطرية في المصفوفة \underline{Y}_Y تساوي الصفر. ولحل جملة المعادلات الخطية (14) فمن الضروري استخدام طرق دقيقة، وتُعد طريقة غاوص الطريقة الأكثر استخداماً في الحسابات العملية [5].

وسندرس كمثال على ذلك كيفية حساب نظام الناقل الصفري لشبكة التوزيع الكهربائية [kV] 0,38 [الشكل (1)]، مع احتساب التآريضات المكررة في العقد 3,5,7، واستناداً للشكل (3) الموضح فيه الدارة المكافئة لشبكة الناقل الصفري في شبكة التوزيع المدروسة باحتساب التآريضات المكررة. إن مقاومة جهاز التآريض الموصول إلى حياضي المحولات من أجل جهد الخط [kV] 0,4، وحسب المرجع [3]، يجب ألا تزيد عن [Ω] 4، أما مقاومة تسرب مؤرض كل من التآريضات المكررة وفقاً للمرجع [5] يجب ألا تزيد عن [Ω] 30، مع العلم أن مقاومتهم الكلية يجب أن تكون أصغر أو تساوي [Ω] 10. وفي هذا المثال تم احتساب أن مقاومة جهاز التآريض الموصول إلى حياضي المحول تساوي [Ω] 2، بينما أخذت مقاومة التآريضات المكررة مساوية [Ω] 10.

وحسب معطيات الجدول (3) سنحسب التيارات العقدية للأحمال المحقونة $I_{N1} \dots I_{N8}$ في شبكة الناقل الصفري، إذ ستشكل هذه التيارات عمود التيارات المعطاة I في الدارة المكافئة المبينة في الشكل (3):

$$\begin{aligned} \underline{I}_{N1} &= \underline{I}_{A1} + \underline{I}_{B1} + \underline{I}_{C1} = \\ &= 2,80 e^{-j31,79} + 5,40 e^{j88,21} + 8,60 e^{-j151,79} = 5,33 e^{-j157,39} \text{ [A]} \\ \underline{I}_{N2} &= \underline{I}_{A2} + \underline{I}_{B2} + \underline{I}_{C2} = \\ &= 3,80 e^{-j31,79} + 4,40 e^{j88,21} + 9,40 e^{-j151,79} = 5,03 e^{-j178,37} \text{ [A]} \\ \underline{I}_{N3} &= \underline{I}_{A3} + \underline{I}_{C3} = 2,40 e^{-j31,79} + 16,70 e^{-j151,79} = 15,64 e^{-j144,15} \text{ [A]} \\ \underline{I}_{N4} &= \underline{I}_{B4} + \underline{I}_{C4} = 2,40 e^{j88,21} + 5,20 e^{-j151,79} = 4,51 e^{-j179,25} \text{ [A]} \\ \underline{I}_{N5} &= \underline{I}_{B5} + \underline{I}_{C5} = 8,40 e^{j88,21} + 10,00 e^{-j151,79} = 9,30 e^{-j156,78} \text{ [A]} \\ \underline{I}_{N6} &= \underline{I}_{A6} + \underline{I}_{B6} = 3,20 e^{-j31,79} + 4,40 e^{j88,21} = 3,94 e^{-j43,51} \text{ [A]} \\ \underline{I}_{N7} &= \underline{I}_{B7} = 10,00 e^{j88,21} \text{ [A]} \\ \underline{I}_{N8} &= \underline{I}_{A8} = 20,00 e^{-j31,79} \text{ [A]} \end{aligned}$$

تمتلك مصفوفة سماحيات العقد \underline{Y}_Y للدارة المكافئة المبينة في الشكل (3) البنية الآتية:

$$\underline{Y}_Y = \begin{bmatrix} \underline{y}_{11} & -\underline{y}_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\underline{y}_{12} & \underline{y}_{22} & -\underline{y}_{23} & 0 & 0 & -\underline{y}_{26} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\underline{y}_{23} & \underline{y}_{33} & -\underline{y}_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\underline{y}_{39} \\ 0 & 0 & -\underline{y}_{34} & \underline{y}_{44} & -\underline{y}_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\underline{y}_{45} & \underline{y}_{55} & 0 & 0 & 0 & -\underline{y}_{59} \\ 0 & -\underline{y}_{26} & 0 & 0 & 0 & \underline{y}_{66} & -\underline{y}_{67} & -\underline{y}_{68} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\underline{y}_{67} & \underline{y}_{77} & 0 & -\underline{y}_{79} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\underline{y}_{68} & 0 & \underline{y}_{88} & 0 \\ 0 & 0 & -\underline{y}_{39} & 0 & -\underline{y}_{59} & 0 & -\underline{y}_{79} & 0 & \underline{y}_{99} \end{bmatrix}$$

** سنحسب عناصر المصفوفة \underline{Y}_Y :

- السماحيات الذاتية للعقد تساوي:

$$\underline{y}_{11} = \frac{1}{\underline{z}_{N01}} + \frac{1}{\underline{z}_{N12}} = \frac{1}{0,15 + j0,08} + \frac{1}{0,19 + j0,10} = 9,15 - j4,77 \text{ [S]}$$

$$\begin{aligned} \underline{y}_{22} &= \frac{1}{z_{N12}} + \frac{1}{z_{N23}} + \frac{1}{z_{N26}} = \\ &= \frac{1}{0,19 + j0,10} + \frac{1}{0,25 + j0,13} + \frac{1}{0,32 + j0,17} = 9,67 - j5,04 [S] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{y}_{33} &= \frac{1}{z_{N23}} + \frac{1}{z_{N34}} + \frac{1}{z_{39}} = \\ &= \frac{1}{0,25 + j0,13} + \frac{1}{0,14 + j0,07} + \frac{1}{10,00 + j0} = 8,93 - j4,60 [S] \end{aligned}$$

$$\underline{y}_{44} = \frac{1}{z_{N34}} + \frac{1}{z_{N45}} = \frac{1}{0,14 + j0,07} + \frac{1}{0,22 + j0,12} = 9,16 - j4,77 [S]$$

$$\underline{y}_{55} = \frac{1}{z_{N45}} + \frac{1}{z_{59}} = \frac{1}{0,22 + j0,12} + \frac{1}{10,00 + j0} = 3,61 - j1,83 [S]$$

$$\begin{aligned} \underline{y}_{66} &= \frac{1}{z_{N26}} + \frac{1}{z_{N67}} + \frac{1}{z_{N68}} = \\ &= \frac{1}{0,32 + j0,17} + \frac{1}{1,35 + j0,71} + \frac{1}{0,36 + j0,19} = 5,17 - j2,69 [S] \end{aligned}$$

$$\underline{y}_{77} = \frac{1}{z_{N67}} + \frac{1}{z_{79}} = \frac{1}{1,35 + j0,71} + \frac{1}{10,00 + j0} = 0,68 - j0,30 [S]$$

$$\underline{y}_{88} = \frac{1}{z_{N68}} = \frac{1}{0,36 + j0,19} = 2,16 - j1,13 [S]$$

$$\begin{aligned} \underline{y}_{99} &= \frac{1}{z_{09}} + \frac{1}{z_{39}} + \frac{1}{z_{59}} + \frac{1}{z_{79}} = \\ &= \frac{1}{2,00 + j0} + \frac{1}{10,00 + j0} + \frac{1}{10,00 + j0} + \frac{1}{10,00 + j0} = 0,80 + j0 [S] \end{aligned}$$

- السماحيات التبادلية للعقد تساوي:

$$y_{12} = \frac{-1}{z_{N12}} = \frac{-1}{0,19 + j0,1} = -4,07 + j2,12 [S]$$

$$y_{23} = \frac{-1}{z_{N23}} = \frac{-1}{0,25 + j0,13} = -3,18 + j1,66 [S]$$

$$y_{26} = \frac{-1}{z_{N26}} = \frac{-1}{0,32 + j0,17} = -2,42 + j1,26 [S]$$

$$y_{34} = \frac{-1}{z_{N34}} = \frac{-1}{0,14 + j0,07} = -5,65 + j2,95 [S]$$

$$y_{45} = \frac{-1}{z_{N45}} = \frac{-1}{0,22 + j0,12} = -3,51 + j1,83 [S]$$

$$y_{67} = \frac{-1}{z_{N67}} = \frac{-1}{1,35 + j0,71} = -0,58 + j0,30 [S]$$

$$y_{68} = \frac{-1}{z_{N68}} = \frac{-1}{0,36 + j0,19} = -2,16 + j1,33 [S]$$

$$y_{39} = \frac{-1}{z_{N39}} = \frac{-1}{10,00} = -0,10 + j0 [S]$$

$$y_{59} = \frac{-1}{z_{N59}} = \frac{-1}{10,00} = -0,10 + j0 [S]$$

$$y_{79} = \frac{-1}{z_{N79}} = \frac{-1}{10,00} = -0,10 + j0 [S]$$

وكنتيجة لحل جملة المعادلات الخطية (14)، نحدد عمود الجهود العقدية في عقد الناقل الصفري نسبة إلى كمون حيادي [kV] 0.4 لمحور التغذية في محطة التحويل [kV] 20/0.4، وبمعرفة هذه الجهود يمكن بسهولة إيجاد التيارات وهبوطات الجهود وضياعات الاستطاعة في فروع الناقل الصفري كآآتي:

$$U_{N1} = 2,62 e^{-j131,77} [V]$$

$$U_{N2} = 4,86 e^{-j131,77} [V]$$

$$U_{N3} = 11,61 e^{-j136,58} [V]$$

$$U_{N4} = 13,30 e^{-j141,67} [V]$$

$$U_{N5} = 15,04 e^{-j147,23} [V]$$

$$U_{N6} = 3,41 e^{-j2,51} [V]$$

$$U_{N7} = 12,12 e^{-j101,49} [V]$$

$$U_{N8} = 11,61 e^{-j3,74} [V]$$

$$\Delta U_{N01} = U_{N1} = 2,62 e^{-j131,77} [V]$$

$$\Delta U_{N12} = U_{N2} - U_{N1} = 4,86 e^{-j127,55} - 2,62 e^{-j131,77} = 2,26 e^{-j122,67} [V]$$

$$\Delta U_{N23} = U_{N3} - U_{N2} = 11,61 e^{-j136,58} - 4,86 e^{-j127,55} = 6,85 e^{-j142,98} [V]$$

$$\Delta U_{N34} = U_{N4} - U_{N3} = 13,30 e^{-j141,67} - 11,61 e^{-j136,58} = 2,02 e^{-j172,35} [V]$$

$$\Delta U_{N45} = U_{N5} - U_{N4} = 15,04 e^{-j147,23} - 13,30 e^{-j141,67} = 2,22 e^{-j177,23} [V]$$

$$\Delta U_{N26} = U_{N6} - U_{N2} = 3,41 e^{-j2,51} - 4,86 e^{-j127,55} = 7,37 e^{-j30,18} [V]$$

$$\Delta U_{N67} = U_{N7} - U_{N6} = 12,12 e^{-j101,49} - 3,41 e^{-j2,51} = 13,36 e^{-j115,84} [V]$$

$$\Delta U_{N68} = U_{N8} - U_{N6} = 11,61 e^{-j3,74} - 3,41 e^{-j2,51} = 8,19 e^{-j4,25} [V]$$

$$I_{N01} = \Delta U_{N01} \frac{1}{z_{N01}} = 2,62 e^{-j131,77} \cdot \frac{1}{0,15 + j0,08} = 15,01 e^{-j159,31} [A]$$

$$I_{N12} = \Delta U_{N12} y_{12} = 2,26 e^{-j122,67} \cdot (-4,07 + j2,12) = 10,38 e^{-j150,20} [A]$$

$$I_{N23} = \Delta U_{N23} y_{23} = 6,85 e^{-j142,98} \cdot (-3,18 + j1,66) = 24,55 e^{-j170,52} [A]$$

$$I_{N34} = \Delta U_{N34} y_{34} = 2,02 e^{-j172,35} \cdot (-5,65 + j2,95) = 12,85 e^{j160,12} [A]$$

$$I_{N45} = \Delta U_{N45} y_{45} = 2,22 e^{j177,23} \cdot (-3,51 + j1,83) = 8,78 e^{j149,70} [A]$$

$$I_{N26} = \Delta U_{N26} y_{26} = 7,37 e^{j130,18} \cdot (-2,42 + j1,26) = 20,14 e^{j2,65} [A]$$

$$I_{N67} = \Delta U_{N67} y_{67} = 13,36 e^{j115,84} \cdot (-0,58 + j0,30) = 8,76 e^{j188,30} [A]$$

$$I_{N68} = \Delta U_{N68} y_{68} = 8,19 e^{-j4,25} \cdot (-2,16 + j1,13) = 20,00 e^{-j31,79} [A]$$

ويعد حساب نظام الناقل الصفري لشبكة التوزيع الكهربائية $[0,4[kV]$ ، يتم تحديد جهود النواقل الطورية في عقد وصل الأحمال، وتوضع نتائج الحساب في الجدول رقم (4).

الجدول (4): نتائج حساب نظام مخطط شبكة التوزيع [الشكل (1)] باحتساب التأريض المكرر للناقل الصفري .

رقم عقدة بداية الفرع	رقم عقدة نهاية الفرع		تيارات الفروع [A]	هبوط الجهد [V]	ضياعات الاستطاعة [W]	جهد عقدة نهاية الفرع [V]
0	1	A	$32,20 e^{-j31,79}$	$3,36 e^{-j33,79}$	124,42	$228,21 e^{j0,47}$
		B	$35,00 e^{j88,21}$	$4,85 e^{j152,06}$	147,00	$226,90 e^{j119,35}$
		C	$49,90 e^{-j151,79}$	$9,60 e^{-j122,42}$	298,80	$221,41 e^{-j119,90}$
		N	$15,01 e^{-j159,31}$	$2,62 e^{-j131,77}$	33,79	$2,62 e^{-j131,77}$
1	2	A	$29,40 e^{-j31,79}$	$4,35 e^{-j24,59}$	127,93	$224,28 e^{j0,94}$
		B	$29,60 e^{j88,21}$	$4,67 e^{j146,77}$	129,67	$222,76 e^{j118,80}$
		C	$41,30 e^{-j151,79}$	$9,53 e^{-j119,84}$	211,33	$211,87 e^{-j119,90}$
		N	$10,38 e^{-j150,20}$	$2,26 e^{-j122,67}$	20,84	$4,86 e^{-j127,55}$
2	3	A	$2,40 e^{-j31,79}$	$6,42 e^{-j140,15}$	1,09	$229,31 e^{-j1,95}$
		B	$10,80 e^{j88,21}$	$7,03 e^{-j163,15}$	22,10	$221,42 e^{j117,02}$
		C	$31,90 e^{-j151,79}$	$13,73 e^{-j130,67}$	192,78	$198,40 e^{-j119,16}$
		N	$24,55 e^{-j170,52}$	$6,85 e^{-j142,98}$	149,06	$11,61 e^{-j136,58}$
3	4	A	0	$2,02 e^{j172,35}$	0	$231,32 e^{j2,00}$
		B	$10,80 e^{j88,21}$	$2,85 e^{j161,51}$	12,43	$219,39 e^{j116,50}$

		C	$15,20e^{-j151,79}$	$3,52e^{-j146,30}$	24,62	$195,27e^{-j118,69}$
		N	$12,85e^{j160,12}$	$2,02e^{-j172,35}$	22,98	$13,30e^{-j141,67}$
4	5	A	0	$2,22e^{j177,23}$	0	$233,53e^{j1,95}$
		B	$8,40e^{j88,21}$	$3,48e^{j153,04}$	12,11	$216,60e^{j115,95}$
		C	$10,00e^{-j151,79}$	$3,62e^{-j152,34}$	17,17	$192,27e^{-j118,09}$
		N	$8,78e^{j149,70}$	$2,22e^{-j177,23}$	17,27	$15,04e^{-j147,23}$
2	6	A	$23,20e^{-j31,79}$	$13,78e^{j16,15}$	133,83	$211,01e^{-j0,00}$
		B	$14,40e^{j88,21}$	$8,46e^{j60,42}$	51,56	$218,45e^{j120,69}$
		C	-	-	-	-
		N	$20,14e^{j2,65}$	$7,37e^{j30,18}$	131,67	$3,41e^{-j2,51}$
6	7	A	-	-	-	-
		B	$10,00e^{j88,21}$	$25,66e^{j118,34}$	103,60	$192,18e^{j121,00}$
		C	-	-	-	-
		N	$8,76e^{j88,30}$	$13,36e^{j115,84}$	103,77	$12,12e^{j101,49}$
6	8	A	$20,00e^{-j31,79}$	$14,80e^{-j1,89}$	111,30	$196,22e^{-j0,10}$
		B	-	-	-	-
		C	-	-	-	-
		N	$20,00e^{-j31,79}$	$8,19e^{-j4,25}$	145,32	$11,61e^{-j3,74}$
الإجمالي		A	-	-	498,56	-
		B	-	-	478,47	-
		C	-	-	785,81	-
		N	-	-	624,71	-

تبين عملية تحليل المعطيات المدونة في الجدولين (3) و(4) الآتي:

عند احتساب التآريض المكرر، فإن التيارات في الناقل الصفري قد تناقصت في معظم الحالات، وكانت قيم هذه

التيارات وفقاً لفروع الدارة:

$$16,48-11,80-26,33-13,55-9,30-20,29-10,00-20,00 [A]$$

وأصبحت مساوية:

$$15,01-110,38-24,55-12,85-8,78-20,14-8,76-20,00 [A]$$

مما أدى إلى انخفاض الضياعات الكلية للاستطاعة في الناقل الصفري إلى أكثر من 10% ، وذلك من القيمة

$698,21[W]$ إلى القيمة $624,71[W]$ ، بينما يبقى توزيع التيار في النواقل الطورية من دون أي تغيير.

أما الجهود الطورية فقد انخفضت قيمها وُعدّل عدم تناظرها. وعلى سبيل المثال: في العقدة رقم (5) كانت مطالات

الجهود الطورية في الأطوار A, B, C مساوية:

$$234,43-217,48-190,64 [V] \text{ على التوالي، وأصبحت مساوية:}$$

$$.233,53-216,60-192,27 [V]$$

الاستنتاجات والتوصيات:

- 1- تم اقتراح أسلوب لاحتساب التآريض المكرر للناقل الصفري عند حساب أنظمة وضياع الاستطاعة في شبكات $0.4[kV]$ باستخدام طريقة جهود العقد، الذي يسمح بتدقيق وسائط نظام الناقل الصفري.
- 2- إن احتساب التآريض المكرر للناقل الصفري يظهر تأثيراً على نظام وضيعات الاستطاعة في شبكة $0.4[kV]$ ، مع العلم أن قوة هذا التأثير تتناسب مع درجة عدم تناظر تيارات حمولة الأطوار، بينما يتناسب عكساً مع مقاومة أجهزة التآريض والمؤرضات.
- 3- الخوارزمية الرياضية المقدمة تسمح بوضع برنامج حاسوبي لدراسة التآريض المكرر للناقل الصفري ودراسة أثره على وضيعات الاستطاعة في شبكات التوزيع الثانوية.

المراجع:

1. فورسانوف . م . ي . تحديد وتحليل وضيعات الطاقة الكهربائية في الشبكات الكهربائية. مينسك، بيل إينيرغا سبيريجيني. 2005، 207.
2. LAKERVI, E.; HOLMES, E.J. *Electricity distribution net work design*. London, Peter Peregrinus LTD, 1989, 320.
3. NAHMAN, J.; JELOVAC, D. *High voltage /medium(low)voltage substation earthing systems*. Proc, IEE, 1987, 75-80.
4. كراتكفيتش. م. أ. استثمار الشبكات الكهربائية. مينسك. فيشايا شكولا. 2005، 364.
5. جيليزكو. ي. س. اختيار وسائل ت خفيض وضيعات الطاقة الكهربائية في الشبكات الكهربائية. موسكو . إينيرغا أتم إيندات. 1989، 176.
6. إيريليتشيك ف. ي. حسابات الأنظمة المستقرة لعمل الأنظمة الكهربائية. موسكو، 1977، 192.
7. براميلير أ. مصفوفات تحليل الأنظمة الكهربائية . موسكو، 1979، 193.

