

حماية الشبكات الكهربائية من زيادة التوتر في الحالة العابرة عند وصل الخطوط الكهربائية إلى الشبكة¹

المهندس عمار ساعاتي²الدكتور المهندس سميح الجابي³

الملخص

تعدُّ الحالات العابرة من الأمور المهمة التي يجب أخذها بالحسبان عند تصميم الشبكات الكهربائية، ولاسيما شبكات الارتباط المستخدمة لنقل القدرة الكهربائية بين الدول، نتيجة لارتفاع سويات توتر النقل بسبب زيادة استهلاك الطاقة الكهربائية.

تساعد معرفة قيمة التوترات العابرة ذات المنشأ الداخلي التي تنتج في شبكات التوتر العالي في تحديد خطر هذه التوترات وإمكانية إيجاد الحلول المناسبة للتخفيف من آثارها. فضلاً عن ذلك يمكن من خلال معرفة قيمة التوترات العابرة تحديد واختيار مستوى العازلية المناسب عند تصميم الشبكات الكهربائية.

يتم اختيار مستوى العازلية عند تصميم الشبكات الكهربائية حتى توتر أقل من 400 KV على أساس توتر الثبات النبضي البرقي، أما في حالة الشبكات الكهربائية التي تساوي أو تزيد فيها سوية التوتر على 400 KV فيتم اختيار مستوى عازليتها على أساس التوترات العابرة ذات المنشأ الداخلي. ونظراً إلى أن شبكات التوتر العالي 400 KV قد ازدادت في بلدنا بسبب زيادة الاستهلاك في المحافظات ولاسيما الرئيسية منها فقد أصبح من المهم دراسة ظاهرة التوترات العابرة ذات المنشأ الداخلي في شبكات التوتر العالي والمتوسط. دُرِسَتْ هذا البحث التوترات العابرة ذات المنشأ الداخلي الناتجة عن عمليات وصل الخطوط الكهربائية إلى الشبكة وعُدَّت حالة عملية للخط الكهربائي 230 ك ف الذي يربط محطتي تحويل فطينة - القانون 2 والذي يبلغ طوله 160 كم.

وقد كان الهدف في هذا البحث:

1- تمثيل الشبكات الكهربائية عند ظهور التوترات العابرة ذات المنشأ الداخلي باستخدام البرامج الحاسوبية والبرامج التمثيلية.

2- دراسة بعض الطرائق الممكنة من أجل الحد من تأثير التوترات العابرة ذات المنشأ الداخلي في الشبكات الكهربائية. يتضمن البحث شرحاً عن الحالات العابرة في الشبكات الكهربائية التي يمكن إعادتها إلى الحالة العابرة في دارة كهربائية تحتوي على العناصر RLC على التسلسل، والتي تنتج في عند وصل الخط الكهربائي إلى الشبكة الكهربائية وهو دون حمل.

¹ أعد البحث في سياق رسالة الدكتوراه للمهندس عمار ساعاتي بإشراف الدكتور سميح الجابي.

² قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

³ أستاذ - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

ووضع النموذج الفيزيائي للنظام الكهربائي الذي يمثل معادلات تشغيل النظام، وذلك في فرضيتين، تم في الأولى تمثيل الخط الكهربائي برباعي أقطاب T، وتم في الثانية تمثيل الخط الكهربائي برباعي أقطاب π . ثم جرى في هذا البحث حساب قيمة التوتر الزائد الذي يظهر في الحالة العابرة عند وصل خط كهربائي ما إلى شبكة التوتر العالي عن طريق استخدام المعادلات السابقة، ووضعت برامج حاسوبية و نماذج تمثيلية ملائمة لهذه الحالة وذلك باستخدام:

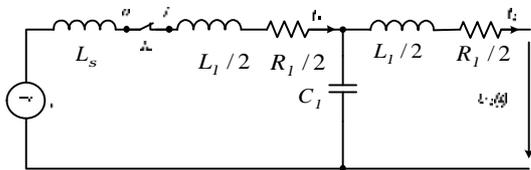
- نمذجة العناصر الكهربائية الممثلة للنظام

- النمذجة باستخدام المخططات الصندوقية وبيئة ماتلاب MATLAB

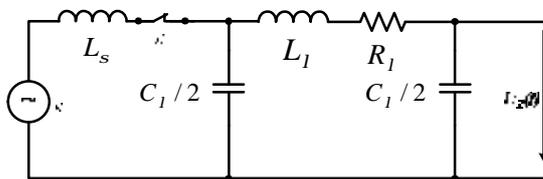
وتبين من هذه الدراسة أن قيمة التوتر الزائد الذي يظهر في نهاية الخط الكهربائي في الحالة العابرة عند وصل هذا الخط إلى الشبكة الكهربائية، تتجاوز ضعفي قيمة التوتر النظامي للخط، الأمر الذي يسبب إجهادات كهربائية إضافية على عازلية التجهيزات الكهربائية في محطة التحويل في طرف الاستقبال مما يؤدي إلى انهيارها. وقد يصل التوتر الزائد في الحالة العابرة ذات المنشأ الداخلي التي تظهر في شبكات التوتر العالي 230 ك ف إلى قيمة تتجاوز 500 ك ف، مما يشير إلى خطورة هذه التوترات الزائدة وضرورة اتخاذ الإجراءات اللازمة للحد من تأثيرها في الشبكة الكهربائية.

1- مقدمة:

تمثل هذه العملية حالة وضع خط كهربائي ما تحت التوتر وهو دون حمل في شبكة التوتر العالي. ولتحديد آلية ظهور التوترات الزائدة ضمن الشبكة الكهربائية يتم الانطلاق من الدارة الكهربائية المكافئة للخط الكهربائي ولمنبع التوليد المكافئ للشبكة. وقد تم الأخذ بالحسبان الدراسة أن الخط الكهربائي يمكن أن يكافئ رباعي أقطاب على شكل T كما هو مبين في الشكل رقم (1).



الشكل رقم (1) دارة تمثيل الخط الكهربائي برباعي أقطاب T أو رباعي أقطاب على شكل (π) كما هو مبين في الشكل رقم (2).



الشكل رقم (2) دارة تمثيل الخط الكهربائي برباعي أقطاب π إذ تمثل الرموز المستخدمة في هذه الأشكال ما يأتي: عامل التحريض الذاتي المكافئ لمحطة التوليد.

L_s عامل التحريض الذاتي المكافئ لخط النقل.

L_λ عامل التحريض الذاتي المكافئ لخط النقل.

C_λ السعة المكافئة للخط الكهربائي.

R المقاومة المكافئة للخط الكهربائي.

تغلق القواطع الآلية وترتبط الخطوط الكهربائية في شبكات نقل الطاقة وفي شبكات التوزيع عندما تكون هذه الخطوط دون حمل كهربائي، وبذلك سيكون التيار في نهاية الخط مساوياً للصفر ($i_2(t) = 0$)، وسيكون التوتر الذي يظهر على طرفي المكثف المكافئ C_λ في الدارة المبينة في الشكل رقم (1) مساوياً للتوتر في

تنتج التوترات الزائدة ذات المنشأ الداخلي في شبكات التوتر العالي عند مرور هذه الشبكات في الحالات العابرة أو عند ظهور الأعطال المختلفة. وتعرف الحالة العابرة بأنها المدة الزمنية التي تمر بها الشبكات الكهربائية بين حالتها عمل مستقرة متتاليتين. وتسبب الحالات العابرة ظهور توترات زائدة خطيرة في بداية الخطوط الكهربائية وفي نهايتها، كما قد تسبب دخول المولدات الكهربائية في حالة التهيج الذاتي، مما يسبب توليد إجهادات كهربائية إضافية على العوازل قد تؤدي إلى انهيارها.

يمكن أن تصل زيادة التوتر التي تظهر في هذه الحالة إلى قيم عالية جداً تؤثر سلباً في التجهيزات الكهربائية المستخدمة في الشبكات، أو في النظام الكهربائي بشكل عام.

توصي الهيئة الدولية للكهرباء IEC أن يتم اختبار تجهيزات التوتر العالي الذي يتجاوز 230 ك ف بتطبيق توتر يساوي التوتر الزائد الذي ينتج من منشأ داخلي في الشبكة الكهربائية، وتحدد قيمة توتر الاختبار هذا بحيث تساوي $2,5 U_n$ [2].

يعالج هذا البحث العلمي مسألة حساب قيمة التوترات الزائدة التي تظهر في شبكات التوتر العالي 230 ك ف بشكل عام وفي الشبكة الكهربائية السورية بشكل خاص والتي تنتج في الحالات العابرة عند وصل الخطوط الكهربائية إلى قضبان التجميع في محطات التحويل، والتي تسمى أيضاً التوترات العابرة الناتجة عن المناورات الكهربائية.

2 - التوترات الكهربائية الزائدة الناتجة عند إغلاق القاطع الآلي للخط الكهربائي : [4],[7],[8]

$$\underline{Z} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \Rightarrow$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (3)$$

Ψ - فرق صفحة توتر التغذية في اللحظة $t = 0$

ϕ - فرق الصفحة بين التوتر والتيار ويساوي :

$$j = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \quad (4)$$

δ - ثابت التخادم ويساوي:

$$d = \frac{R}{2L} \quad (5)$$

Ω_1 - السرعة الزاوية الذاتية للدارة (سرعة النبضة الذاتية):

$$\Omega_1 = \sqrt{\omega_1^2 - d^2} \quad (6)$$

ω_1 السرعة الزاوية عند الطنين (سرعة النبضة عند الطنين):

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (7)$$

ω - سرعة النبضة للقوة المحركة الكهربائية

α - زاوية إزاحة الطور وتساوي:

$$a = \arctg \frac{\Omega_1}{d} \quad (8)$$

ويمكن في الحالة العابرة التي تدوم أجزاءً من الثانية أن نفترض أن الأثر الحراري لمرور التيار في عناصر الدارة مهم، أي يمكن أن نعد أن $R = 0$

وبذلك ينتج:

$$R = 0, L = L_s, C = C_l, \omega_1 = \omega_1, \Omega_1 = \Omega_1, \alpha = \alpha, \delta = \delta, \phi = \phi, \Psi = \Psi \quad (9)$$

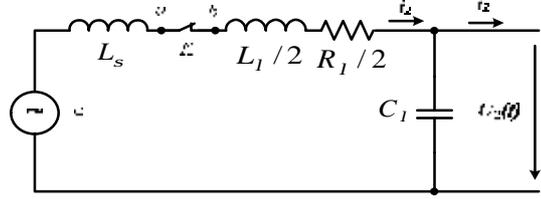
وإذا تم افتراض أن توتر التغذية يكون أعظمياً في اللحظة $t = 0$ ، أي إذا تم افتراض أن $\Psi = 0$ ينتج

من العلاقة 4:

$$\phi = -\arctg \pi/2 \rightarrow \phi = -\pi/2 \quad (10)$$

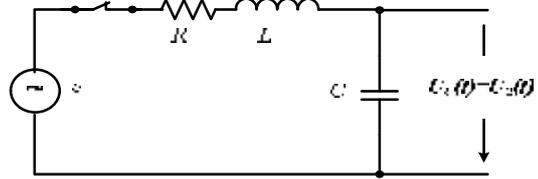
$$\sin(\Omega_1 t + a) = \sin\left(\Omega_1 t + \frac{\pi}{2}\right) = \cos \omega_1 t \quad (11)$$

نهاية الخط $u_2(t)$ وستصبح الدارة المكافئة للشبكة الكهربائية، كما هو مبين في الشكل رقم (3)،



الشكل رقم (3)

أو كما هو مبين في الشكل رقم (4):



الشكل رقم (4)

إذ:

$$R = R_\lambda/2 \quad L = L_\sigma + L_\lambda/2 \quad C = C_\lambda$$

يمكن الملاحظة أن الدارة المكافئة للشبكة قد أصبحت دارة بسيطة وتمثل دارة RLC تسلسلية يطبق عليها توتر كهربائي متناوب ناتج عن القوة المحركة الكهربائية $e(t)$ للمولدة المكافئة للشبكة الكهربائية.

يمكن حساب التوترات والتيارات التي تظهر في هذه الدارة عند إغلاق القاطع K باستخدام الطرائق الحسابية التقليدية انطلاقاً من معادلة تشغيل هذه الدارة والمحددة بالعلاقة الآتية:

$$e = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + C \int i \cdot dt \quad (1)$$

وينتج التوتر U_2 في نهاية الخط الكهربائي عند حل هذه المعادلة كما يأتي:

$$U_2(t) = \frac{E}{C \cdot \omega Z} \left\{ \sin(\omega t + \gamma - j) - e^{-\delta t} \left[\sin(\Omega_1 t + a) \cdot \frac{\sin(\gamma - j)}{\sin \alpha} + \frac{\omega_1}{\Omega_1} \cdot \sin \Omega_1 t \cdot \cos(\gamma - j) \right] \right\} \quad (2)$$

إذ:

Z - الممانعة الكلية للدارة وتساوي:

3 - دراسة زيادة التوتر في الحالة العابرة عند وصل خط إلى شبكة التوتر العالي: [10],[11]

حُسبت في هذا البحث قيمة التوتر الزائد الذي يظهر في الحالة العابرة عند وصل خط كهربائي ما إلى شبكة التوتر العالي عن طريق استخدام المعادلات السابقة، وضعت برامج حاسوبية و نماذج تمثيلية ملائمة لهذه الحالة وذلك باستخدام:

- نمذجة العناصر الكهربائية الممتلئة للنظام

- النمذجة باستخدام المخططات الصندوقية بيئية ماتلاب MATLAB

3-1 - دراسة حالة باستخدام نمذجة العناصر الكهربائية الممتلئة للنظام: [1],[14],[12]

جرى تطبيق هذه الدراسة على حالة عملية باستخدام البرامج الحاسوبية لتحديد التوتر الزائد في الحالة العابرة الذي يظهر على خط كهربائي بتوتر 230 ك ف وبطول 160 كم، وهو الخط الذي يربط محطة تحويل قابون 2 مع محطة تحويل قطينة، ويبين الشكل رقم (6) نموذج الأبراج الحديدية المستعملة في هذا الخط، ويبين الجدول رقم (1) المميزات الكهربائية لهذا الخط الكهربائي.

الجدول رقم (1) مميزات الخط الكهربائي

$r = 0.125$	Ω / Km	مقاومة ناقل الخط
$x = 0.43$	Ω / Km	مفاعلة الخط
$D = 32.4$	mm	قطر ناقل الخط
$S = 475$	mm^2	مقطع ناقل الخط
$l = 160$	Km	طول الخط

$$\sin(y - j) = \sin(y + \frac{P}{2}) = \cos y \quad (12)$$

وعند تعويض هذه العلاقات في المعادلة 2 - معادلة تشغيل الدارة - تنتج قيمة التوتر في نهاية الخط كما يأتي:

$$U_2(t) = \frac{E}{C \cdot w \cdot Z} \cdot [\cos wt - \cos w_1 t] \quad (13)$$

إذ:

$$Z = \left| w \cdot L - \frac{1}{w \cdot C} \right|$$

وتساوي قيمة التوتر الزائد الأعظمي في نهاية الخط القيمة الأعظمية للمعادلة 13، أي:

$$U_2(t)_{\max} = \max\{U_2(t)\} \quad (14)$$

وتحسب هذه القيمة بالعلاقة:

$$U_2 = \frac{E}{C \cdot w \cdot Z} \cdot F_{\max} \quad (15)$$

إذ:

$$F = \cos wt - \cos w_1 t \Rightarrow F_{\max} \quad (16)$$

يسمى التابع F_{\max} عامل الصدمة Shock Factor ويرمز له K_{sh} وبذلك ينتج:

$$U_2 = \frac{E}{C \cdot w \cdot Z} K_{sh} \quad (17)$$

وإذا نسبت قيمة زيادة التوتر الأعظمي U_2 الذي يظهر في الحالة العابرة في نهاية الخط إلى التوتر النظامي للخط ينتج:

$$\frac{U_2}{U_{ph}} = \frac{E}{C \cdot w \cdot Z \cdot U_{ph}} \cdot K_{sh} \quad (18)$$

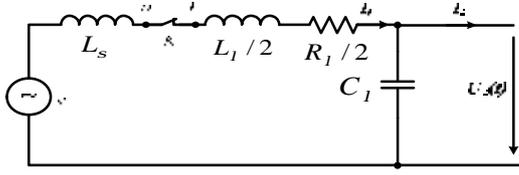
وإذا رمز لعامل زيادة التوتر في الحالة المستقرة بالعلاقة الآتية:

$$K_{ov} = \frac{E}{C \cdot w \cdot Z \cdot U_{ph}} \quad (19)$$

فان قيمة زيادة التوتر التي تظهر في نهاية الخط في الحالة العابرة كما يلي:

$$U_2 = K_{ov} \cdot K_{sh} \cdot U_{ph} \quad (20)$$

بدارة رباعي أقطاب T كما هو مبين في الشكل رقم (8):



الشكل رقم (8)

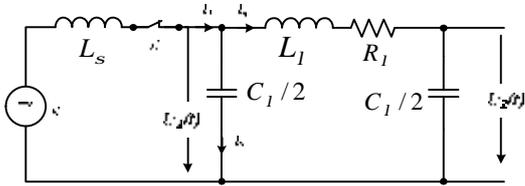
وقد وضع النموذج الرياضي الذي يمثل معادلات تشغيل النظام كما يأتي:

$$U_1 = R_1/2 \cdot i_1 + L_1/2 \cdot \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C_1} \int i_1 \cdot dt$$

$$i_1 = \frac{1}{L_1/2} \cdot \int U_1 - R_1/2 \cdot i_1 - \frac{1}{C_1} \cdot \int i_1 \cdot dt$$

$$U_2 = U_C = i_1 \cdot \frac{1}{w \cdot C_1} \quad (22)$$

وتصبح الدارة الكهربائية المكافئة المستخدمة لحساب زيادة التوتر في الحالة العابرة عند تمثيل الخط بدارة رباعي أقطاب π ، كما هو مبين في الشكل رقم (9):



الشكل رقم (9)

وقد وضع النموذج الرياضي الذي يمثل معادلات تشغيل هذا النظام كما يأتي:

$$i_1 = i_2 + i_3$$

تعطى قيمة التوتر في بداية الخط بالعلاقة:

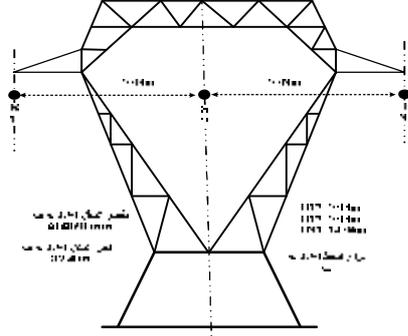
$$U_1 = \frac{1}{C_1/2} \int i_2 \cdot dt$$

وكذلك يمكن أن يحسب من العلاقة:

$$i_3 = \frac{1}{L_1} \cdot \int U_1 - R \cdot i_3 - \frac{1}{C_1/2} \cdot \int i_3 \cdot dt$$

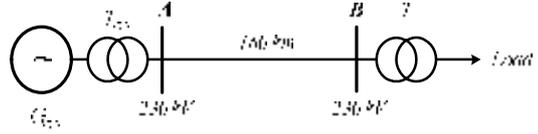
وتحسب التيارات في فروع الدارة بالعلاقات الآتية:

$$i_2 = \frac{C_1}{2} \cdot \frac{du_1}{dt}$$



الشكل رقم (6)

ويبين الشكل رقم (7) الدارة الرمزية للشبكة الكهربائية المستخدمة في حساب التوترات الزائدة التي تظهر في نهاية الخط في الحالة العابرة



الشكل رقم (7)

وتم استناداً إلى هذه المعلومات حساب ومحددات الخط الكهربائي ثوابته، كما هو مبين في الجدول رقم (2) الجدول رقم (2)

ثوابت الخط ومحدداته	القيمة	
$R = r l$	9Ω	المفاعلة المباشرة الكلية
$X = x l$	$68,8 \Omega$	المقاومة الكهربائية
$Z = z l$	69.38Ω	الممانعة الكلية
$Y = y l$	$4.0 \cdot 10^{-4}$	السماحية الكهربائية الكلية
S		
$C = c l$	$2.5 \cdot 10^{-6} F$	السعة الكهربائية الكلية

حُسب أيضاً المفاعلة الكهربائية للمولدة المكافئة للشبكة الكهربائية في طرف الإرسال:

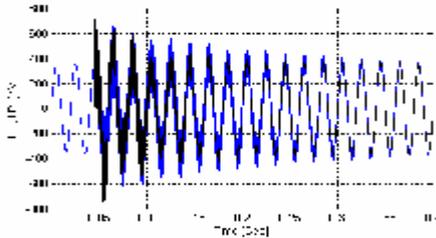
$$X_{\sigma} = X_T + X_g = 8.1 \Omega$$

إذ:

X_T : مفاعلة المحولة.

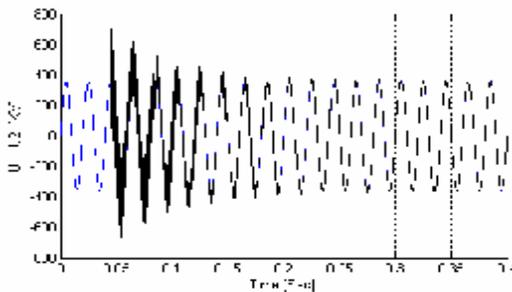
X_g : مفاعلة المولد.

بذلك تصبح الدارة الكهربائية المكافئة المستخدمة لحساب زيادة التوتر في الحالة العابرة عند تمثيل الخط



الشكل رقم (11) تغيرات التوترات U_1 و U_2 عند تمثيل الخط رباعي أقطاب على شكل π

ويبين الشكل رقم (12) تغيرات التوترات U_1 و U_2 في بداية الخط الكهربائي ونهايته كتابع للزمن في الحالة العابرة التي تظهر عند وصل الخط وهو دون حمل إلى الشبكة الكهربائية عند تمثيل الخط رباعي أقطاب على شكل T .



الشكل رقم (12) تغيرات التوترات U_1 و U_2 عند تمثيل الخط رباعي أقطاب على شكل T .

3-1 - دراسة حالة باستخدام النمذجة باستخدام المخططات الصندوقية: [6],[8],[15]

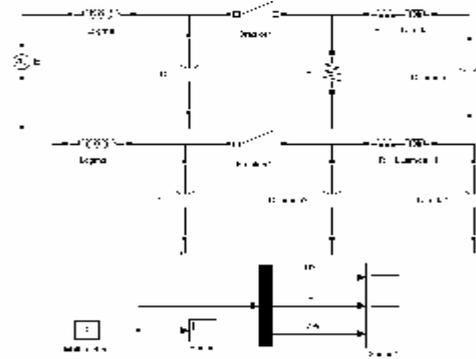
نظراً إلى الإمكانيات التي يتمتع بها برنامج MATLAB استُخدم في الدراسة هذه للتأكد من النتائج التي تم الحصول عليها من خلال البرامج الحاسوبية، ومقارنة النتائج في الحالتين. يعبر المخطط الصندوقي الذي وضعه والمبين في الشكل رقم (13) عن معادلات تشغيل النموذج الرياضي للنظام الفيزيائي الذي تمت دراسته - المعادلات 22 و المعادلات 23 - والتي تمثل حالة وصل الخط الكهربائي إلى الشبكة الكهربائية وهو دون حمل، عند استخدام رباعي أقطاب π و رباعي أقطاب T لنمذجة الخط الكهربائي.

$$i_3 = \frac{1}{L_1} \int U_1 - R \cdot i_3 - \frac{1}{C_1/2} \int i_3 \cdot dt$$

ويمكن بذلك حساب التوتر في نهاية الخط بالعلاقة:

$$U_2 = U_{C1} = i_3 \cdot \frac{1}{w \cdot C_1 / 2} \quad (23)$$

يبين الشكل رقم (10) النموذج التمثيلي للخط الكهربائي بدارة π و دارة T مع الشبكة المغذية باستخدام العناصر الكهربائية:



الشكل (10) النموذج التمثيلي للخط مع الشبكة المغذية باستخدام العناصر الكهربائية

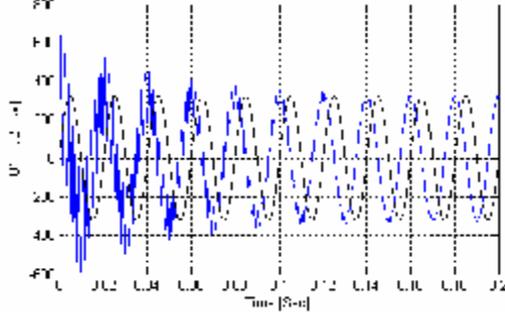
ويبين الشكل رقم (11) تغيرات التوترات U_1 و U_2 في بداية الخط الكهربائي ونهايته كتابع للزمن في الحالة العابرة التي تظهر عند وصل الخط، وهو دون حمل إلى الشبكة الكهربائية عند تمثيل الخط رباعي أقطاب على شكل π .

يمكن الملاحظة من منحنى التغيرات أن القيمة الأعظمية للتوتر الزائد الذي ينتج في هذه الحالة العابرة، عند وصل الخط الكهربائي ذي التوتر 230 ك ف إلى الشبكة العامة تساوي :

$$U_{2max} = 715/\sqrt{2} = 506 \text{ KV}$$

أي أن زيادة التوتر تبلغ 20.2 من قيمة التوتر النظامي للخط، وهي أقل من قيمة توتر الاختبار الذي توصي الهيئة العالمية للكهرباء IEC والذي يساوي $2 \cdot U_n$. 50

في بيئة ماتلاب، وذلك عند وصل الخط إلى الشبكة وتطبيق توتر الإرسال في بدايته عند استخدام رباعي أقطاب T.



الشكل رقم (15) تغيرات التوتر في بداية ونهاية الخط

الكهربائي U_2 و U_2 عند استخدام رباعي أقطاب T

يمكن الملاحظة من منحنى التغيرات أن القيمة الأعظمية للتوتر الزائد الذي ينتج في هذه الحالة العابرة، عند وصل الخط الكهربائي ذي التوتر 230 ك ف إلى الشبكة العامة تساوي:

$$U_{2 \max} = 635 / \sqrt{2} = 449 \text{ KV}$$

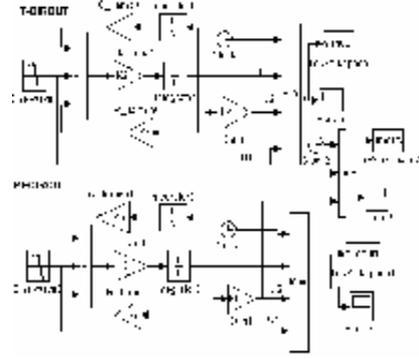
أي أن زيادة التوتر تبلغ 1.95 من قيمة التوتر النظامي للخط وهي أقل من قيمة توتر الاختبار الذي توصي الهيئة العالمية للكهرباء IEC والذي يساوي.

$$50.2 U_n$$

4 - الملاحظات والنتائج: [5],[13],[16]

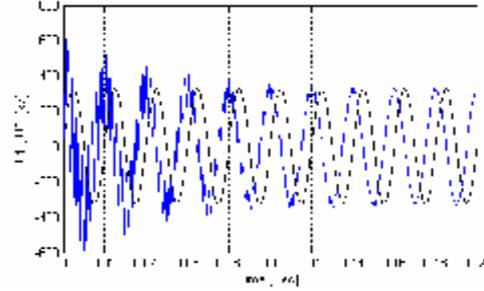
1 - تتجاوز قيمة التوتر الزائد الذي يظهر في نهاية الخط الكهربائي في الحالة العابرة عند وصل هذا الخط إلى الشبكة الكهربائية ضعفي قيمة التوتر النظامي للخط، الأمر الذي يسبب إجهادات كهربائية إضافية على عازلية التجهيزات الكهربائية في محطة التحويل في طرف الاستقبال مما يؤدي إلى انهيارها.

2 - قد تصل قيمة التوتر الزائد في الحالة العابرة ذات المنشأ الداخلي التي تظهر في شبكات التوتر العالي 230 ك ف إلى قيمة تتجاوز 500 ك ف، وقد تصل في شبكات التوتر العالي 400 ك ف إلى قيمة تتجاوز 900 ك ف، مما يشير إلى خطورة هذه التوترات الزائدة وضرورة اتخاذ الإجراءات اللازمة للحد من تأثيرها في الشبكة الكهربائية.



الشكل رقم (13) المخطط الصندوقي لنموذج الخط المدروس عند إغلاق القاطع الكهربائي للخط وهو دون حمل عند تمثيل الخط برباعي أقطاب على شكل T و π

ويبين الشكل رقم (14) تغيرات التوترات في بداية الخط الكهربائي U_1 , U_2 وفي نهايته التي تم الحصول عليها بعملية النمذجة في بيئة ماتلاب، وذلك عند وصل الخط إلى الشبكة وتطبيق توتر الإرسال في بدايته عند استخدام رباعي أقطاب π .



الشكل رقم (14) تغيرات التوتر في بداية الخط الكهربائي U_2 و نهايته عند استخدام رباعي أقطاب π

يمكن الملاحظة من منحنى التغيرات أن القيمة الأعظمية للتوتر الزائد الذي ينتج في هذه الحالة العابرة، عند وصل الخط الكهربائي ذي التوتر 230 ك ف إلى الشبكة العامة تساوي:

$$U_{2 \max} = 635 / \sqrt{2} = 449 \text{ KV}$$

أي أن زيادة التوتر تبلغ 1.95 من قيمة التوتر النظامي للخط، وهي أقل من قيمة توتر الاختبار الذي توصي الهيئة العالمية للكهرباء IEC والذي يساوي.

$$50.2 U_n$$

ويبين الشكل رقم (15) تغيرات التوتر في نهاية الخط الكهربائي U_2 الذي تم الحصول عليه بعملية النمذجة

Transient Techniques in Transmission Lines Energization Maneuver", IPST – 07 , Lyon, France, June, 2007

8 - Sadovic, S. & Sadovic, T. " *Overhead Line Switching Surge Simulator*", IPST – 07, Lyon, France, June, 2007

9 - Čaršimamović, S. , Bajramović, Z. , Marković, O. , "Influence of site and type of surge arresters onto value of switching overvoltages in gas SF6 isolated metal enclosed substations", XVIII Symp. of El. Eng. Yug. , Budva 1987.

10 - Čaršimamović, S. , Bajramović, Z. , Marković, O. , "An analysis of the switching overvoltages on the 110 kV overhead-cable line", 11-th CEPSE Conference, October 1996, Kuala Lumpur, Malaysia

11 - Thukaram, D. , Kincha , H. , P. , Kandelwal , S. , "Estimation of switching transient peak overvoltages during transmission line energization using artificial neural network", Electric Power Systems Research, Volume 76, Issue 4, Elsevier B. V. Holland, January 2006.

12 - Ibrahim A. , Dommel H. , W. , " A Knowledge Base for Switching Surge Transients", IPST – 05 , Montreal, Canada, June, 2005.

13 - Seyed H. , Sanaye H. , " Application of Transmission Line Surge Arrestors to Reduce Switching Overvoltages " , IPST – 05 , Montreal, Canada, June, 2005.

14 - Zdravković, Z. , Vukelja, P. , Naumov, R. , Vučinić, M. " Overvoltages During Switching of 400 kV, 220 kV and 110 kV Circuit-Breakers in High Voltage Networks", IPST – 99 , Budapest, Hungary, June, 1999.

15 - Oprea, L. and Velicescu, C. " Switching Overvoltages on 400 and 750 kV Romanian Transmission Lines", IPST – 99 , Budapest, Hungary, June, 1999.

16 - Cipcigan, L. , Smith, L. K. , Hiley, J. "Overvoltages Limitation in the 400 kV Nord Transylvania Network", IPST – 99 , Budapest, Hungary, June, 1999.

3 - تستخدم للحد من قيمة التوترات الزائدة ذات المنشأ الداخلي في شبكات التوتر العالي إحدى الطرائق الآتية:

- استعمال المغرغات الكهربائية وربطها في نهاية الخطوط الكهربائية لمنع موجة التوتر الزائد من الدخول إلى محطات التحويل الكهربائية المربوطة إلى طرف الاستقبال.

- استعمال مقاومات كهربائية تربط بين منبع التوتر وبداية الخط مدة تتراوح بين (0.1 - 3.0) مللي ثانية. ويمكن أن تكون هذه المقاومات ذات مرحلة واحدة أو عدة مراحل.

Références

1 - Capitaneanu S., De Fornel B., Fadel M. , Jadot F., Malrait F." *Modelling and Identification for Reducing of Overvoltage Transients*". IEE Proceeding Power Electric Applications, Vol. 150, No/Ref 2, pp 175 – 184,

2- Diesendorf, W." *Insulation Co-ordination in High Voltage Electric Power Systems*". London, England: Butterworth & Co Ltd. Copyright 1974.

3 - Lewis, W., "The Protection of Transmission Systems Against Lightning". New York, NY: John Wiley & Sons, Inc. 1950.

4 - Rüdenberg, R. " *Transient Performance of Electric Power Systems*". Cambridge, Massachusetts: McGraw-Hill. Copyright 1950.

5 - Sadović, S. Čaršimamović, S. , Heleta, M. , Bajramović, Z. , Vučinić, N. "Restricting value of switching overvoltages onto long high voltage transmission lines by means MO surge arresters building into transmission lines", XVIII Symp. of El. Eng. Yug. , Budva 1987

6 - Bui-Van, Q. , Lecompte, A. , Leblanc, N. & Larivière, P. " *Control of Switching Overvoltages and Transient Recovery Voltages for Hydro-Québec 735-kV Series-Compensated Transmission System*", IPST – 07 , Lyon, France, June, 2007

7 - Mestas, P. & Tavares, M. C. " *Comparative Analysis of Control Switching*

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق: 2009/7/2.