

النمذجة الرقمية
للمظاهر العابرة الكهرومغناطيسية
في نظم القدرة الكهربائية

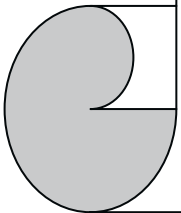
رسالة دكتوراه في هندسة نظم القدرة الكهربائية

اعداد المهندس
محمد عمار ساعاتي

المشرف العلمي	المشرف المشارك
الأستاذ الدكتور سميح الجابي	الأستاذ الدكتور هارولد جير هارد

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – دمشق - 2010

الإهداء



الموضوع	رقم الصفحة
الفصل الأول	13
1 – ملخص البحث العلمي “ النمذجة الرقمية للظواهر العابرة الكهرومغناطيسية في نظم القدرة الكهربائية “	14
1 – 1 مقدمة:	14
1 – 2 الظواهر العابرة ذات المنشأ الداخلي في الشبكات الكهربائية	15
1 – 3 الحالات العابرة في الدارات الكهربائية	15
1 – 4 نمذجة ومحاكاة الدارة الكهربائية الأساسية في الحالة العابرة	16
1 – 5 نمذجة ومحاكاة عناصر نظم القدرة الكهربائية	16
1 – 6 الحالات العابرة في الشبكات الكهربائية	16
1 – 7 دراسة تطبيقية لبعض الحالات العابرة في الشبكة الكهربائية في سورية	17
1 – 8 النتائج والمقترحات	17
الفصل الثاني	18
2 – الدراسة المرجعية	19
2 – 1 المقدمة	19
2 – 2 الظواهر العابرة في الدارات الكهربائية	19
2 – 3 الحالة العابرة الناتجة عن عمليات الوصل والفصل في الشبكات الكهربائية	20
2 – 4 الحالة العابرة الناتجة عن عمليات فصل الأعطال غير المتناظرة	29
2 – 5 الحالة العابرة الناتجة عن ظاهرة انقطاع أحد الأطوار	29
2 – 6 الحالة العابرة الناتجة عن ظاهرة الطنين الكهرطيسي	30
الفصل الثالث	33
3 – الشبكات الكهربائية في الحالات العابرة	34
3 – 1 مقدمة	34
3 – 2 الحالات العابرة ذات المنشأ الداخلي في الشبكات الكهربائية	34
3 – 3 الحالات العابرة في الدارات الكهربائية	34
3 – 4 الحالة العابرة في دارة التيار المستمر	35
3 – 4 – 1 الحالة العابرة عند تطبيق توتر كهربائي مستمر على وشيعة كهربائية	35
3 – 4 – 2 الحالة العابرة عند قصر دارة ملف كهربائي في التيار المستمر	36
3 – 4 – 3 الحالة العابرة عند تطبيق توتر مستمر على مكثف كهربائي	37
3 – 4 – 4 الحالة العابرة الناتجة عند تفريغ المكثف في التيار المستمر	41
3 – 4 – 5 الحالة العابرة عند تطبيق توتر مستمر على دارة RLC تسلسلية	42
3 – 5 الحالة العابرة في دارة التيار المتناوب	44
3 – 5 – 1 الحالة العابرة عند تطبيق توتر كهربائي متناوب على وشيعة كهربائية RL	44
3 – 5 – 2 الحالة العابرة عند تطبيق توتر كهربائي متناوب على مكثف كهربائية RC	46
3 – 5 – 3 الحالة العابرة عند تطبيق توتر كهربائي متناوب على دارة تسلسلية RLC	48
3 – 6 التفسير الفيزيائي للحالة العابرة	54
الفصل الرابع	55
4 – نمذجة ومحاكاة الدارات الكهربائية الأساسية في الحالات العابرة	56
4 – 1 تعريف النمذجة المحاكاة	56
4 – 2 نمذجة ومحاكاة الدارات الكهربائية الأساسية باستخدام بيئة Simulink	58
4 – 2 – 1 نمذجة ومحاكاة دارة كهربائية RL تسلسلية في بيئة ماتلاب Matlab\Simulink :	58
4 – 2 – 2 نمذجة ومحاكاة دارة كهربائية RLC تسلسلية في بيئة ماتلاب Matlab\Simulink	60
4 – 3 نمذجة ومحاكاة الدارات الكهربائية الأساسية باستخدام بيئة Simpower	61
4 – 3 – 1 النمذجة والمحاكاة لدارة تسلسلية RLC باستخدام مكتبة أداة التمثيل والمحاكاة Simpower	62
4 – 3 – 2 تمثيل حالة تشغيل الدارة الكهربائية RLC عند فصل ووصل قاطع التغذية باستخدام بيئة Simpower	63

65	الفصل الخامس
66	5 - نمذجة ومحاكاة عناصر نظم القدرة الكهربائية
66	5 - 1 نمذجة ومحاكاة المحولات الكهربائية
66	5 - 1 - 1 نمذجة ومحاكاة المحولات الكهربائية باستخدام بيئة برنامج Matlab\Simulink
67	5 - 1 - 2 نمذجة ومحاكاة المحولات الكهربائية الثلاثية ذات الربط نجمي نجمي Y/Y باستخدام بيئة برنامج Matlab\Simulink
69	5 - 1 - 3 نمذجة ومحاكاة المحولات الكهربائية الثلاثية ذات الربط نجمي مثلثي D/Y باستخدام بيئة برنامج Matlab\Simulink
72	5 - 2 نمذجة ومحاكاة المولدات الكهربائية باستخدام بيئة برنامج Matlab\Simulink
75	5 - 3 نمذجة ومحاكاة الخطوط الكهربائية باستخدام بيئة برنامج ماتلاب Matlab\Simulink
78	الفصل السادس
79	6 - الظواهر العابرة الكهرومغناطيسية في الشبكات الكهربائية والتوترات الزائدة التي تنتج عنها
79	6 - 1 الحالة العابرة والتوترات الكهربائية الزائدة التي تنتج عند إغلاق القاطع الآلي للخط الكهربائي
82	6 - 1 - 1 دراسة زيادة التوتر في الحالة العابرة عند وصل خط إلى شبكة التوتر العالي
82	6 - 1 - 2 دراسة حالة باستخدام نمذجة العناصر الكهربائية الممثلة للنظام
86	6 - 1 - 3 دراسة حالة باستخدام النمذجة باستخدام المخططات الصندوقية
88	6 - 2 الحالة العابرة والتوترات الكهربائية الزائدة التي تنتج عند فصل القاطع الآلي للخط الكهربائي
92	6 - 2 - 1 دراسة زيادة التوتر في الحالة العابرة عند فصل خط عن شبكة التوتر العالي
93	6 - 2 - 2 دراسة حالة باستخدام المحاكاة باستخدام العناصر الكهربائية الممثلة للنظام
97	6 - 2 - 3 محاكاة العناصر الكهربائية الممثلة للنظام في بيئة MATLAB
99	6 - 3 الحالة العابرة والتوترات الكهربائية الزائدة التي تنتج عند الطنين الكهرطيسي
100	6 - 3 - 1 الحالة العابرة والتوترات الكهربائية الزائدة التي تنتج عن الطنين الكهرطيسي عند التردد الصناعي 50 Hz
103	6 - 3 - 2 دراسة حالة باستخدام المحاكاة باستخدام العناصر الكهربائية الممثلة للنظام
104	6 - 3 - 3 دراسة حالة باستخدام محاكاة العناصر الكهربائية الممثلة للنظام في بيئة MATLAB
105	6 - 4 الحالة العابرة الناشئة عن الأعطال غير المتناظرة في شبكات التوتر العالي الكهربائية
105	6 - 4 - 1 حساب التوترات العابرة الناتجة عن قصر دائرة غير متناظر
105	6 - 4 - 2 حساب التوترات العابرة الناتجة عن حالة عطل طور واحد مع الأرض
106	6 - 4 - 3 حساب التوترات العابرة الناتجة عن حالة عطل طورين مع الأرض
109	6 - 5 الحالة العابرة الناتجة عن انقطاع أطوار الخط الكهربائي في شبكات التوتر العالي الكهربائية
109	6 - 5 - 1 الحالة العابرة الناتجة عن انقطاع أحد أطوار الخط الكهربائي في شبكات التوتر العالي الكهربائية
112	6 - 5 - 2 الحالة العابرة الناتجة عن انقطاع طورين من أطوار الخط الكهربائي في شبكات التوتر العالي الكهربائية
113	6 - 5 - 3 دراسة حالة عند انقطاع أحد أطوار الخط الكهربائي باستخدام محاكاة العناصر الكهربائية الممثلة للنظام
114	6 - 5 - 4 دراسة حالة عند انقطاع أحد أطوار الخط باستخدام النظام في بيئة MATLAB
115	الفصل السابع
116	7 - دراسة تطبيقية لبعض الظواهر العابرة في الشبكة الكهربائية السورية باستخدام برنامج الظواهر العابرة الكهرومغناطيسية EMTP
116	7-1 نظرة عامة حول البرنامج الحاسوبي المتخصص EMTP
116	7-2 الشبكة الكهربائية موضوع الدراسة
118	7-3 الظواهر العابرة التي تنتج عند حدوث عطل ثلاثي الطور على قضبان تجميع محطة تحويل فيروزة
126	الفصل الثامن
127	8 - النتائج والمقترحات
132	- جدول المصطلحات
136	- جدول الرموز
138	- المراجع العلمية
142	- الملخص باللغة الانكليزية

الأشكال	
14	الشكل رقم (1 - 1) حزم الترددات للظواهر العابرة المختلفة
19	الشكل رقم (2 - 1) دائرة RLC تسلسلية لدراسة الحالة العابرة
19	الشكل رقم (2 - 2) تغيرات التوتر على أقطاب المقاومة R2 عند تفريغ المكثف
20	الشكل رقم (2 - 3) تمثيل الخط 420 ك ف
20	الشكل رقم (2 - 4) التوتر الزائد العابر عند إعادة وصل خط KV 420
21	الشكل رقم (2 - 5) تغيرات قيمة التوتر الزائد العابر مع تغيير طول الخط الكهربائي
21	الشكل رقم (2 - 6) طريقة تركيب مفرغات الشحنات الكهربائية TLA تحت عوازل الخط الكهربائي KV 420
22	الشكل رقم (2 - 7) تغيرات التوتر عند وصل لوحة مكثفات التعويض الى الشبكة
22	الشكل رقم (2 - 8) طريقة تركيب ملفات التعويض العرضاني على أطوار خط كهربائي KV 132
23	الشكل رقم (2 - 9) متوسط زمن اغلاق القاطع الآلي الأطوار الثلاثة
23	الشكل رقم (2 - 10) المخطط الصندوقي لتمثيل النظام الكهربائي باستخدام EMTP
23	الشكل رقم (2 - 11) تغيرات التوتر العابر الزائد لأجل حلول مختلفة للحد من الحالة العابرة
24	الشكل رقم (2 - 12) تغيرات قيمة التوتر الزائد العابر على أحد خطوط الشبكة الكهربائية KV 110 في مونتينيغرو
24	الشكل رقم (2 - 13) نموذج نظام القدرة المستعمل والمحددات الكهربائية لعناصر النظام
25	الشكل رقم (2 - 14) تغيرات التوتر العابر الزائد على أطوار الخط الكهربائي L4
25	الشكل رقم (2 - 15) تغيرات التوتر العابر الزائد على أطوار الخط الكهربائي L4 عند ربط ملف التعويض العرضاني SR4 في نهاية الخط في محطة التحويل BB3
25	الشكل رقم (2 - 16) الدارة الكهربائية المكافئة لنظام التوزيع المفترض
26	الشكل رقم (2 - 17) الدارة الكهربائية العملية التي أجريت عليها القياسات والاختبارات.
26	الشكل رقم (2 - 18) تغيرات التوتر على مرابط ملف التوتر العالي للمحولة التي جرى عليها الاختبار
27	الشكل رقم (2 - 19) تغيرات التوتر العابر الزائد الذي ينتج عن عمليات الوصل والفصل باستخدام المحاكاة في بيئة البرنامج EMTP
27	الشكل رقم (2 - 20) التوتر العابر الزائد الذي ينتج عند إعادة ربط محولة ذات استطاعة كبيرة الى الشبكة الكهربائية باستخدام المحاكاة في بيئة البرنامج EMTP
28	الشكل رقم (2 - 21) نظام القدرة الكهربائي العملي المقترح للدراسة
28	الشكل رقم (2 - 22) تغيرات التيارات العابرة عند وصل
29	الشكل رقم (2 - 23) الدارة المكافئة للشبكة الكهربائية المدروسة في فيبنتام
29	الشكل رقم (2 - 24) تغيرات التوتر العابر الذي ينتج عند حدوث عطل ثلاثي مع الأرض قرب القاطع الآلي في النقطة 5
30	الشكل رقم (2 - 25) تغيرات التوتر العابر عند فتح طور واحد من أطوار القاطع الآلي
30	الشكل رقم (2 - 25) الدارة الكهربائية المكافئة التي تمت محاكاتها باستخدام EMTP
30	الشكل رقم (2 - 26) تغيرات التوتر الزائد في حالة الطنين
31	الشكل رقم (2 - 27) التوافقيات المتضمنة في موجة التوتر العابر الناتج عن الطنين
31	الشكل رقم (2 - 28) تغيرات التوتر الزائد في حالة الطنين باستخدام القياسات العملية
31	الشكل رقم (2 - 28) الدارة المكافئة لجزء من شبكة التوتر العالي في سويسرا
32	الشكل رقم (2 - 29) تغيرات التوتر على الأطوار الثلاثة في محطة التحويل WA بعد العطل وتحت تأثير ظاهرة الطنين الكهربائي.
32	الشكل رقم (2 - 30) تغيرات التوتر على الأطوار الثلاثة في محطة التحويل WB بعد العطل وتحت تأثير ظاهرة الطنين الكهربائي.
32	الشكل رقم (2 - 31) فيبين تحليل التوافقيات المتضمنة في موجة التوتر الزائد العابر الناتج عن الطنين
35	الشكل رقم (3 - 1) دائرة وشيعة كهربائية حقيقية R,L
36	الشكل رقم (3 - 2) تغير التيار دائرة وشيعة كهربائية حقيقية R,L
37	الشكل رقم (3 - 3) تغيرات التيار الكهربائي كتابع للزمن
38	الشكل رقم (3 - 4) الدارة الكهربائية لشحن وتفريغ المكثف
40	الشكل رقم (3 - 5) تغيرات التوتر والتيار على أقطاب المكثف
41	الشكل رقم (3 - 6) تغيرات التيار تفريغ المكثف الكهربائي

42	الشكل رقم (3 - 7) دائرة تسلسلية RLC في التيار المستمر
43	الشكل رقم (3 - 8) تغير التيار والشحنة في الدارة الكهربائية RLC التسلسلية
44	الشكل رقم (3 - 9) دائرة تيار متناوب تسلسلية تحتوي على العناصر RL
46	الشكل رقم (3 - 10) تغيرات التيار الكهربائي في دائرة RL تسلسلية
46	الشكل رقم (3 - 11) دائرة تيار متناوب تسلسلية تحتوي على العناصر RC
48	الشكل رقم (3 - 12) تغيرات التيار المتناوب في دائرة تسلسلية تحتوي على العناصر RC
48	الشكل رقم (3 - 13) دائرة تيار متناوب تسلسلية تحتوي على العناصر RLC.....
51	الشكل رقم (3 - 14) الحالة العابرة للتيار عندما $R < RC$
52	الشكل رقم (3 - 15) الحالة العابرة للتيار عندما $R = 0$
52	الشكل رقم (3 - 16) الحالة العابرة للتيار عندما $R = RC$
53	الشكل رقم (3 - 17) الحالة العابرة للتيار عندما $R > RC$
57	الشكل رقم (4 - 1) مخطط الخيارات في النمذجة
58	الشكل رقم (4 - 2) نمذجة دائرة كهربائية بسيطة.....70
59	الشكل رقم (4 - 3) المخطط الصندوقي في بيئة ماتلاب لمحاكاة دائرة RL تسلسلية
59	الشكل رقم (4 - 4) نتائج محاكاة دائرة RL تسلسلية في بيئة ماتلاب.
60	الشكل رقم (4 - 5) دائرة كهربائية بسيطة تحتوي على مقاومة وملف ومكثف مربوطة على التسلسل
60	الشكل رقم (4 - 6) المخطط الصندوقي لمحاكاة دائرة RLC تسلسلية في بيئة سيمولينك
61	الشكل رقم (4 - 7) نتائج محاكاة دائرة تسلسلية RLC في بيئة Simpower
62	الشكل رقم (4 - 8) المخطط الصندوقي لمحاكاة دائرة RLC تسلسلية في بيئة Simpower
63	الشكل رقم (4 - 9) نتائج المحاكاة لدائرة RLC تسلسلية في بيئة Simpower
63	الشكل رقم (4 - 10) المخطط الصندوقي لمحاكاة الدارة الكهربائية التسلسلية RLC مع قاطع الآلي
64	الشكل رقم (4 - 11) نتائج محاكاة الدارة التسلسلية مع إجراء عملية وصل وفصل القاطع
66	الشكل رقم (5 - 1) الدارة المكافئة للمحولة الكهربائية ثنائية الملفات وأحادية الطور
67	الشكل رقم (5 - 2) مخطط لدارة المحولة موصولة إلى منبع التغذية والدارة المكافئة
68	الشكل رقم (5 - 3) المخطط الصندوقي لمحاكاة وتمثيل المحولة الكهربائية ثلاثية الأطوار المربوطة في مجموعة توصيل نجمي - نجمي Y/Y .
69	الشكل رقم (5 - 4) توصيل المحولة نجمي / مثلثي والدارة المكافئة للمحولة
70	الشكل رقم (5 - 5) المخطط الصندوقي لتمثيل ومحاكاة محولة كهربائية ثلاثية الأطوار موصولة نجمي / مثلثي..82
71	الشكل (5 - 6) تغيرات التيارات والتوترات في ملفات المحولة الكهربائية ثلاثية الأطوار
71	الشكل (5 - 7) تغيرات الفيض الذاتي في الملف الأول والثاني وتغيرات الفيض المتبادل
72	الشكل رقم (5 - 8) الدارة المكافئة للمولد التزامني
73	الشكل رقم (5 - 9) المخطط الصندوقي لتمثيل ومحاكاة مولدة كهربائية.
74	الشكل رقم (5 - 10) تغيرات δ , T_{em} , i_f , i_a عند حالة قصر مباشر على أقطاب المولد
74	الشكل رقم (5 - 11) تغيرات $V(t)$, $i(t)$, P_{gen} , Q_{gen} عند حالة قصر مباشر على أقطاب المولد
76	الشكل رقم (5 - 12) الدارة المكافئة للخط الكهربائي على شكل رباعي أقطاب T
77	الشكل رقم (5 - 13) الدارة المكافئة للخط الكهربائي على شكل رباعي أقطاب π
77	الشكل رقم (5 - 14) المخطط الصندوقي لتمثيل ومحاكاة رباعي الأقطاب المكافئة للخطوط الكهربائية باستخدام العناصر الكهربائية في بيئة برنامج Simpower .
77	الشكل رقم (5 - 15) المخطط الصندوقي لتمثيل ومحاكاة رباعي الأقطاب المكافئة للخطوط الكهربائية في بيئة البرنامج MATLAB / Simulink 92
79	الشكل رقم (6 - 1) دائرة تمثيل الخط الكهربائي برباعي أقطاب T
79	الشكل رقم (6 - 2) دائرة تمثيل الخط الكهربائي برباعي أقطاب π
80	الشكل رقم (6 - 3) الدارة المكافئة للشبكة
80	الشكل رقم (6 - 4) الدارة المكافئة للشبكة

83	الشكل رقم (6 - 5) أبراج الخط الكهربائي KV 230
83	الشكل رقم (6 - 6) الدارة الرمزية للشبكة الكهربائية المستخدمة
84	الشكل رقم (6 - 7) تمثيل الخط بدارة رباعي أقطاب T
84	الشكل رقم (6 - 8) تمثيل الخط بدارة رباعي أقطاب π
85	الشكل رقم (6 - 9) النموذج التمثيلي للخط مع الشبكة المغذية باستخدام العناصر الكهربائية
85	الشكل رقم (6 - 10) تغيرات التوترات U2 و U1 عند تمثيل الخط برباعي أقطاب على شكل π
86	الشكل رقم (6 - 11) تغيرات التوترات U1 و U2 عند تمثيل الخط برباعي أقطاب على شكل T.
86	الشكل رقم (6-12) المخطط الصندوقي للنموذج المدروسة عند انغلاق القاطع الكهربائي 104
87	الشكل رقم (6-13) تغيرات التوتر في بداية و نهاية الخط الكهربائي U1 و U2 عند استخدام رباعي أقطاب π
87	الشكل رقم (6-14) تغيرات التوتر في بداية و نهاية الخط الكهربائي U1 و U2 عند استخدام رباعي أقطاب T.
88	الشكل رقم (6 - 15) الدارة المكافئة للخط الكهربائي وهو بدون حمل
88	الشكل رقم (6 - 16) فرق التوتر على قطبي القاطع بعد نصف دور
91	الشكل رقم (6 - 17) المنحني القياسي الذي يعطي قيم kW المقابلة لقيم k
92	الشكل رقم (6 - 18) دارة تمثيل الخط الكهربائي برباعي أقطاب T
92	الشكل رقم (6 - 19) دارة تمثيل الخط الكهربائي برباعي أقطاب π
92	الشكل رقم (6 - 20) الدارة الكهربائية المكافئة المستخدمة
93	الشكل رقم (6 - 21) أبراج الخط الكهربائي KV 400
93	الشكل رقم (6 - 22) الدارة الرمزية للشبكة الكهربائية المستخدمة
94	الشكل رقم (6 - 23) تمثيل الخط برباعي أقطاب T
94	الشكل رقم (6 - 24) تمثيل الخط برباعي أقطاب π
95	الشكل (6 - 25) النموذج التمثيلي للخط الكهربائي وهو يكافئ رباعي أقطاب T مع الشبكة المغذية باستخدام العناصر الكهربائية
95	الشكل رقم (6 - 26) تغيرات التوتر في نهاية وبداية الخط الكهربائي U1/U2 عند فصل الخط عن الشبكة عند استخدام رباعي أقطاب T..... 116
96	الشكل رقم (6 - 27) النموذج التمثيلي للخط الكهربائي وهو يكافئ رباعي أقطاب π مع الشبكة المغذية باستخدام العناصر الكهربائية
96	الشكل رقم (6 - 28) تغيرات التوترات في نهاية وبداية الخط الكهربائي
97	الشكل رقم (6 - 29) نمذجة حالة فصل خط ممثل برباعي أقطاب T باستخدام بيئة ماتلاب
97	الشكل رقم (6 - 30) تغيرات التوترات في بداية ونهاية الخط في حالة فصل خط كهربائي
98	الشكل رقم (6 - 31) نمذجة حالة فصل خط ممثل برباعي أقطاب π باستخدام بيئة ماتلاب
98	الشكل رقم (6 - 32) تغيرات التوترات في بداية ونهاية الخط في حالة فصل خط كهربائي
99	الشكل رقم (6 - 33) دارة الطنين الكهرطيسي التسلسلي
100	الشكل رقم (6 - 34) دارة الطنين الكهرطيسي التفرعي
100	الشكل رقم (6 - 35) شبكة التغذية المستخدمة في حالة الطنين الكهرطيسي
100	الشكل رقم (6 - 36) الدارة المكافئة للخط وهو ممثل برباعي أقطاب T
101	الشكل رقم (6 - 37) الدارة المكافئة للخط
103	الشكل رقم (6 - 38) النموذج التمثيلي للشبكة باستخدام العناصر الكهربائية.
103	الشكل رقم (6 - 39) تغيرات التوتر في نهاية وبداية الخط الكهربائي U1 و U2
104	الشكل رقم (6 - 40) النموذج التمثيلي للشبكة في بيئة ماتلاب
104	الشكل رقم (6 - 41) تغيرات التوتر في نهاية وبداية الخط الكهربائي U1 و U2
105	الشكل رقم (6 - 42) الدارة الرمزية المكافئة للعطل الأحادي
106	الشكل رقم (6 - 43) الدارة الرمزية المكافئة لحساب تيار عطل طورين مع الأرض
109	الشكل رقم (6 - 44) دارة مكافئة لشبكة تغذية ثلاثية الطور
109	الشكل رقم (6 - 45) انقطاع أحد الأطوار في النقطة A

110	الشكل رقم (6 - 46) شبكة كهربائية ذات استطاعة كهربائية
110	الشكل رقم (6 - 47) اغلاق قطبين للقاطع الآلي وبقاء القطب الثالث مفتوح
111	الشكل رقم (6 - 48) الدارة المكافئة عند انقطاع أحد أطوار الخط
112	الشكل رقم (6 - 49) اغلاق قطب للقاطع الآلي وبقاء القطبين الآخرين مفتوحين
112	الشكل رقم (6 - 50) الدارة المكافئة عند انقطاع طورين من أطوار الخط الكهربائي
113	الشكل رقم (6 - 51) تغيرات التوتر في نهاية وبداية الخط الكهربائي U1 و U2 عند انقطاع أحد أطوار الخط الكهربائي باستخدام البرنامج التمثيلي
114	الشكل رقم (6 - 52) تغيرات التوتر في نهاية وبداية الخط الكهربائي U1 و U2 عند انقطاع أحد أطوار الخط الكهربائي باستخدام بيئة ماتلاب
117	الشكل 7-1: جزء الشبكة الكهربائية السورية المعتبرة في الدراسة
121	الشكل رقم (7-2) تغيرات توتر الطور A للمولد 1 لأجل الحالة دون استخدام التحكم
121	الشكل رقم (7-3) تغيرات توتر الطور A على خرج المولد GJN21 مع وجود تحكم
122	الشكل رقم (7-4) تغيرات توتر الطور لقضبان تجميع محطة تحويل فيروزة عند عدم وجود نظم التحكم
122	الشكل رقم (7-5) تغيرات توتر الطور على قضبان التجميع المعطلة في محطة تحويل فيروزة مع وجود نظام تحكم
123	الشكل رقم (7-6) تغيرات توتر الطور لقضبان محطة عدرا 400 في حالة عدم تفعيل التحكم
123	الشكل رقم (7-7) تشوه موجة التوتر الطور لقضبان محطة عدرا 400 في حالة عدم تفعيل التحكم
124	الشكل رقم (7-8) تغيرات توتر الطور لقضبان محطة تحويل عدرا 400 عند تفعيل التحكم
124	الشكل رقم (7-9) تأثير العطل المتناظر عند قضبان تجميع محطة تحويل فيروزة على الانحراف عن السرعة التزامنية للمولد 1 لأجل الحالتين: دون تحكم (الى اليمين)، ومع تحكم (الى اليسار)
125	الشكل رقم (7-10) تأثير العطل المتناظر عند قضبان تجميع محطة تحويل فيروزة على العزم الكهرومغناطيسي للمولد 1 لأجل الحالة بدون تحكم
125	الشكل رقم (7-11) تأثير العطل المتناظر عند قضبان تجميع محطة تحويل فيروزة على العزم الكهرومغناطيسي للمولد 1 لأجل الحالة مع وجود التحكم
128	الشكل رقم (8-1) طريقة تركيب مفرغات الشحنات الكهربائية TLA تحت عوازل الخط الكهربائي KV 420
128	الشكل رقم (8-2) استخدام مفرغات الشحنات في نهاية الخطوط الكهربائية لحماية محطة التحويل من التوترات العابرة الزائدة
129	الشكل رقم (8-3) استخدام مفرغات الشحنات لحماية المحولات من التوترات العابرة الزائدة
129	الشكل رقم (8-4) استخدام مفرغات الشحنات توتر KV 400 لحماية محطة التحويل من التوترات العابرة الزائدة
130	الشكل رقم (8-5) طريقة تركيب ملفات التعويض العرضاني على أطوار خط كهربائي KV 132
130	الشكل رقم (8-6) ملفات تعويض عرضاني أحادية الطور تبريد بالهواء مستخدمة في ألمانيا
131	الشكل رقم (8-7) ملفات تعويض عرضاني ثلاثية الطور تبريد بالزيت

الفصل الأول

ملخص البحث العلمي “ النمذجة الرقمية للظواهر العابرة الكهرومغناطيسية في نظم القدرة الكهربائية “

1 - ملخص البحث العلمي «النمذجة الرقمية للظواهر العابرة الكهرومغناطيسية في نظم القدرة الكهربائية»

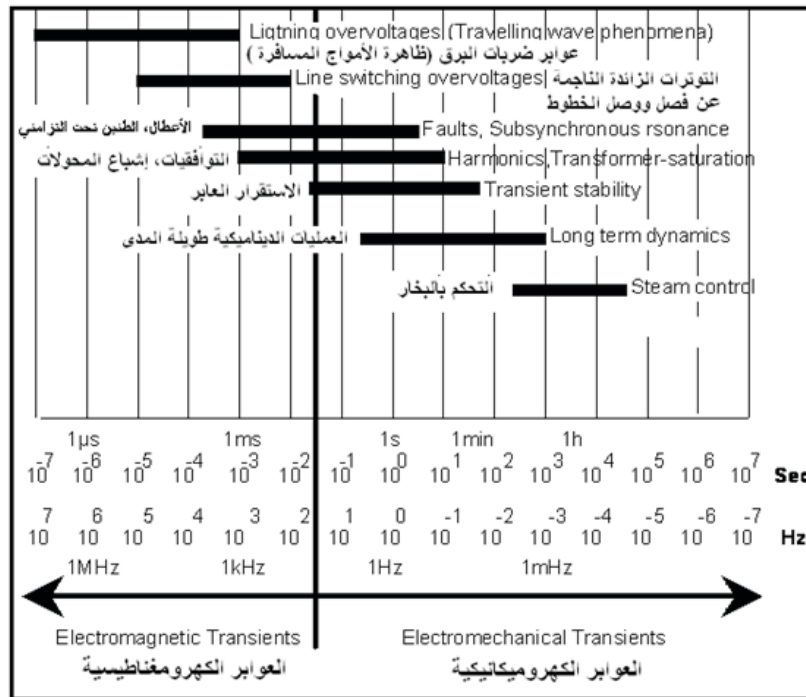
1-1 مقدمة:

تمثل الحالات العابرة في الشبكات الكهربائية حالات تشغيل غير نظامية يمكن أن تؤدي إلى ظهور توترات زائدة عالية جداً أو إلى توليد تيارات كبيرة قد تسبب إتلاف وتعطيل بعض عناصر الشبكة الكهربائية مثل المولدات والمحولات والخطوط الكهربائية. وتفرض زيادة الطلب المستمر على الطاقة الكهربائية إضافة محطات جديدة لتوليد الطاقة الكهربائية مما يدفع لرفع سويات التوتر في شبكات النقل إلى قيم عالية جداً وقد وصل توتر التشغيل النظامي في بعض الشبكات إلى 900 V بالتيار المتردد و 1000 KV بالتيار المستمر. تقسم التوترات العابرة في شبكات التوتر العالي إلى:

- التوترات الزائدة العابرة ذات المنشأ الخارجي: وتنتج هذه التوترات عن العوامل الجوية كالبرق والصواعق.
- التوترات الزائدة العابرة ذات المنشأ الداخلي: وتنتج هذه التوترات ضمن الشبكات الكهربائية تحت تأثير عن عوامل داخلية تتعلق بتبادل الطاقة الكهربائية المخزنة في العناصر الكهربائية المكافئة للشبكات عند تنفيذ عمليات الوصل والفصل أو عند حدوث الأعطال المفاجئة أو عند تحقق شروط الطنين أو عند انقطاع أحد الأطوار.

تعمل الأنظمة الفيزيائية بشكل عام والشبكات الكهربائية بشكل خاص في حالات تشغيل نظامية ومستقرة دائماً. وعندما تنتقل هذه الأنظمة من حالة تشغيل مستقرة إلى حالة تشغيل مستقرة أخرى فإنها تمر في مرحلة عابرة تدوم لفترة زمنية متناهية في الصغر قد لا تتجاوز أجزاء من الثانية. أي يمكن تعريف الحالة العابرة على أنها حالة انتقالية بين حالتين مستقرتين متعاقبتين في الشبكة الكهربائية. كما هو الحال عند ربط حمل كهربائي شبكة أو فصله، أو عند تغيير الحمل بشكل فجائي أو عند فصل التوتر عن أحد أجزاء الشبكة. وتنتج في الحالات العابرة توترات كهربائية زائدة تنتقل على شكل موجة مسافرة عبر نواقل الخطوط الهوائية والكابلات وملفات المحولات والمولدات.

يمكن اعتبار نظام القدرة الكهربائية من بين النظم الديناميكية الأكثر تعقيداً التي أبدعها الإنسان، فهو يعمل، بسبب مكوناته الدوارة وغير الخطية وداراته التحكمية، في ظروف عابرة دائمة، حتى لو لم يتعرض لاضطراب ما. ولكن مع ذلك يمكن إجراء بعض الدراسات التحليلية لنظام القدرة بافتراض أنه يعمل في ظروف ثابتة steady state أي أن التوترات والتيارات جيبية والتردد ثابت والمطالات تتغير ببطء وجميع مكونات النظام خطية. هذه الافتراضات تسمح لنا باستخدام التحليل العقدي حيث تمثل المحارضة والسعة بمفاعلة ثابتة ويكون النموذج الرياضي للشبكة مؤلفاً من معادلات جبرية. وتُعتمد حالة العمل الثابتة في دراسة جريان الحمل وهي حالة مرجعية مناسبة لدراسات أخرى كتحليل الأعطال و تقدير الحالة state estimation وتجديد الوحدات unit commitment وتقدير الأمان security assessment. وهي أيضاً ضرورية لتعيين حالة الشبكة قبيل إجراء دراسات الحالة العابرة.



الشكل رقم (1 - 1) حزم الترددات للظواهر العابرة المختلفة

ولكي نتمكن من تخطيط وتصميم نظام قدرة أمثل فنيا واقتصاديا لابد من إجراء دراسات لأثر الاضطرابات التي يحتمل أن يتعرض لها النظام مثل الأعطال، وعمليات الفصل والوصل، وضربات البرق، وفصل الأحمال وربطها وتحقق شروط الطنين الكهريطيسي وانقطاع الأطوار. هذه الاضطرابات تؤدي الى نشوء عمليات أو ظواهر عابرة (نسميها اختصارا العوابر) transients في نظام القدرة، تتميز بوجود اهتزازات أو ذبذبات oscillations (قد تكون متخامدة أو متنامية) في منحنيات متحولات الشبكة، ذات ترددات تتراوح بين الميلي هرتز وبضع ميغاهرتز حسب الاضطراب الواقع على الشبكة وفترة استمراره. وتبعاً لهذه الترددات يمكن تصنيف العوابر كما هو مبين في الشكل رقم (1-1) الى عوابر كهرومغناطيسية (سريعة) مجالها الترددي يقع تقريباً بين 1kHz الى بضع MHz (مثل العوابر الناجمة عن ضربات البرق أو عمليات الفصل والوصل ...) وعوابر كهروميكانيكية (بطيئة) تردداتها من مرتبة mHz الى بضع Hz (مثل اهتزازات دوار المنوبات في دراسات الاستقرار الديناميكي، وعوابر التحكم بصمام البخار للعنفة). وبضيف بعض الباحثين صنفاً ثالثاً هو العوابر المختلطة ذات الترددات القريبة من التردد الأساسي (مثل الطنين تحت التوافقي، فصل الأحمال، التحكم بالتوتر).

وبتعبير آخر يمكن تعريف أصناف الظواهر العابرة كما يلي:

- **الظواهر العابرة الكهرومغناطيسية** (العوابر السريعة) هي التي تجسّد التداخل بين الطاقة المغناطيسية المخزنة في الحقول المغناطيسية في الملفات والطاقة الكهربائية المخزنة في الحقول الكهربائية في المكثفات.
 - **الظواهر العابرة الكهروميكانيكية** (العوابر البطيئة) هي العوابر التي تجسّد التداخل بين الطاقة الميكانيكية المخزنة في الآلات الدوارة والطاقة الكهربائية المخزنة في الشبكة الكهربائية.
- وقد تمت في هذا البحث العلمي دراسة المسائل التالية:

2-1 الظواهر العابرة ذات المنشأ الداخلي في الشبكات الكهربائية:

تعتبر الحالات العابرة التي تظهر في شبكات نقل القدرة الكهربائية حالات عمل غير طبيعية تؤدي إلى مشاكل خطيرة ينبغي معالجتها في الوقت المناسب حتى لا تؤثر على أداء الشبكة الكهربائية بشكل سلبي كحدوث أضرار بتلك المنشآت أو فقدان الشبكة لاستقرارها. يتم تصنيف الحالة العابرة تبعاً لسبب حدوثها إلى:

- 1- الحالة العابرة الناتجة عن إغلاق القاطع الكهربائي لخط عالي التوتر وهو بدون حمل.
 - 2- الحالة العابرة الناتجة عن فصل القاطع الكهربائي لخط عالي التوتر وهو بدون حمل.
 - 3- الحالة العابرة الناتجة عن ظاهرة الطنين الكهريطيسي.
 - 4- الحالة العابرة الناتجة عن انقطاع طور أو طورين من أطوار خطوط التوتر العالي الكهربائي.
 - 5- الحالات العابرة الناتجة عن الأعطال المختلفة:
- عطل طور مع الأرض.
 - عطل طورين مع الأرض أو بدون الأرض.
 - عطل ثلاثة أطوار مع الأرض أو بدون الأرض.

3-1 الحالات العابرة في الدارات الكهربائية:

للعناصر الكهربائية المكونة لهذه الشبكة، حيث تستبدل الشبكة الكهربائية بدارة كهربائية مكافئة. ويتم اعتماد عدة فرضيات مساعدة لحل المسائل المختلفة المتعلقة بحالات التشغيل النظامية وبحالات التشغيل العابرة، ومن أهم هذه الفرضيات ما يلي:

- تعتبر كافة العناصر المكونة للشبكة من مولدات ومحولات وخطوط كهربائية عناصر متناظرة ومتجانسة نسبة للأطوار الثلاثة، الأمر الذي يسمح بدراسة أي مسألة متعلقة بالشبكة وكأنها شبكة ذات طور واحد، أي تتم الدراسات استناداً للشبكة وحيدة الخط المكافئة.
- تعتبر فترة الحالة العابرة صغيرة جداً بحيث ينتج عن المقاومات الكهربائية لمختلف عناصر الشبكة الكهربائية أثر حراري يمكن إهماله، أي أن الدراسات تتم مع إهمال المقاومات المختلفة لعناصر الشبكة الكهربائية.
- يمكن إرجاع أي شبكة كهربائية مهما كانت من التعقيد إلى دارة كهربائية أساسية بسيطة تحتوي على مقاومة وملف ومكثف مربوطة مع بعضها على التسلسل أو على التفرع.

ولفهم الحالات العابرة في الشبكات الكهربائية بشكل تمت في هذا البحث دراسة الحالات العابرة التي يمكن أن تظهر في الدارة الكهربائية الأساسية البسيطة التي تحتوي على مقاومة وملف ومكثف وكما يلي عندما يطبق عليها توتر كهربائي مستمر أو توتر كهربائي متناوب وكما يلي:

الحالة العابرة في دارة التيار المستمر:

1- الحالة العابرة عند تطبيق توتر كهربائي مستمر على وشيعة كهربائية RL

2- الحالة العابرة عند قصر دارة ملف كهربائي في التيار المستمر RL

3- الحالة العابرة عند تطبيق توتر مستمر على مكثف كهربائي RC

4- الحالة العابرة الناتجة عند تفريغ المكثف في التيار المستمر RC

5- الحالة العابرة عند تطبيق توتر مستمر على دارة RLC تسلسلية

الحالة العابرة في دارة التيار المتناوب:

1- الحالة العابرة عند تطبيق توتر كهربائي متناوب على وشيعة كهربائية RL

2- الحالة العابرة عند تطبيق توتر كهربائي متناوب على مكثف كهربائي RC

3- الحالة العابرة عند تطبيق توتر كهربائي متناوب على دارة RLC تسلسلية

4-1 نمذجة ومحاكاة الدارة الكهربائية الأساسية في الحالة العابرة

لقد تم في هذه المرحلة من هذا البحث العلمي تعريف نظرية النمذجة والمحاكاة وتحديد الطرق العملية المستخدمة لنمذجة ومحاكاة الدارات الكهربائية الأساسية في الحالة العابرة.

وتم استخدام الطرائق العملية التالية:

- استخدام بيئة برنامج ماتلاب MATLAB – SIMULINK ومكتبة النمذجة والمحاكاة المرتبطة به لنمذجة دارة التيار الأساسية.
 - استخدام بيئة برنامج MATLAB - SIMPOWER SYS ومكتبة النمذجة والمحاكاة المرتبطة به لنمذجة مختلف العناصر الفيزيائية المكونة للدارة الكهربائية المعقدة.
- وجرت عملية تمثيل ومحاكاة الدارات الكهربائية الأساسية استناداً إلى معادلات تشغيلها. وقد تم تمثيل ومحاكاة الدارات الكهربائية الأساسية التالية:

- نمذجة ومحاكاة دارة كهربائية RL تسلسلية في بيئة ماتلاب Matlab\Simulink
- نمذجة ومحاكاة دارة كهربائية RLC تسلسلية في بيئة ماتلاب Matlab\Simulink
- النمذجة والمحاكاة لدارة تسلسلية RLC باستخدام مكتبة أداة التمثيل والمحاكاة Simpower
- تمثيل حالة تشغيل الدارة الكهربائية RLC عند فصل ووصل قاطع التغذية باستخدام بيئة Simpower

5-1 نمذجة ومحاكاة عناصر نظم القدرة الكهربائية

وجرت في هذه المرحلة من هذا البحث العلمي عملية تعريف عملية نمذجة ومحاكاة وتمثيل عناصر نظم القدرة الكهربائية المختلفة من مولدات ومحولات وخطوط كهربائية استناداً إلى معادلات تشغيل هذه العناصر في الحالة المستقرة والحالة العابرة.

وتم تمثيل ومحاكاة عناصر نظم القدرة الكهربائية وكما يلي:

- نمذجة ومحاكاة المحولات الكهربائية باستخدام بيئة برنامج Matlab\Simulink
- نمذجة ومحاكاة المولدات الكهربائية باستخدام بيئة برنامج Matlab\Simulink
- نمذجة ومحاكاة الخطوط الكهربائية باستخدام بيئة برنامج Matlab\Simulink

6-1 الحالات العابرة في الشبكات الكهربائية

لقد تمت في هذه المرحلة من البحث العلمي عملية حساب قيمة التوتر الزائد الذي يظهر في الحالة العابرة التي قد تظهر في شبكة التوتر العالي عن طريق استخدام معادلات تشغيل الخط الكهربائي، وتم وضع برامج حاسوبية و نماذج تمثيلية ملائمة لهذه الحالة وذلك باستخدام:

• نمذجة العناصر الكهربائية الممثلة للنظام ضمن بيئة SIMPOWER

• النمذجة باستخدام المخططات الصندوقية ضمن بيئة ماتلاب MATLAB

لقد جرى تطبيق هذه الدراسة على حالة عملية 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، وكذلك تم تطبيق هذه الدراسة على خط كهربائي بتوتر 400 ك ف وبطول 140 كم، وهو الخط الذي يربط محطة تحويل فيروزة مع محطة تحويل عدرا 2.

وقد تم تمثيل ونمذجة الحالات العابرة التالية:

- نمذجة ومحاكاة الحالة العابرة الناتجة عند وصل خطوط التوتر العالي إلى الشبكة الكهربائية
- نمذجة ومحاكاة الحالة العابرة الناتجة عند فصل خطوط التوتر العالي عن الشبكة الكهربائية
- نمذجة ومحاكاة الحالة العابرة الناتجة عند تحقق شروط الطنين الكهرطيسي
- نمذجة ومحاكاة الحالة العابرة الناتجة حدوث قصر دائرة كهربائي غير متناظر أحادي أو ثنائي بدون أو مع الربط الى الأرض
- نمذجة ومحاكاة الحالة العابرة الناتجة عند انقطاع طور أو طورين من أطوار الشبكة الكهربائية

7-1 دراسة تطبيقية لبعض الحالات العابرة في الشبكة الكهربائية في سورية

تم في هذا الجزء من البحث العلمي استخدام برامج حاسوبية متطورة مثل EMTP ومثل NETOMAC لتحليل الحالة العابرة التي تنتج عند حدوث قصر دائرة على أحد الخطوط الكهربائية في جزء من الشبكة الكهربائية السورية.

8-1 النتائج والمقترحات

وادرجت في نهاية هذا البحث العلمي مجموعة من المقترحات والملاحظات حول معالجة المشاكل التي ترافق ظهور التوترات الزائدة في الحالات العابرة والطرق العملية للحد من آثار هذه الحالات العابرة.

الفصل الثاني

الدراسة المرجعية

2 - الدراسة المرجعية:

2 - 1 المقدمة:

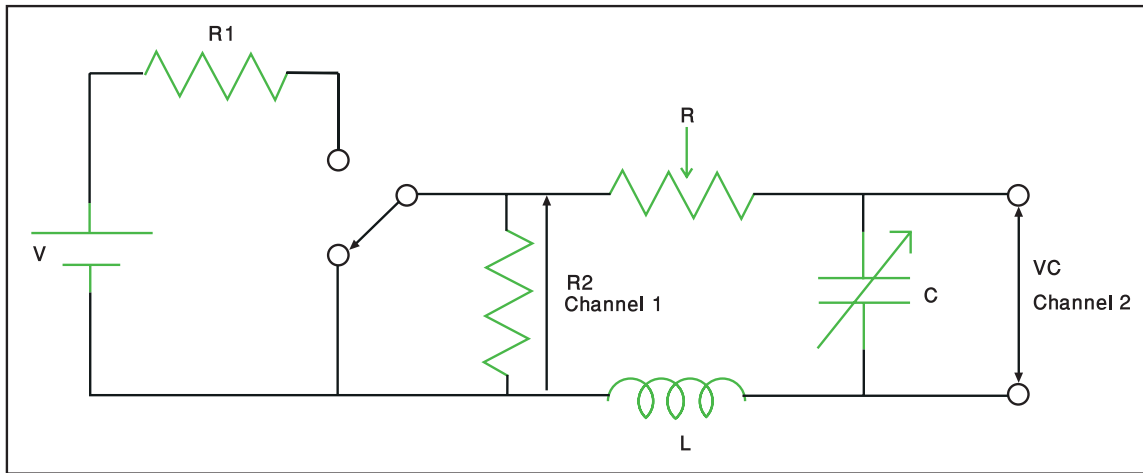
تم في هذا الفصل تصفح ومراجعة ودراسة عدد كبير من المراجع والابحاث العلمية المتعلقة بالظواهر العابرة الكهرومغناطيسية التي تظهر في الشبكات الكهربائية وتأثير هذه الظواهر على عمل الشبكات الكهربائية ودراسة الاجراءات الممكنة للتخفيف من آثار الظواهر العابرة.

2 - 2 الظواهر العابرة في الدارات الكهربائية:

تعتبر دراسة الدارات الكهربائية الأساسية في الحالات العابرة وفهم تصرف مختلف عناصر الدارة الكهربائية في هذه الحالات اساساً لدراسة تشغيل الشبكات الكهربائية في الحالة العابرة.

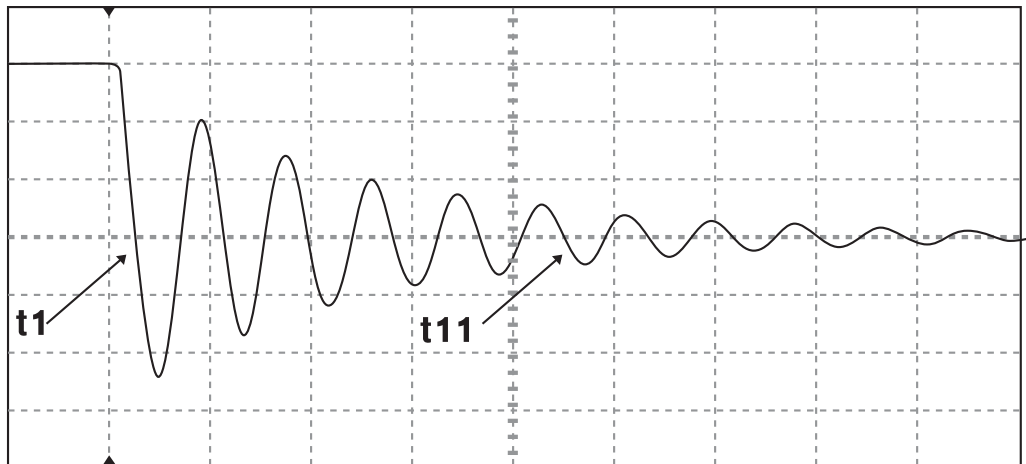
ويكاد لا يخلو أي مرجع أو كتاب تعليمي من فصل واحد على الأقل مخصص لدراسة الظواهر العابرة في الدارات الكهربائية. لقد تم في المراجع [1] و [2] و [3] و [4] و [5] وضع النموذج الرياضي والمعادلات التي تصف عمل وتشغيل الدارات الكهربائية في حالة التشغيل المستقرة وفي حالة التشغيل العابرة.

وقد وضع [6] P.T.DEBRVEC نموذجاً رياضياً ودائرة مكافئة لدراسة الحالة العابرة والاهتزازات في دائرة RLC كما هو مبين في الشكل رقم (2 - 1).



الشكل رقم (2 - 1) دائرة RLC تسلسلية لدراسة الحالة العابرة

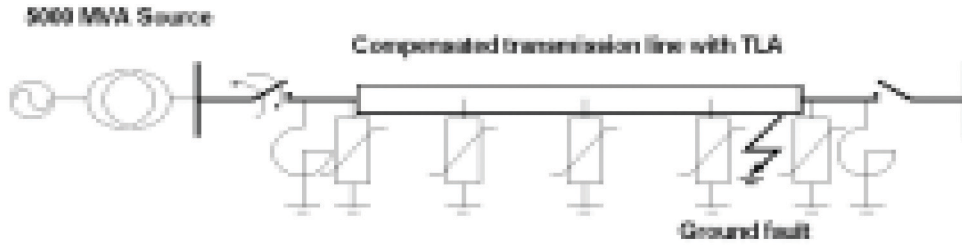
ويبين الشكل رقم (2 - 2) تغيرات التوتر على أقطاب المقاومة R2 عند تفريغ المكثف، وتدون هذه التغيرات (5 ms).



الشكل رقم (2 - 2) تغيرات التوتر على أقطاب المقاومة R2 عند تفريغ المكثف

2 - 3 الحالة العابرة الناتجة عن عمليات الوصل والفصل في الشبكات الكهربائية:

لقد بين Stenstrom and Mobedjina في المرجع [7] عام 1998 امكانية نمذجة ومحاكاة وتمثيل خط كهربائي في السويد بطول يمكن تغييره ما بين 100 و 300 كم وتوتر KV 420 باستخدام برنامج حاسوبي خاص EMTP كما هو مبين في الشكل رقم (2 - 3).

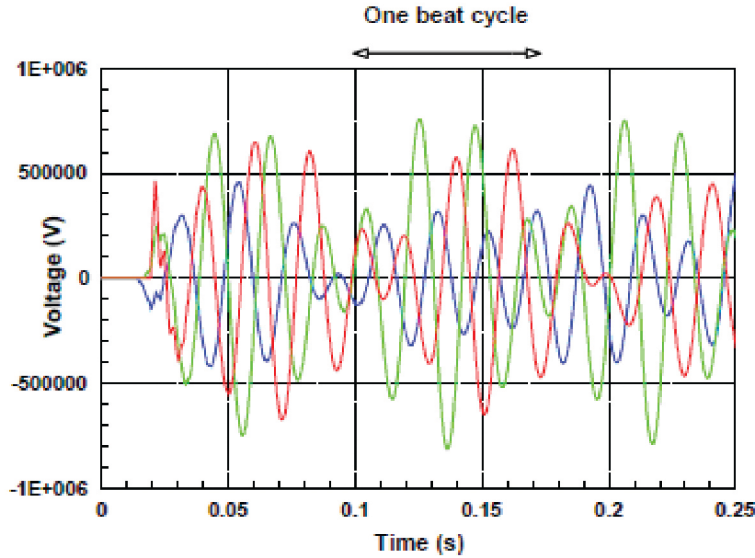


الشكل رقم (2 - 3) تمثيل الخط 420 ك ف

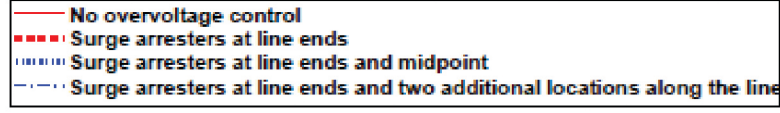
وقام بافتراض حدوث قصر دائرة أحادي مع الأرض وفصل القاطع الآلي ثم اعادة وصل القاطع عن طريق معيد الوصل الثلاثي حيث ظهر توتر زائد عابر كما هو مبين في الشكل

رقم (2 - 4). وقد بلغت قيمة التوتر الزائد العابر 800 ك ف.

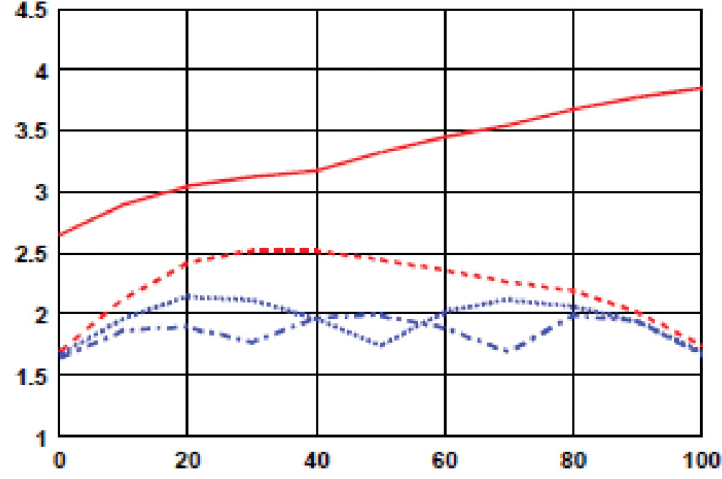
وأوضح المرجع [7] امكانية حماية الخط الكهربائي من التوتر الزائد العابر وكذلك حماية تجهيزات محطة التحويل في طرف الاستقبال باستخدام المفترقات ذات المقاومة المتغيرة (SURGE ARRESTORS (TLA TRANSMISION LINE ARRESTORS التي يمكن تركيبها على الأبراج الحاملة لأطور الخط اضافة الى ملفات التعويض العرضاني REACTORS كما بين المرجع [7] تغيرات قيمة التوتر الزائد العابر مع تغيير طول الخط الكهربائي الممثل والذي يمكن تغيير طوله من 100 كم الى 300 كم وحصل على النتائج المبينة في الشكل رقم (2 - 5)



الشكل رقم (2 - 4) التوتر الزائد العابر عند اعادة وصل خط KV 420



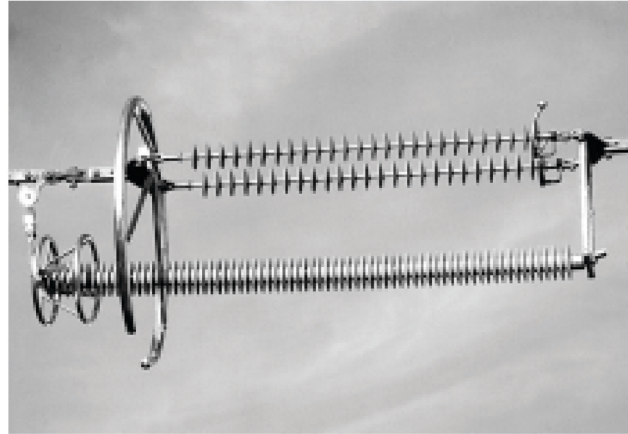
2% overvoltage values (p.u.)



Distance, percentage of line length

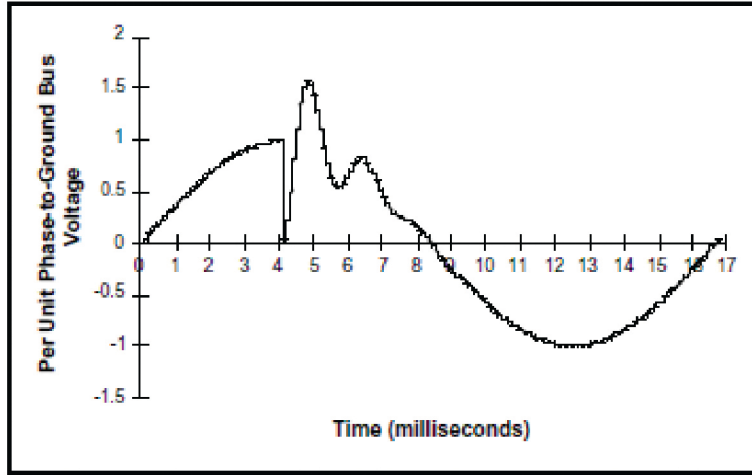
الشكل رقم (2 - 5) تغيرات قيمة التوتر الزائد العابر مع تغيير طول الخط الكهربائي

ويبين الشكل رقم (2 - 6) طريقة تركيب مفرغات الشحنات الكهربائية TLA تحت عوازل الخط الكهربائي KV 420 :



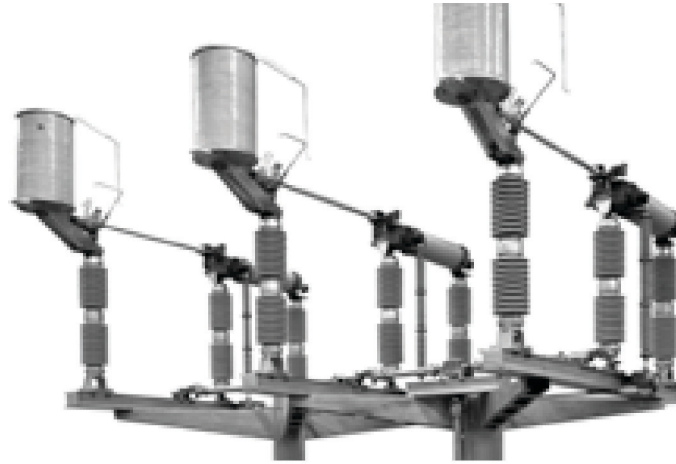
الشكل (2 - 6) طريقة تركيب مفرغات الشحنات الكهربائية TLA تحت عوازل الخط الكهربائي KV 420

وعالج Camm عام 1999 في المرجع [8] الحالة العابرة التي تنتج عند وصل لوحة مكثفات التعويض التفرعية الى الشبكة الكهربائية في مواقع مختلفة من الشبكة وتأثير ادخال ملف التعويض العرضاني على التفرع مع لوحة المكثفات. ويبين الشكل رقم (2 - 7) تغيرات التوتر عند وصل لوحة مكثفات التعويض الى الشبكة.



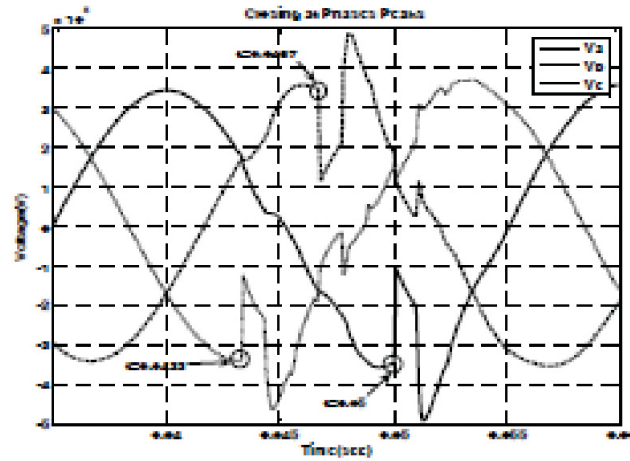
الشكل رقم (2 - 7) تغيرات التوتر عند وصل لوحة مكثفات التعويض الى الشبكة

أما الشكل رقم (2 - 8) فيبين طريقة تركيب ملفات التعويض العرضاني على أطوار خط كهربائي KV 132 في الولايات المتحدة الأمريكية والتي تستعمل كاجراء داعم لدور المقاومات الكهربائية التي تربط الى القواطع الآلية للحد من التوتر الزائد العابر الذي يمكن أن ينتج عند اجراء مناورات الصل والفصل للخطوط الكهربائية.



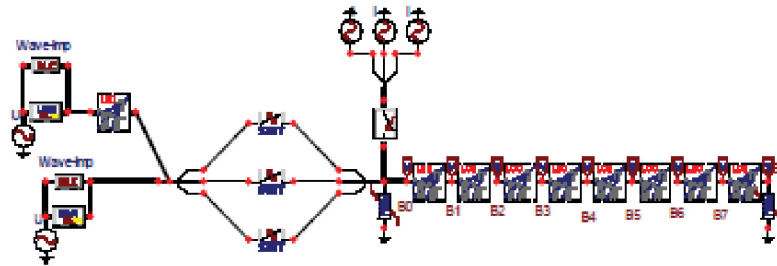
الشكل رقم (2 - 8) طريقة تركيب ملفات التعويض العرضاني على أطوار خط كهربائي KV 132

وقد قدم Sanaye-Pasand وآخرون في المرجع [9] حلاً للحد من آثار التوتر العابر الزائد الذي يظهر في شبكات التوتر العالي عند وصل وفصل أو عند إعادة الوصل تحت تأثير عمل معيدات الوصل الآلية للخطوط الكهربائية أو للوحات مكثفات التعويض العرضاني أو لملفات التعويض. وتعتمد هذه الحلول على استخدام حواكم للوصل المتزامن للقواطع الآلية استناداً للحظة وصل القاطع الآلي Switchsync Relays وذلك بعد تحديد زمن الاغلاق في أسوأ الظروف الممكنة والتي ينتج عنها توتر عابر أعظمي كما هو مبين في الشكل رقم (2 - 9).



الشكل رقم (2 - 9) متوسط زمن اغلاق القاطع الآلي الأطوار الثلاثة

وتمت عملية تمثيل ومحاكاة نظام كهربائي لاجراء الدراسة باستخدام البرنامج المتخصص EMTP كما هو مبين في الشكل رقم (2-10).



الشكل رقم (2 - 10) المخطط الصندوقي لتمثيل النظام الكهربائي باستخدام EMTP

وأدرجت احدى نتائج التمثيل والمحاكاة في الشكل رقم (2 - 11).

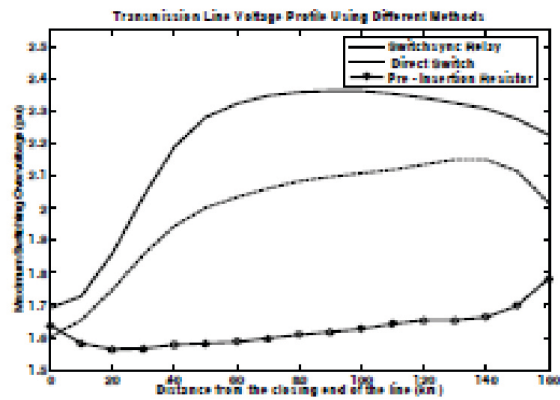


TABLE III
SIMULATED CASES

1	Without Pre-insertion Resistor
2	With Pre-insertion Resistor = 200 Ω
3	F236 Switchsync relay with SD = 0.5 ms

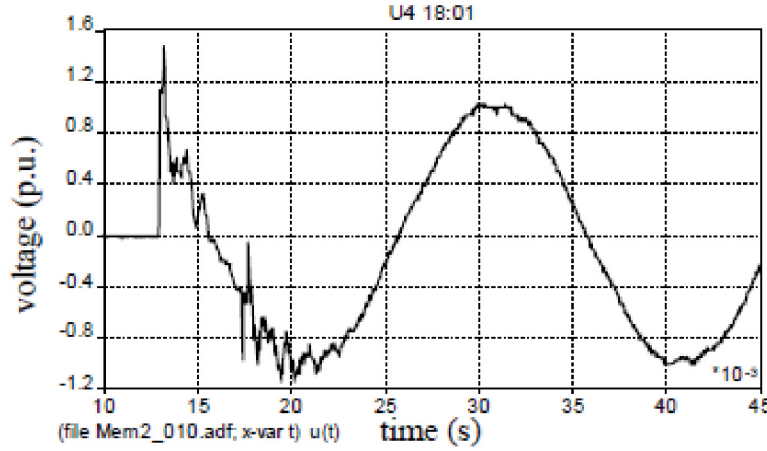
1- بدون اضافة مقاومة مع القاطع

2- مع اضافة مقاومة $\Omega 200$

3- حواكم للوصل المتزامن

الشكل رقم (2-11) تغيرات التوتر العابر الزائد لأجل حلول مختلفة للحد من الحالة العابرة

وبين Skuletic and Mijilovic في المرجع [10] عام 2003 نتائج الأبحاث والتجارب التي أجريت لأول مرة على شبكة التوتر KV 110 في جمهورية مونتينيغرو لتحديد وحساب قيمة التوتر العابر الزائدة الذي يمكن أن يظهر نتيجة لعمليات فصل ووصل الخط الكهربائية، وإمكانية معالجة هذه الظاهرة والتخفيف من أثارها على استثمار واستقرار الشبكة الكهربائية. وبين الشكل رقم (2-12) تغيرات التوتر العابر الزائد في الزمن.

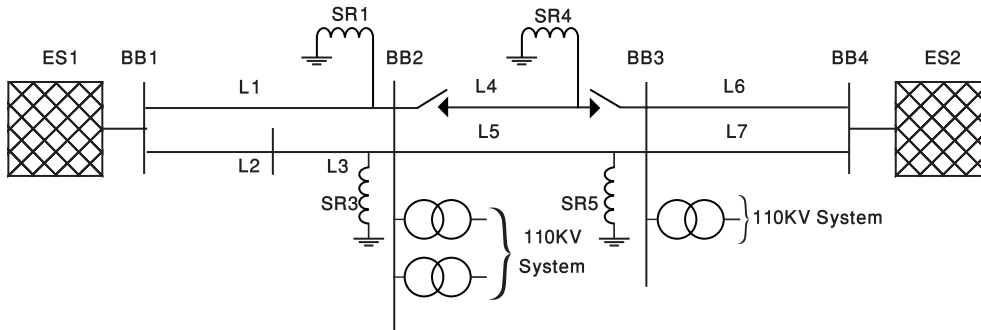


الشكل رقم (2-12) تغيرات قيمة التوتر الزائد العابر على

أحد خطوط الشبكة الكهربائية KV 110 في مونتينيغرو

وقد وصلت قيمة التوتر الزائد في الحالة العابرة عند اغلاق الخط 1.6 من قيمة التوتر النظامي.

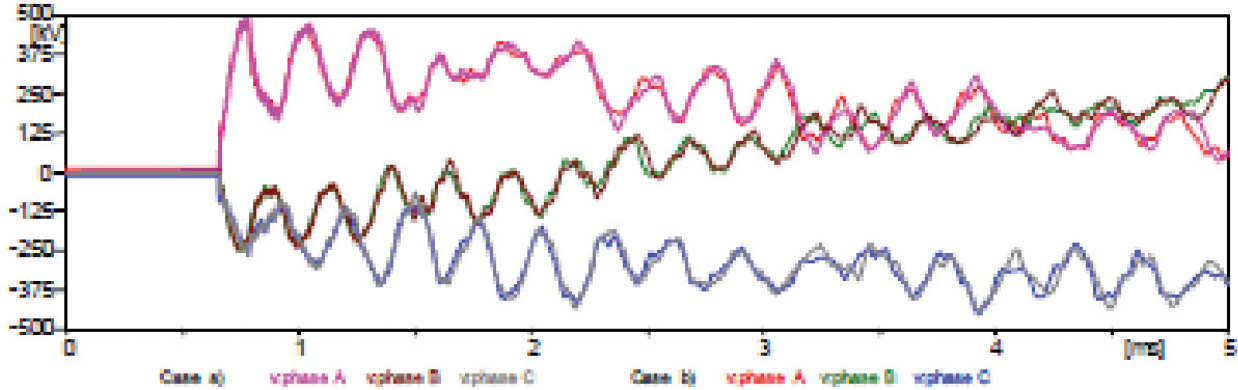
وقام Mustafa Kizilcay في المرجع [11] عام 2008 في بحثه حول التوترات العابرة الزائدة في شبكة كابلات KV 400 في إيرلندا بوضع نموذج تمثيل ومحاكاة لشبكة الكابلات هذه كما هو مبين في الشكل رقم (2-13)



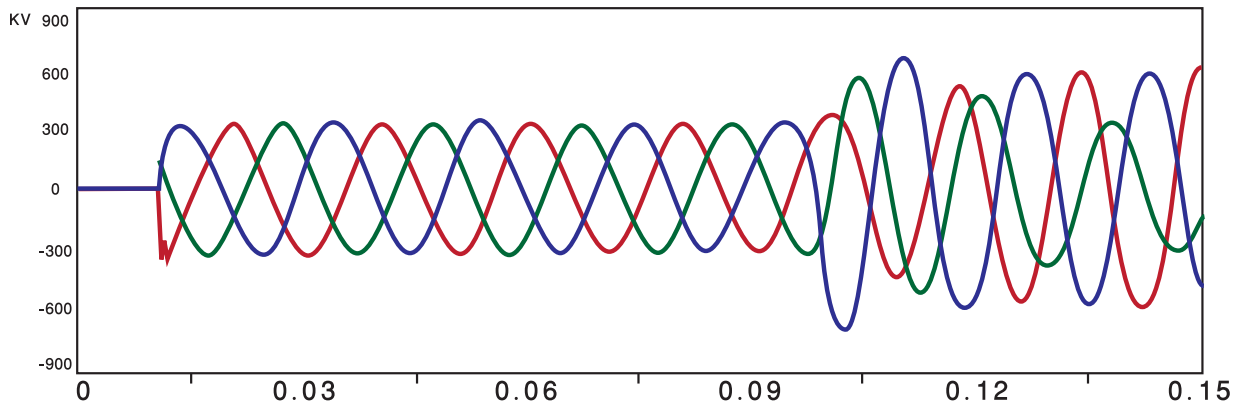
ES1:	$V = 406.5 \text{ kV}; Z_{sc} = (1.4 + j17.7) \Omega$
ES2:	$V = 403.7 \text{ kV}; Z_{sc} = (1.5 + j14.7) \Omega$
Line lengths:	L1: 8.1 + 2.6 km (cable + OHL); L2: 5.3 km; L3: 5.4 km; L4: 6.5 km; L5: 6.5 km; L6: 5.4 km; L7: 5.3 km
110-kV system at BB2:	5 x 200 MVA transformers; total load = 575 MW
110-kV system at BB3:	3 x 250 MVA transformers; total power injection: 162 MW
Shunt reactors:	SR1: 80 Mvar; SR3: 81 Mvar; SR4: 82 Mvar; SR5: 82 Mvar

الشكل رقم (2-13) نموذج نظام القدرة المستعمل والمحددات الكهربائية لعناصر النظام

وقد استخدم لتمثيل الحالات العابرة التي تنتج في النظام من جراء عمليات وصل وفصل خطوط الكابلات الكهربائية البرنامج الحاسوبي الخاص EMTP ، وقام بدراسة الحالة العابرة التي تنتج عند وصل الكابل الكهربائي الى شبكة التغذية ثم فصله بعد فترة زمنية محددة، ويبين الشكل رقم (2 - 14) تغيرات التوتر العابر الزائد الذي ينتج على أطوار الكابل الثلاثة، والشكل رقم (2 - 15) تغيرات التوتر العابر الزائد على أطوار الخط الكهربائي L4 عند ربط ملف التعويض العرضاني SR4 في نهاية الخط في محطة التحويل BB3

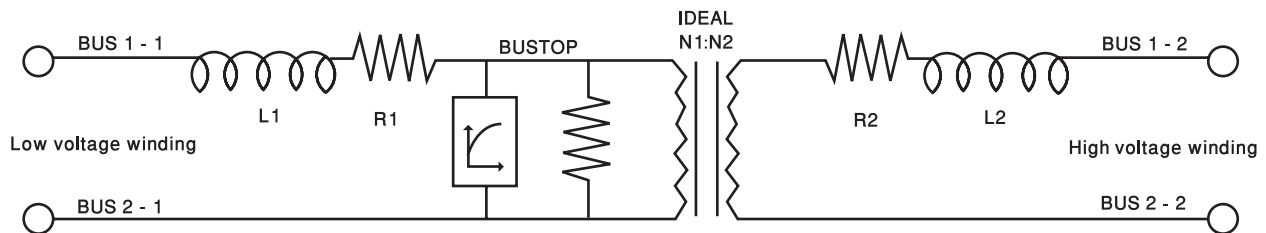


الشكل رقم (2 - 14) تغيرات التوتر العابر الزائد على أطوار الخط الكهربائي L4



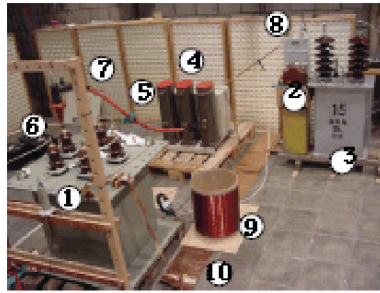
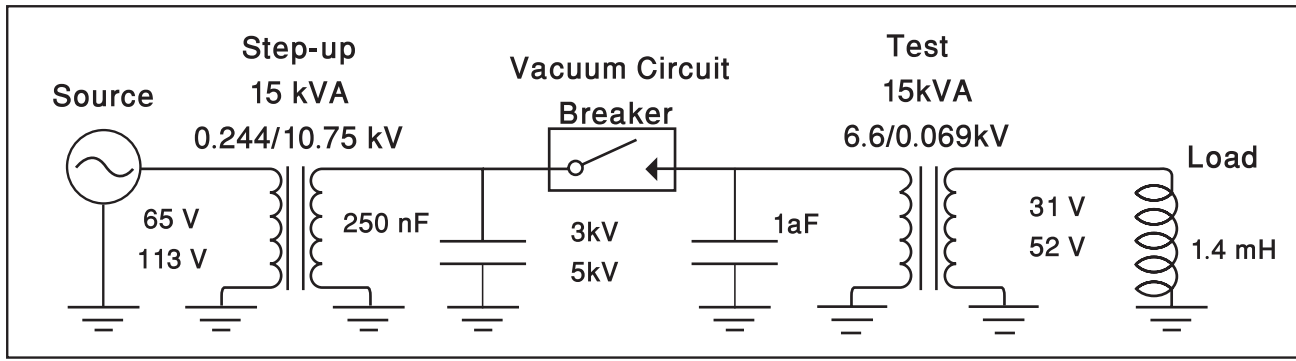
الشكل رقم (2 - 15) تغيرات التوتر العابر الزائد على أطوار الخط الكهربائي L4 عند ربط ملف التعويض العرضاني SR4 في نهاية الخط في محطة التحويل BB3

لقد عرض Lopez-Roldan وآخرون في المرجع رقم [12] دراسة حول التوترات العابرة الزائدة السريعة التي تنتج عن عمليات وصل وفصل محولات التوزيع عن طريق قواطع الفاكيوم في هولندا وبلجيكا، حيث تمت عملية تمثيل ونمذجة محولات التوزيع وقواطع الفاكيوم باستخدام البرنامج الحاسوبي المتخصص EMTP بالإضافة الى التجارب والقياسات العملية في مراكز ومحطات التحويل. وكان الغرض من هذا البحث هو المساهمة في فهم الظواهر العابرة التي تنتج عند وصل وفصل محولات التوزيع. وقد تمت مقارنة النتائج الرقمية التي نتجت عن التمثيل والنمذجة مع نتائج القياسات والختبارات العملية. يبين الشكل رقم (2 - 16) الدارة الكهربائية المكافئة للنظام المدروس.



الشكل رقم (2 - 16) الدارة الكهربائية المكافئة لنظام التوزيع المفترض

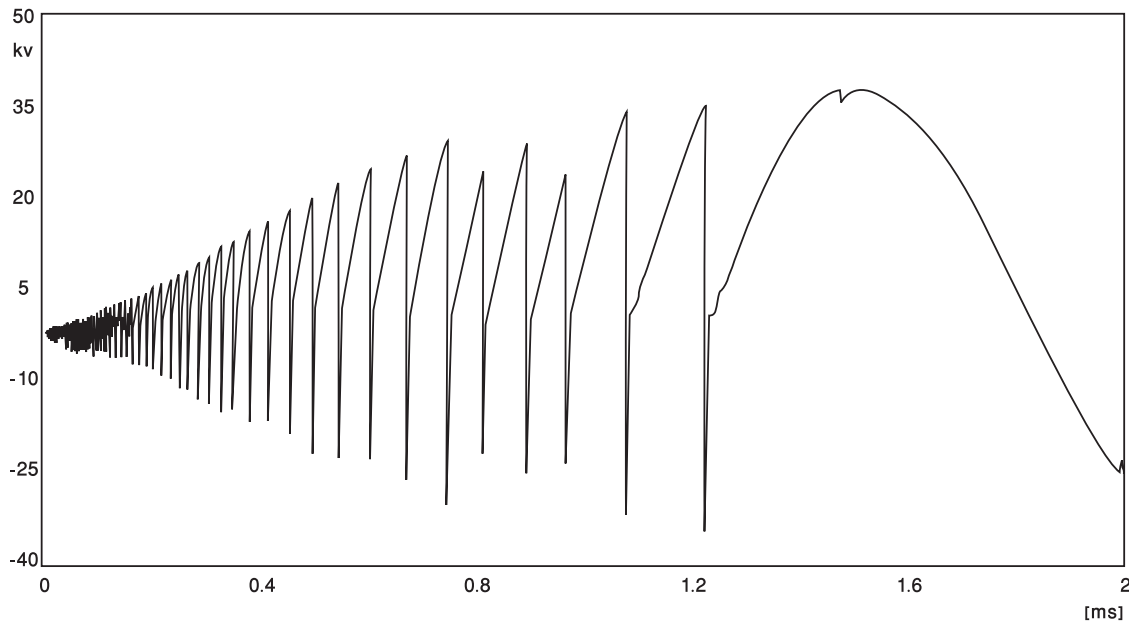
ويبين الشكل رقم (2 - 17) الدارة الكهربائية العملية التي أجريت عليها القياسات والاختبارات.



- | | |
|------------------------|---------------------|
| 1. Step-up transformer | 6. HF current probe |
| 2. AC VT | 7. Test transformer |
| 3. Shunt capacitor | 8. HF voltage probe |
| 4. VCB | 9. Inductive load |
| 5. Cable | 10. HF earthing |

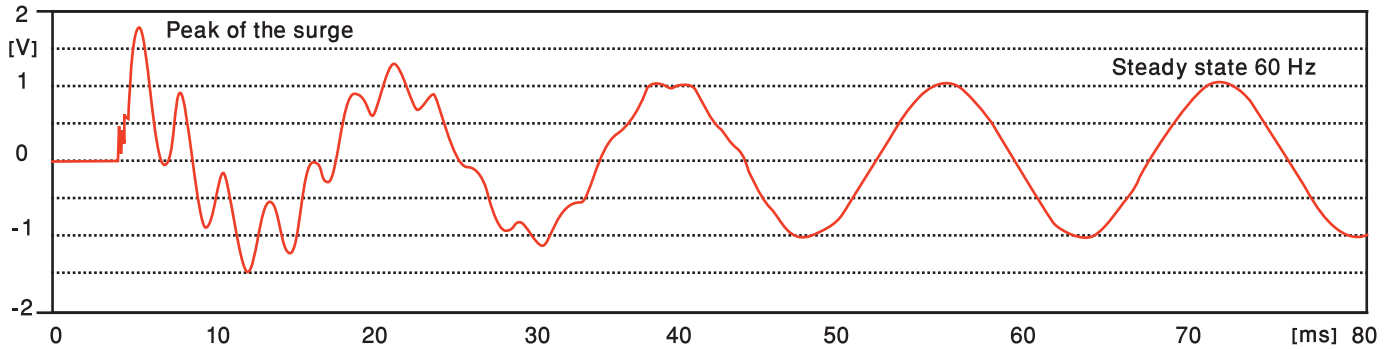
الشكل رقم (2 - 17) الدارة الكهربائية العملية التي أجريت عليها القياسات والاختبارات.

يوضح الشكل رقم (2 - 18) تغيرات التوتر على مرابط ملف التوتر العالي للمحولة التي جرى عليها الاختبار عند فصل قاطع الفايكوم في اللحظة التي يمر بها التيار تقريباً في قيمته الأعظمية، حيث كانت قيمة توتر الطور الواحد 5 KV وكانت قيمة التوتر العابر الزائد 35 KV ، وظهرت عدة حالات من إعادة قذح القوس الكهربائي في القاطع.



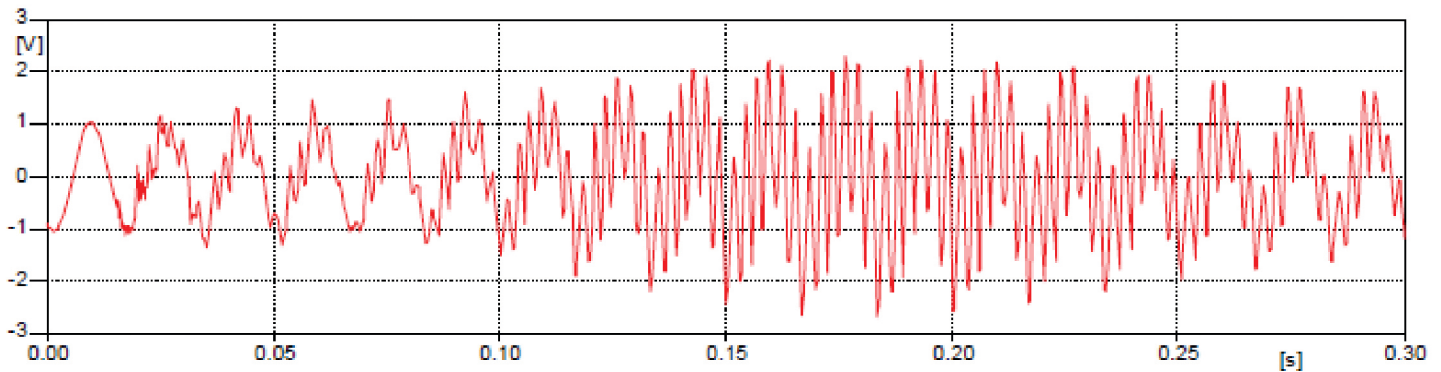
الشكل رقم (2 - 18) تغيرات التوتر على مرابط ملف التوتر العالي للمحولة التي جرى عليها الاختبار

وعالج Durbak في المرجع رقم [14] عام 2006، الحالة العابرة المؤقتة التي تلي عملية وصل المحولات الكهربائية الى الشبكة، حيث يمكن أن تظهر توترات عابرة زائدة قد تؤدي الى اتلاف المحولة الكهربائية اذا لم تتخذ الاجراءات الوقائية اللازمة للحد من هذه التوترات الزائدة. وقد بين المرجع أن التوترات العابرة التي تنتج عن عمليات وصل أو فصل القواطع الآلية يكون لها تردد يتراوح بين 10 KHz – 100 KHz وهي تتخامد سريعاً وفي فترة لا تتجاوز 5 أدوار، كما هو مبين في الشكل رقم (2 - 19).



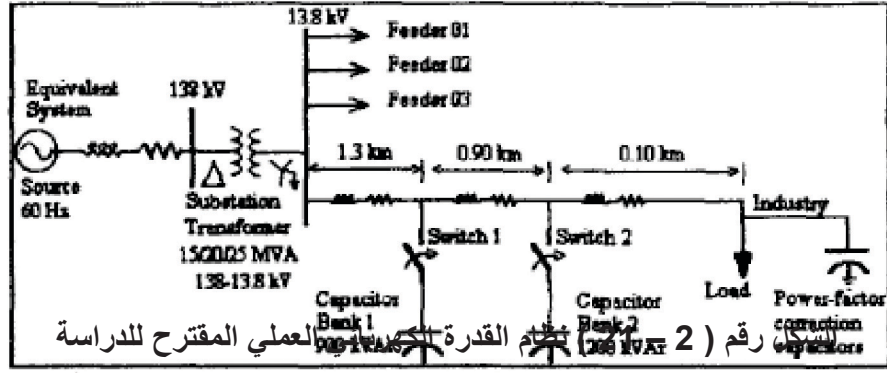
الشكل رقم (2 - 19) تغيرات التوتر العابر الزائد الذي ينتج عن عمليات الوصل والفصل باستخدام المحاكاة في بيئة البرنامج EMTP

أما التوترات العابرة الزائدة التي تنتج عند إعادة وصل المحولات الكهربائية الى الشبكة فانها يمكن أن تتجاوز قيمة التوتر النظامي للمحولة لدة أضعاف ويمكن أن تدوم لعدة ثوانٍ. وتنتج هذه التوترات العابرة عند وصل محولة ذات استطاعة كبيرة الى شبكة ذات استطاعة صغيرة، ويبين الشكل رقم (2 - 20) التوتر العابر الزائد الذي ينتج عند إعادة ربط محولة ذات استطاعة كبيرة الى الشبكة الكهربائية في ظروف حدوث تعميم شامل، باستخدام بيئة البرنامج EMTP .

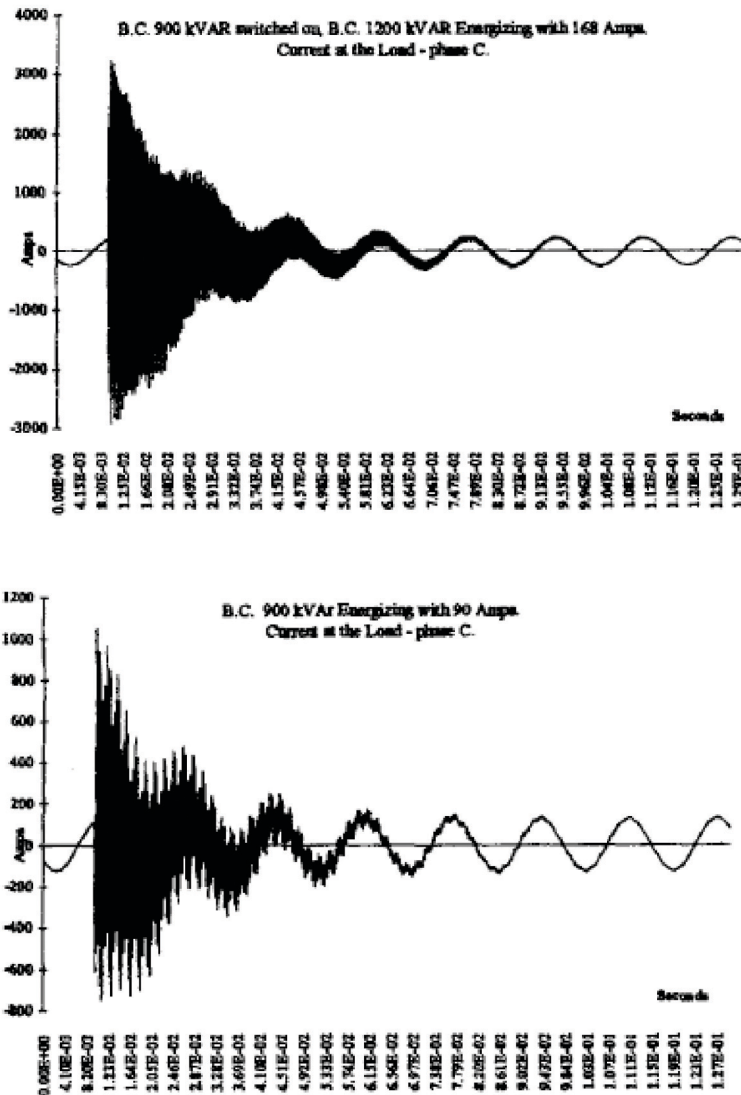


الشكل رقم (2 - 20) التوتر العابر الزائد الذي ينتج عند إعادة ربط محولة ذات استطاعة كبيرة الى الشبكة الكهربائية باستخدام المحاكاة في بيئة البرنامج EMTP

وقدم Coury وآخرون من جامعة سان باولو في البرازيل في المرجع [15] عام 1998 دراسة تحليلية للظواهر العابرة التي تنتج عند وصل وفصل لوحات مكثفات التعويض في شبكة توزيع كهربائية عملية. حيث تمت دراسة الحالات العابرة التي تنتج في شبكات التوزيع الكهربائية عند وصل لوحات مكثفات التعويض العرضاني وذلك باستخدام البرنامج الحاسوبي ATP (Alternative Transient Program) لإنشاء النموذج التمثيلي ومحاكاة نظام القدرة الكهربائي الذي تتم دراسته والمبين في الشكل رقم (2 - 21).



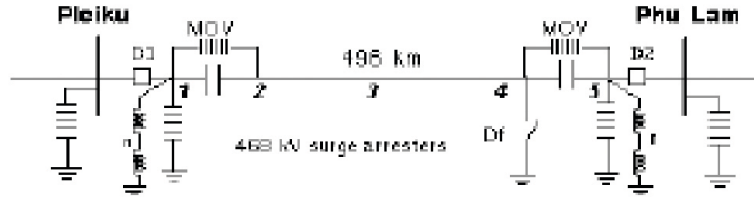
وبين الشكل رقم (2 - 22) تغيرات التيار الكهربائي في الحالة العابرة التي تنتج عند وصل لوحة مكثفات التعويض العرضاني الى الشبكة، حيث تم اعتبار حالتين: الأولى عند وصل لوحة مكثفات باستطاعة 900 KVAR وتوتر 13.8 KV ، والثانية عند وصل لوحة مكثفات باستطاعة 1200 KVAR وتوتر 13.8 KV. وتم عرض تغيرات التيارات العابرة في الشكل رقم (2 - 22)، حيث يمكن ملاحظة ظهور ترددات عالية في موجة التيار تتخادم مع عدة أدوار.



الشكل رقم (2-22) تغيرات التيارات العابرة عند وصل لوحة مكثفات تعويض باستطاعة 900 KVAR و 1200 KVAR

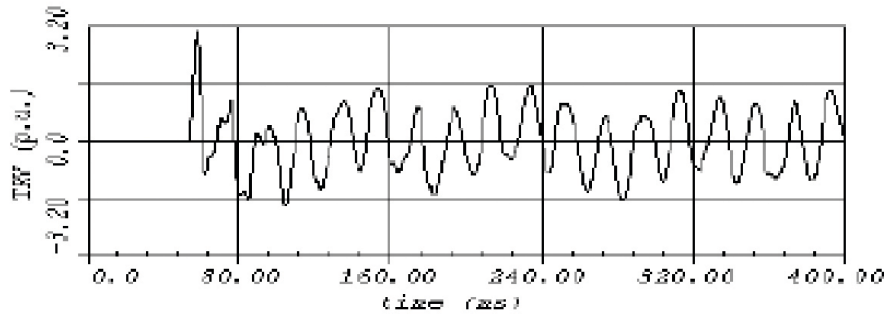
2 - 4 الحالة العابرة الناتجة عن عمليات فصل الأعطال غير المتناظرة

عالج Bui-Van وآخرون في المرجع [15] عام 2003 في مسألة تمثيل ومحاكاة احالة العابر والتوترات الزائدة التي يمكن أن تنتج على الخط الكهربائي بطول 495 كم وتوتر 500 KV والذي يربط بين فييتنام وتايلاندا باستخدام البرنامج الحاسوبي المتخصص EMTP وذلك عند فصل الأعطال غير المتناظرة التي يمكن أن تنتج على الخط الكهربائي، ويبين الشكل رقم (2 - 23) الدارة الكهربائية المكافئة للشبكة الكهربائية العملية المعتبرة في الدراسة.



الشكل رقم (2 - 23) الدارة المكافئة للشبكة الكهربائية المدروسة في فييتنام

ويبين الشكل رقم (2 - 24) تغيرات التوتر العابر الذي ينتج عند حدوث عطل ثلاثي مع الأرض قرب القاطع الآلي في النقطة 5.

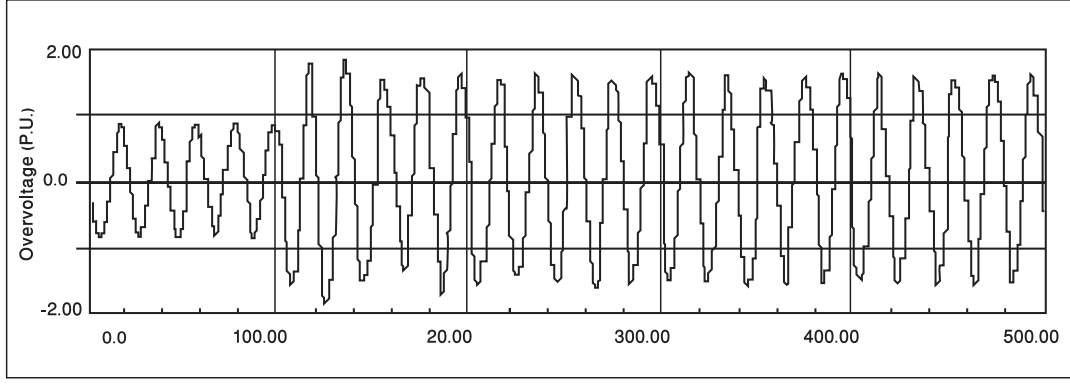


الشكل رقم (2 - 24) تغيرات التوتر العابر الذي ينتج عند حدوث عطل ثلاثي مع الأرض قرب القاطع الآلي في النقطة 5
يلاحظ أن قيمة التوتر الزائد يمكن أن تصل إلى 3.1 من قيمة التوتر النظامي.

2 - 5 الحالة العابرة الناتجة عن ظاهرة انقطاع أحد الأطوار

عالج Bui-Van وآخرون في المرجع [15] عام 2003 في مسألة تمثيل ومحاكاة الحالة العابرة والتوترات الزائدة التي يمكن أن تنتج على الخط الكهربائي وهو بطول 495 كم وتوتر 500 KV والذي يربط بين فييتنام وتايلاندا، باستخدام البرنامج الحاسوبي المتخصص EMTP وذلك عند انقطاع أحد أطوار الخط الكهربائي والتي يمكن أن تنتج أيضاً في حالة اغلاق طورين من أطوار القاطع الآلي للخط وبقاء الطور الثالث مفتوحاً، ويبين الشكل

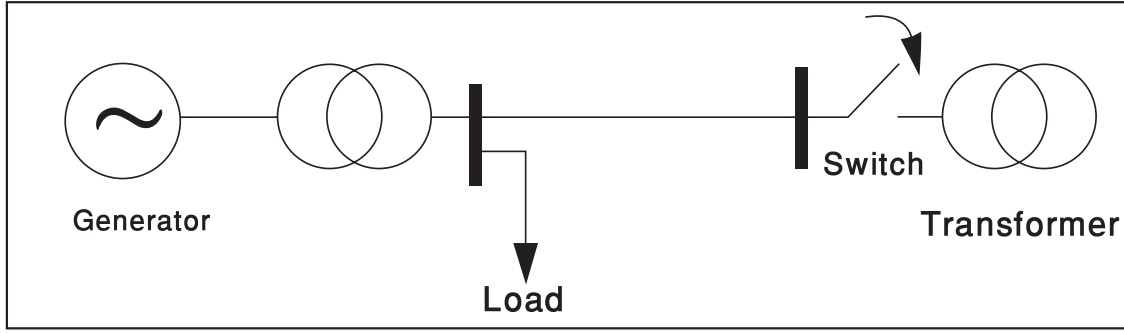
رقم (2-23) الدارة الكهربائية المكافئة للشبكة الكهربائية العملية المعتبرة في الدراسة، ويبين الشكل رقم (2-25) تغيرات التوتر العابر الذي ينتج عند فتح طور واحد من أطوار القاطع الآلي للخط وبقاء الطورين الآخرين مغلقين.



الشكل رقم (2 - 25) تغيرات التوتر العابر عند فتح طور واحد من أطوار القاطع الآلي

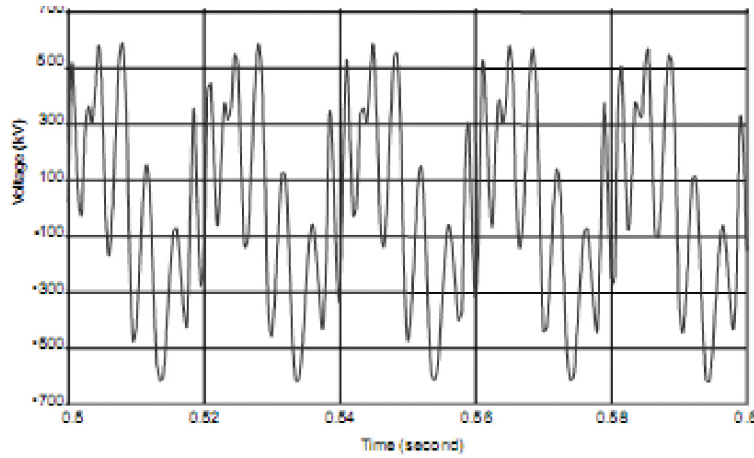
2 - 6 الحالة العابرة الناتجة عن ظاهرة الطنين الكهرطيسي

قام Cheng في المرجع [16] بدراسة الحالة العابرة التي تنتج عن ظاهرة الطنين الكهرطيسي التي ترافق وضع محولة استطاعة تحت التوتر وهي بدون حمل واستخدام المحاكاة والتمثيل باستخدام البرنامج الحاسوبي المتخصص EMTP ثم مقارنة النتائج مع القياسات العملية التي تمت عند حالة الطنين في موقع تركيب المحولة في محطة التحويل عند ظهور حالة الطنين، وبين الشكل رقم (2 - 26) الدارة المكافئة التي تمت محاكاتها.

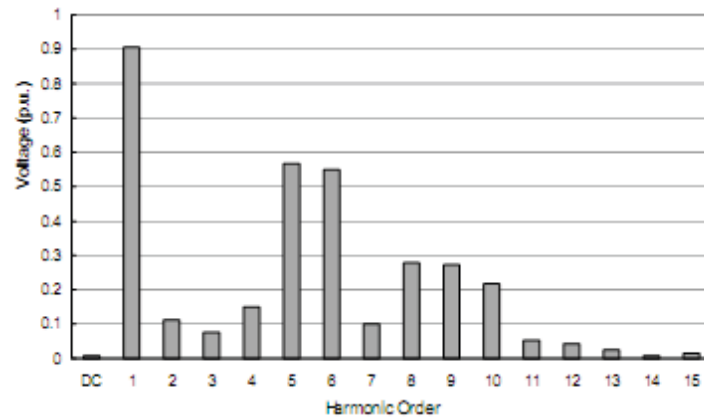


الشكل (2 - 25) الدارة الكهربائية المكافئة التي تمت محاكاتها باستخدام EMTP

وبين الشكل (2 - 26) تغيرات التوتر على مخارج محولة الاستطاعة باستخدام برنامج المحاكاة. أما الشكل رقم (2 - 27) فيبين تحليل التوافقيات المتضمنة في موجة التوتر الزائد العابر الناتج عن الطنين

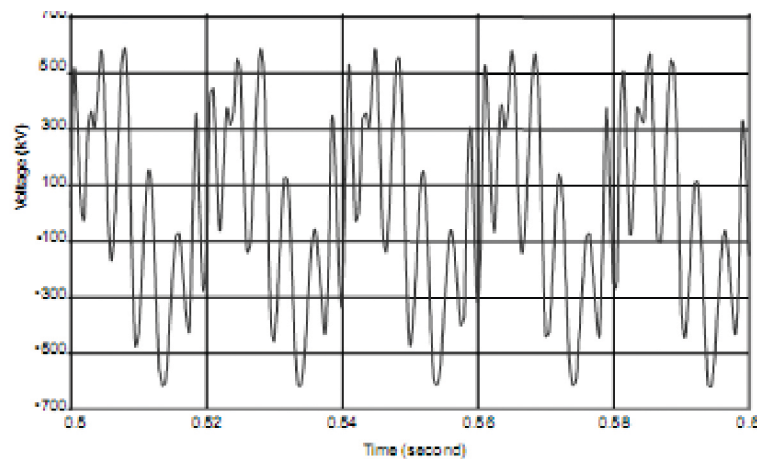


الشكل رقم (2 - 26) تغيرات التوتر الزائد في حالة الطنين على مخارج محولة الاستطاعة باستخدام برنامج المحاكاة



الشكل رقم (2 - 27) التوافقيات المتضمنة في موجة التوتر العابر الناتج عن الطنين

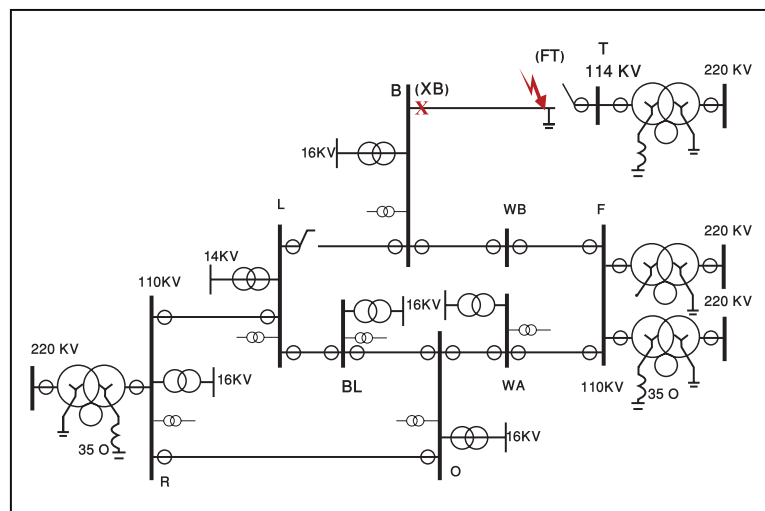
ويبين الشكل رقم (2 - 28) تغيرات التوتر الزائد في حالة الطنين على مخارج محولة الاستطاعة باستخدام القياسات العملية في الموقع.



الشكل رقم (2 - 28) تغيرات التوتر الزائد في حالة الطنين باستخدام القياسات العملية

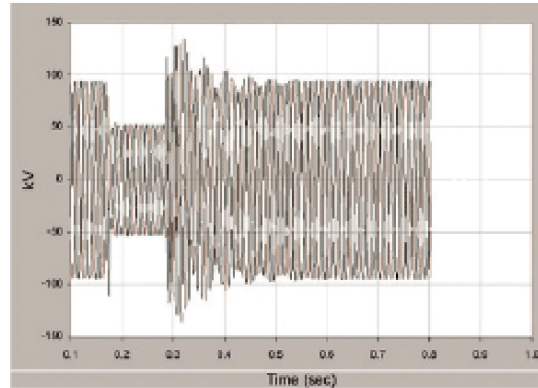
يمكن الملاحظة أن نتائج المحاكاة تتطابق تقريباً مع نتائج القياسات العملية.

قدم Hammad في المرجع [17] بحثاً علمياً تناول توليد التوترات العابرة الزائدة التي تنتج تحت تأثير ظاهرة الطنين الكهرطيسي التي رافقت حدوث قصر دائرة ثلاثي متناظر في أحد أجزاء الشبكة الكهربائية في سويسرا كما هو مبين في الشكل رقم (2 - 29):

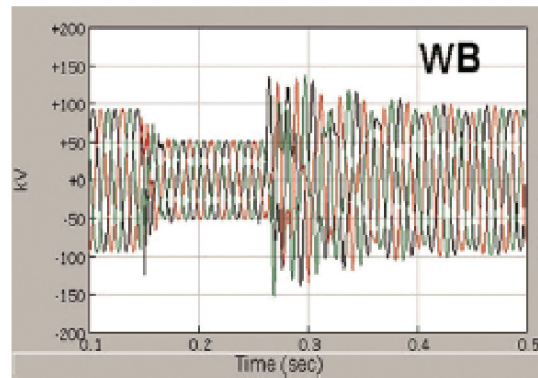


الشكل رقم (2 - 28) الدارة المكافئة لجزء من شبكة التوتر العالي في سويسرا

وتم استخدام البرنامج الحاسوبي المتخصص PSCAD/EMTDC لمحاكاة وتمثيل الشبكة المدروسة وتمت دراسة الحالة العابرة التي تنتج عند حدوث قصر دائرة في النقطة FT المبينة في الشكل، وهذا قد حدث فعلاً في العام 2009، ويبين الشكل رقم (2 - 29) تغيرات التوتر على الأطوار الثلاثة في محطة التحويل WA بعد العطل وتحت تأثير ظاهرة الطنين الكهريطيسي. ويبين الشكل رقم (2 - 30) تغيرات التوتر على الأطوار الثلاثة في محطة التحويل WB بعد العطل وتحت تأثير ظاهرة الطنين الكهريطيسي.

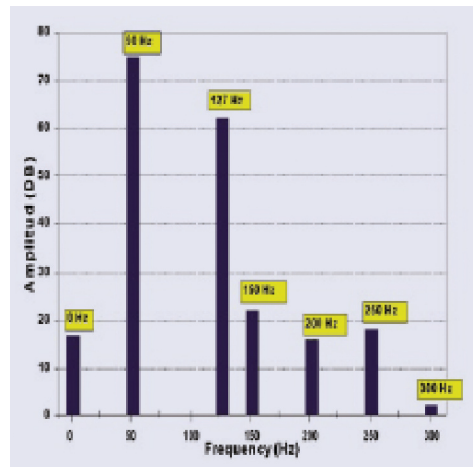


الشكل رقم (2 - 29) تغيرات التوتر على الأطوار الثلاثة في محطة التحويل WA بعد العطل وتحت تأثير ظاهرة الطنين الكهريطيسي.



الشكل رقم (2 - 30) تغيرات التوتر على الأطوار الثلاثة في محطة التحويل WB بعد العطل وتحت تأثير ظاهرة الطنين الكهريطيسي.

ويبين الشكل رقم (2 - 31) فيبين تحليل التوافقيات المتضمنة في موجة التوتر الزائد العابر الناتج عن الطنين، حيث يظهر بالإضافة الى التوافقية الأولى 50 Hz والمركبة المستمرة في موجة التوتر 0 Hz ، الدور الواضح للتردد 127 Hz و التردد 150 Hz .



الشكل رقم (2 - 31) فيبين تحليل التوافقيات المتضمنة في موجة التوتر الزائد العابر الناتج عن الطنين

الفصل الثالث

الشبكات الكهربائية في الحالات العابرة

الشبكات الكهربائية في الحالات العابرة

3 - 1 مقدمة:

تمثل الحالات العابرة في الشبكات الكهربائية حالات تشغيل غير نظامية يمكن أن تؤدي إلى ظهور توترات زائدة عالية جداً أو إلى توليد تيارات كبيرة قد تسبب إتلاف وتعطيل بعض عناصر الشبكة الكهربائية مثل المولدات والمحولات والخطوط الكهربائية. وتفرض زيادة الطلب المستمر على الطاقة الكهربائية إضافة محطات جديدة لتوليد الطاقة الكهربائية مما يدفع لرفع سويات التوتر في شبكات النقل إلى قيم عالية جداً وقد وصل توتر التشغيل النظامي في بعض الشبكات إلى 900KV بالتيار المتناوب و 1000KV تيار المستمر. تقسم التوترات العابرة في شبكات التوتر العالي إلى:

- التوترات الزائدة العابرة ذات المنشأ الخارجي: وتنتج هذه التوترات عن العوامل الجوية كالبرق والصواعق.
 - التوترات الزائدة العابرة ذات المنشأ الداخلي: وتنتج هذه التوترات ضمن الشبكات الكهربائية تحت تأثير عن عوامل داخلية تتعلق بتبادل الطاقة الكهربائية المخزنة في العناصر الكهربائية المكافئة للشبكات عند تنفيذ عمليات الوصل والفصل أو عند حدوث الأعطال المفاجئة أو عند تحقق شروط الطنين أو عند انقطاع أحد الأطوار.
- تعمل الأنظمة الفيزيائية بشكل عام والشبكات الكهربائية بشكل خاص في حالات تشغيل نظامية ومستقرة دائماً. وعندما تنتقل هذه الأنظمة من حالة تشغيل مستقرة إلى حالة تشغيل مستقرة أخرى فإنها تمر في مرحلة عابرة تدوم لفترة زمنية متناهية في الصغر قد لا تتجاوز أجزاء من الثانية. أي يمكن تعريف الحالة العابرة على أنها حالة انتقالية بين حالتين مستقرتين متعاقبتين في الشبكة الكهربائية. كما هو الحال عند ربط حمل كهربائي شبكة أو فصله، أو عند تغيير الحمل بشكل فجائي أو عند فصل التوتر عن أحد أجزاء الشبكة. وتنتج في الحالات العابرة توترات كهربائية زائدة تنتقل على شكل موجة مسافرة عبر نواقل الخطوط الهوائية والكابلات وملفات المحولات والمولدات.

3 - 2 الحالات العابرة ذات المنشأ الداخلي في الشبكات الكهربائية:

تعتبر الحالات العابرة التي تظهر في شبكات نقل القدرة الكهربائية حالات عمل غير طبيعية تؤدي إلى مشاكل خطيرة ينبغي معالجتها في الوقت المناسب حتى لا تؤثر على أداء الشبكة الكهربائية بشكل سلبي كحدوث أضرار بتلك المنشآت أو فقدان الشبكة لاستقرارها. يتم تصنيف الحالة العابرة تبعاً لسبب حدوثها إلى:

- 1- الحالة العابرة الناتجة عن إغلاق القاطع الكهربائي لخط عالي التوتر وهو بدون حمل.
 - 2- الحالة العابرة الناتجة عن فصل القاطع الكهربائي لخط عالي التوتر وهو بدون حمل.
 - 3- الحالة العابرة الناتجة عن ظاهرة الطنين الكهربائي.
 - 4- الحالة العابرة الناتجة عن انقطاع طور أو طورين من أطوار خطوط التوتر العالي الكهربائي.
 - 5- الحالات العابرة الناتجة عن الأعطال المختلفة:
- عطل طور مع الأرض.
 - عطل طورين مع الأرض أو بدون الأرض.
 - عطل ثلاثة أطوار مع الأرض أو بدون الأرض.

3 - 3 الحالات العابرة في الدارات الكهربائية:

يتم عند دراسة حالات تشغيل الشبكات الكهربائية باستعمال الدارات الكهربائية المكافئة للعناصر الكهربائية المكونة لهذه الشبكة، حيث تستبدل الشبكة الكهربائية بدارة كهربائية مكافئة. ويتم اعتماد عدة فرضيات مساعدة لحل المسائل المختلفة المتعلقة بحالات التشغيل النظامية وبحالات التشغيل العابرة، ومن أهم هذه الفرضيات ما يلي:

- تعتبر كافة العناصر المكونة للشبكة من مولدات ومحولات وخطوط كهربائية عناصر متناظرة ومتجانسة نسبة للأطوار الثلاثة، الأمر الذي يسمح بدراسة أي مسألة متعلقة بالشبكة وكأنها شبكة ذات طور واحد، أي تتم الدراسات استناداً للشبكة وحيدة الخط المكافئة.
- تعتبر فترة الحالة العابرة صغيرة جداً بحيث ينتج عن المقاومات الكهربائية لمختلف عناصر الشبكة الكهربائية أثر حراري يمكن إهماله، أي أن الدراسات تتم مع إهمال المقاومات المختلفة لعناصر الشبكة الكهربائية.
- يمكن إرجاع أي شبكة كهربائية مهما كانت من التعقيد إلى دارة كهربائية أساسية بسيطة تحتوي على مقاومة وملف ومكثف مربوطة مع بعضها على التسلسل أو على التفرع.

ولفهم الحالات العابرة في الشبكات الكهربائية بشكل واضح لابد من دراسة الحالات العابرة التي يمكن أن تظهر في الدارة الكهربائية الأساسية البسيطة التي تحتوي على مقاومة وملف ومكثف مربوطة على التسلسل RLC SERIES عندما يطبق عليها توتر كهربائي مستمر أو توتر كهربائي متناوب.

3 - 4 الحالة العابرة في دارة التيار المستمر: [6] و [5] و [4] و [1]

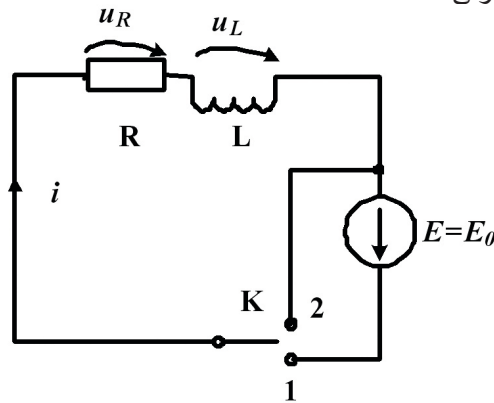
تتم دراسة الحالة العابرة في دارة التيار المستمر انطلاقاً من الدارات البسيطة أولاً عندما يطبق عليها توتر كهربائي مستمر، حيث يتم أخذ الدارات التالية بعين الاعتبار.

3 - 4 - 1 الحالة العابرة عند تطبيق توتر كهربائي مستمر على وشيعة كهربائية:

إذا تم إغلاق القاطع الكهربائي K في الدارة المبينة في الشكل رقم (1-3) فإنه سيمر في هذه الدارة تيار كهربائي مستمر، وتكون معادلة تشغيل الدارة كما يلي:

$$(1-3) \quad \begin{cases} E = U_R + U_L \\ E = R.i + L \frac{di}{dt} \end{cases}$$

يمكن الملاحظة أن المعادلة (1-3) هي معادلة تفاضلية من الدرجة الأولى خطية غير متجانسة وذات أمثال ثابتة. إن حل هذه المعادلة يعطي تياراً ذي مركبتين، تمثل المركبة الأولى



الشكل رقم (1-3) دارة وشيعة كهربائية حقيقية

حل المعادلة العامة المتجانسة أو المركبة الحرة للتيار، أي تمثل حل المعادلة بافتراض أن الطرف الأيسر من المعادلة E معدوم. وتمثل المركبة الثانية i_p حل المعادلة غير المتجانسة أو المركبة القسرية للتيار، بحيث يمكن الكتابة:

$$(2-3) \quad i(t) = ie(t) + ip(t)$$

إن الحل العام لهذه المعادلة هو التالي:

$$(3-3) \quad i(t) = Ae^{-\frac{R}{L}t} + \frac{E}{R}$$

حيث:

$$(4-3) \quad \begin{cases} ie(t) = Ae^{-\frac{R}{L}t} & \text{المركبة الحرة} \\ ip(t) = \frac{E}{R} & \text{المركبة القسرية} \end{cases}$$

ولكي نحدد ثابتة التكامل A فإننا نعتمد على الشروط الأولية للمسألة حيث أنه في اللحظة الزمنية $t = 0$ تكون قيمة التيار $i = 0$ ومنه ينتج:

$$(5 - 3) \quad A = -\frac{E}{R}$$

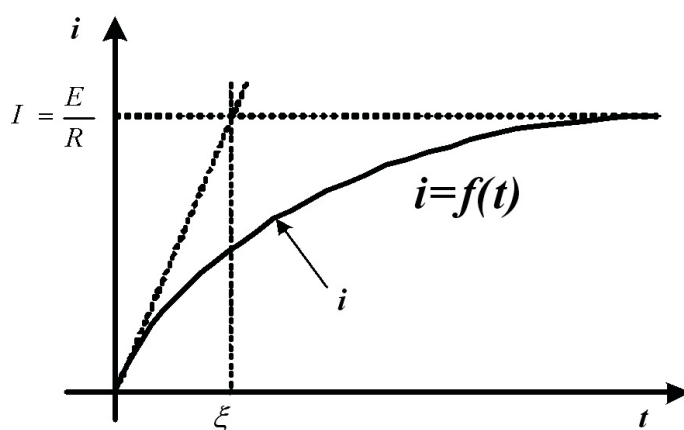
وبذلك سنتنتج تغيرات التيار الكهربائي في الملف كتابع للزمن على الشكل التالي:

$$(6 - 3) \quad i(t) = \frac{E}{R}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

حيث:

$$\frac{L}{R} \text{ القيمة الأعظمية للتيار } I = \frac{E}{R} \text{ والثابتة الزمنية للدائرة}$$

وتمثل الثابتة الزمنية للدائرة سرعة تغير التيار في الدائرة، وتمثل أيضاً الفترة الزمنية اللازمة لكي تصبح قيمة التيار في الدائرة مساوية لقيمة التيار في حالة التشغيل النظامية كما هو مبين في الشكل رقم (3 - 2).



الشكل رقم (3 - 2).

وبين الجدول رقم (3 - 1) قيمة التيار في الدائرة لأجل قيم مختلفة للزمن مساوية لمضاعفات الثابتة الزمنية :
الجدول رقم (3 - 1)

t	1 τ	2 τ	3 τ	4 τ	5 τ	6 τ
$\frac{i}{I} \% 100$	63.2	86.5	95	98.2	99.33	99.75

ومن هذا الجدول يمكن اعتبار الحالة العابرة منتهية بعد مرور زمن يساوي (5 τ)

2-4-3 الحالة العابرة عند قصر دائرة ملف كهربائي في التيار المستمر

يتم وضع القاطع k في الشكل (3 - 1) على الوضعية (2) لتحقيق حالة التشغيل المطلوبة. تكون معادلة تشغيل الدائرة في هذه الحالة على الشكل التالي:

$$(7 - 3) \quad L \frac{di}{dt} + Ri = 0$$

ويكون الحل العام لهذه المعادلة التفاضلية المتجانسة كما يلي:

$$(8-3) \quad i(t) = B \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

ويتم حساب قيمة ثابتة التكامل استناداً إلى شروط التشغيل الأولية كما يلي:

$$t = 0 \Rightarrow i = I$$

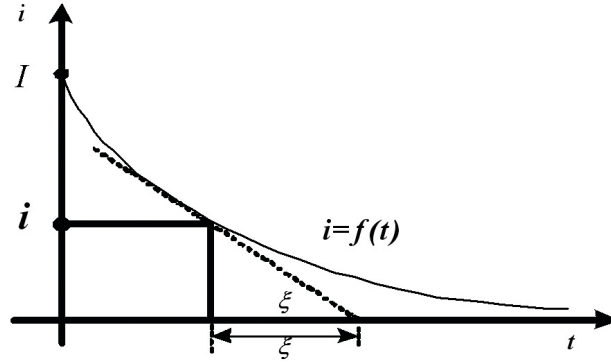
وبذلك ينتج:

$$(9-3) \quad B = I = \frac{E}{R}$$

وتصبح معادلة التيار الكهربائي المار في الدارة عند قصر الملف كما يلي:

$$(10-3) \quad i(t) = \frac{E}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = I \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

ويبين المنحنى في الشكل رقم (3-3) تغيرات التيار الكهربائي كتابع للزمن في هذه الحالة.



الشكل رقم (3-3)

ويمكن الملاحظة أن قيمة الثابتة الزمنية للدارة تساوي المقطع تحت المماس إلى المنحنى نسبةً للمحور، أي:

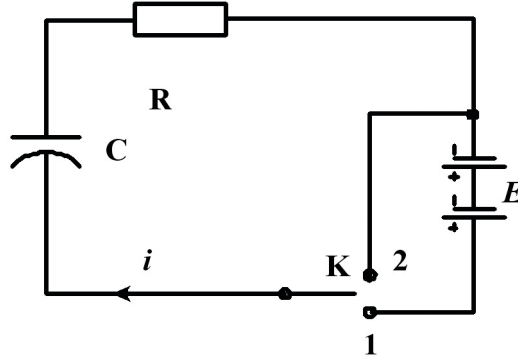
$$(11-3) \quad \begin{cases} \frac{di}{dt} = -\frac{1}{\tau} I \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \\ \frac{di}{dl} = -\frac{i}{\tau} = \operatorname{tg} \alpha \end{cases}$$

وتكون قيمة التوتر على أقطاب الملف في هذه الحالة:

$$(12-3) \quad U_L = L \frac{di}{dt} = -E \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

3-4-3 الحالة العابرة عند تطبيق توتر مستمر على مكثف كهربائي:

تنتج هذه الحالة عملياً عند تطبيق توتر لشحن المكثف، ويبين الشكل رقم (4-3) الدارة الكهربائية المستخدمة في عملية شحن وتفريغ المكثفات.



الشكل رقم (3 - 4) الدارة الكهربائية لشحن وتفريغ المكثف

يعتبر المكثف في الحالة الأولية غير مشحون أي:

$$t = 0 \Rightarrow q = 0$$

إن معادلة تشغيل الدارة المؤلفة من المكثف والمقاومة هي التالية:

$$(3 - 13) \quad u = R.i + \frac{q}{c}$$

وباعتبار أن $i = \frac{dq}{dt}$ ينتج:

$$(3 - 14) \quad R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{c} = E$$

إن الحل العام لهذه المعادلة التفاضلية يجب أن يكون على الشكل التالي:

$$q = q_e + q_p$$

حيث:

تمثل الحل العام للمعادلة المتجانسة التفاضلية

تمثل الحل الخاص للمعادلة التفاضلية وهي أيضاً قيمة الشحنة في الحالة المستقرة.

وتعطى قيمة هذه الحلول كما يلي:

$$(3 - 15) \quad \begin{cases} q_e = A e^{-\frac{t}{RC}} \\ q_p = C.U = Q \end{cases}$$

ويتم حل المعادلة التفاضلية (3-14) باستخدام طريقة تفريق المجاهيل حيث:

$$\mathbf{A} \left\{ \begin{array}{l} Ri + u_c = E \quad t \\ E - u_c = Ri \Rightarrow \frac{E}{R} - \frac{u_c}{R} = i \\ \text{حيث:} \\ \text{المركبة المستمرة} \quad I_p = \frac{E}{R} \\ \text{المركبة المتغيرة في الزمن} \quad i_t = \frac{u_c}{R} \end{array} \right.$$

في اللحظة الزمنية $t = 0$ ينتج $i_t = \frac{E}{R}$

كذلك يمكن كتابة مايلي:

$$\mathbf{B} \left\{ \begin{array}{l} i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_c}{dt} \\ q = C \cdot U_c \Rightarrow d_q = c \quad du_c \\ \frac{dl}{dt} = C \frac{du_c}{dt} \end{array} \right.$$

$$(16-3) \left\{ \begin{array}{l} E = R \cdot C \frac{du_c}{dt} + u_c \Rightarrow E - u_c = R \cdot C \frac{du_c}{dt} \\ \frac{dt}{RC} = \frac{du_c}{R - u_c} \Leftrightarrow (E - u_c) dt = R \cdot C du_c \end{array} \right.$$

وباعتبار أن:

$$(17-3) \left\{ \begin{array}{l} du_c = -d(E - u_c) \Rightarrow \\ \frac{dt}{RC} = - \frac{d(E - u_c)}{E - u_c} \end{array} \right.$$

وعند إجراء التكامل ينتج:

$$(18-3) \quad \frac{t}{RC} = - \ln(E - u_c) + \ln A$$

حيث تمثل A ثابتة التكامل، ويتم اختيارها على شكل لوغار يتم لتسهيل الاختصار. إذا تم ضرب المعادلة الأخيرة ب 1- سينتج:

$$(19-3) \quad - \frac{t}{RC} = \ln \left(\frac{E - u_c}{A} \right)$$

ولحساب قيمة ثابتة التكامل A تؤخذ بعين الاعتبار الشروط الأولية للمسألة: في اللحظة $t = 0$ يكون التوتر على أقطاب المكثف مساوياً للصفر، أي:

$$(20-3) \left\{ \begin{array}{l} u_c = 0 \\ 0 = \ln \frac{E}{A} \Rightarrow A = E \end{array} \right.$$

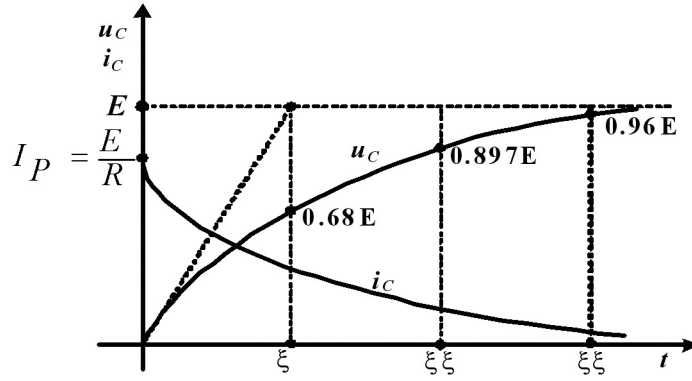
وبذلك تنتج تغيرات التوتر u_c على أقطاب المكثف:

$$(21-3) \quad u_c = E \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right)$$

تسمى الكمية $\tau = RC$ الثابتة الزمنية للدارة. وبذلك يمكن كتابة العلاقة السابقة كما يلي:

$$(22-3) \quad u_c = E \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

ويبين الشكل منحنى تغيرات التوتر والتيار على أقطاب المكثف



الشكل (3 - 5) تغيرات التوترات على أقطاب المكثف

حيث:

$$(23-3) \quad \left\{ \begin{array}{l} i = C \frac{du_c}{dt} = \frac{u}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} \\ q = Q \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \end{array} \right.$$

3 - 4 - 4 الحالة العابرة الناتجة عند تفريغ المكثف في التيار المستمر:
تكتب معادلة تشغيل دارة تفريغ المكثف الكهربائي في التيار المستمر كما يلي:

$$(24-3) \quad RC \frac{du_c}{dt} - u_c = 0$$

إن حل هذه المعادلة هو التالي:

$$(25-3) \quad u_c = B \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

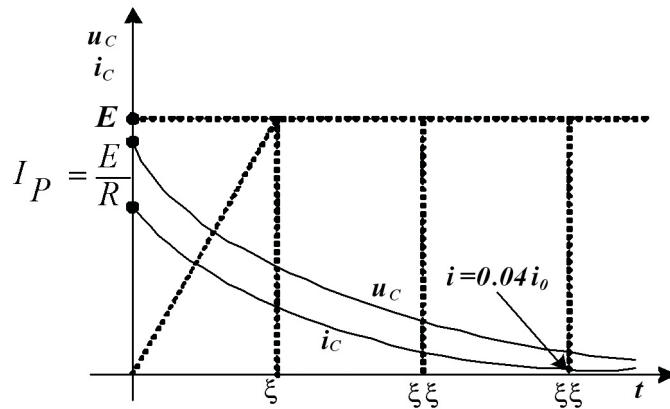
في اللحظة الزمنية $t = 0$ ينتج: $u_c = E$
وتنتج قيمة ثابتة التكامل B كما يلي:

$$(26-3) \quad \begin{cases} B = E \\ u_c = E \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \end{cases}$$

وتحسب قيمة تيار تفريغ المكثف بالعلاقة:

$$(27-3) \quad i = C \frac{du_c}{dt} = -\frac{E}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

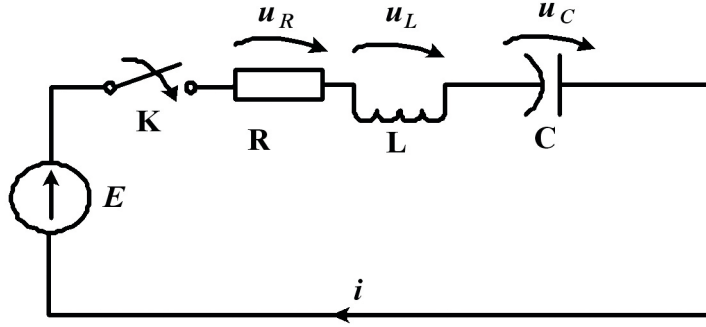
تدل إشارة السالب (-) في المعادلة على تغير اتجاه التيار في الدارة.
ويبين الشكل رقم (3-6) تغيرات تيار تفريغ المكثف الكهربائي في الزمن.



الشكل رقم (3-6) تغيرات التيار تفريغ المكثف

3 - 4 - 5 الحالة العابرة عند تطبيق توتر مستمر على دائرة RLC تسلسلية:

يبين الشكل رقم (3 - 7) دائرة تسلسلية RLC يطبق عليها توتر مستمر عند اغلاق القاطع K ويطلب تحديد علاقة التيار الذي سوف يمر في هذه الدارة.



الشكل رقم (3 - 7) دائرة تسلسلية RLC في التيار المستمر

يتم افتراض الشروط الأولية التالية للمسألة:

$$t = 0 \Rightarrow i = 0, q = 0$$

تكتب معادلة تشغيل الدارة التسلسلية RLC كما يلي:

$$(28-3) \begin{cases} E = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt \\ E = u_R + u_L + u_C \end{cases}$$

كما ويمكن كتابة المعادلة بمدلولية الشحنة الكهربائية q مع الأخذ بعين الاعتبار أن $i = \frac{dq}{dt}$ ، كما يلي:

$$(29-3) \quad L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = E$$

يمكن أن يأخذ حل هذه المعادلة التفاضلية الصيغة العامة التالية:

$$(30-3) \begin{cases} q = q_1 + q_p \\ q_1 = A_1 e^{\alpha_1 t} + A_2 e^{\alpha_2 t} \\ q_p = C \cdot U \end{cases}$$

تمثل α_1 و α_2 جذور المعادلة المميزة للمعادلة التفاضلية وتأخذ القيم:

$$\alpha_1 = -\delta + \sigma, \quad \alpha_2 = -\delta - \sigma$$

$$(31-3) \quad \sigma = \frac{R}{2L}, \quad \delta = \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}$$

وباستخدام الرمز التالي:

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

تصبح العلاقة كما يلي:

$$(32-3) \quad \delta = \frac{R}{2L}, \quad \sigma = \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$$

تحدد قيمة الثوابت A_1 و A_2 من الشروط الأولية للمعادلة وكما يلي:

$$(33-3) \quad \begin{cases} t=0 \Rightarrow \\ q(0) = q_a(0) + q_p(0) = A_1 + A_2 + CE = 0 \\ i(0) = \frac{dq}{dt}\bigg|_{t=0} = \alpha_1 A_1 + \alpha_2 A_2 = 0 \end{cases}$$

وباعتبار $Q = CE$ ينتج:

$$(34-3) \quad A_1 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} Q, \quad A_2 = \frac{\alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1} Q$$

وبذلك وبلاستبدال نحصل على المعادلة التالية:

$$(35-3) \quad q = Q - Q \frac{\omega_0^2}{\sigma} \cdot e^{-\delta t} \cdot Sh(\delta t + \mu)$$

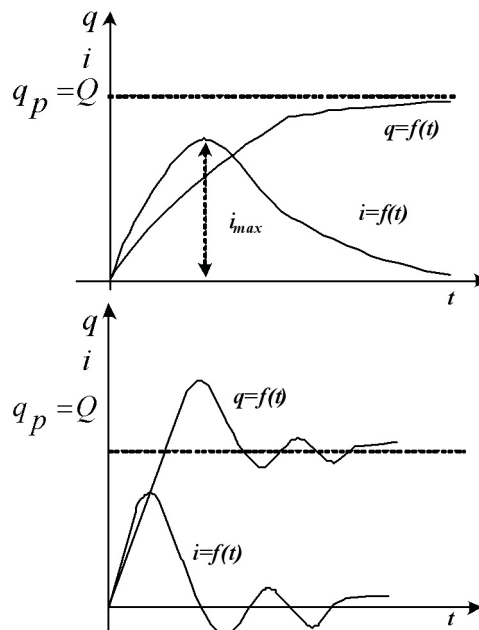
أما التيار فيعطى بالمعادلة:

$$(36-3) \quad i = Q \frac{\omega_0^2}{\sigma} e^{-\delta t} \cdot Sh \sigma t$$

حيث يرمز كما يلي:

$$(37-3) \quad \begin{cases} Ch \mu = \frac{\delta}{\omega_0} \\ Sh \mu = \frac{\delta}{\omega_0} \end{cases}$$

يمثل الشكل رقم (3-6) تغير التيار والشحنة في الدارة الكهربائية RLC التسلسلية.



الشكل رقم (3-8) تغير التيار والشحنة في الدارة الكهربائية RLC التسلسلية

يمكن تفريق حالتي تشغيل مميزتين كما يلي:

الحالة الأولى A :

وتمثل حالة التشغيل غير الدورية حيث q لا تغير إشارتها وحيث تكون قيمة σ حقيقية وهذا ينتج عندما يكون:

$$\delta > \omega_0, \quad R > 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (38 - 3)$$

الحالة الثانية B :

وتمثل حالة التشغيل الاهتزازية حيث تغير q في إشارتها الموجبة وتنتج هذه الحالة عندما تكون تخيلية $\delta = 0$ وهذا يحدث عندما يكون:

$$\delta < \omega_0, \quad R < 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (39 - 3)$$

يمكن الملاحظة أن التيار في هذه الحالة له تغيرات جيبية متخامدة:

$$i = Q \frac{\omega_0^2}{\omega_p} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin \omega_p t \quad (40 - 1)$$

حيث تمثل ω_p السرعة النبضية للاهتزازات الذاتية وتساوي:

$$\omega_p = \frac{\delta}{j} = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \quad (41 - 3)$$

3 - 5 الحالة العابرة في دائرة التيار المتناوب: [6] و [5] و [4] و [1]

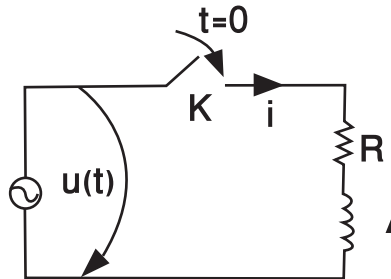
يمكن كما هو معروف، مكافأة أية شبكة كهربائية بدارة كهربائية أساسية تحتوي العناصر الكهربائية RLC ، وأن أية شبكة كهربائية مهما كانت من التعقيد فانه يمكن ارجاعها الى دائرة كهربائية مكافئة من نوع RLC تسلسلية. وبذلك يمكن دراسة الحالة العابرة لهذه الدارة التسلسلية لفهم الحالات العابرة التي تنتج في الشبكات الكهربائية بشكل واضح وبسيط.

3 - 5 - 1 الحالة العابرة عند تطبيق توتر كهربائي متناوب على وشيعة كهربائية RL:

يبين الشكل رقم (3 - 9) دائرة تيار متناوب تحتوي على وشيعة كهربائية حقيقية RL . عند اغلاق القاطع K يتم تطبيق توتر كهربائي متناوب على الدارة.

يعطى هذا التوتر المتناوب بالعلاقة:

$$U(t) = U\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + \theta) \quad (42 - 3)$$



الشكل رقم (3 - 9) دائرة تيار متناوب تسلسلية تحتوي على العناصر RL

تكتب معادلة تشغيل هذه الدارة كما يلي:

$$(43 - 3) \quad \begin{cases} U(t) = U_R + U_L \\ U(t) = R \cdot i + L \frac{di}{dt} \end{cases}$$

وباشتقاق هذه المعادلة بالنسبة إلى الزمن t تنتج المعادلة التالية:

$$(44-3) \quad \begin{cases} R \frac{di}{dt} + L \frac{d^2i}{dt^2} = \frac{dU}{dt} \\ R \frac{di}{dt} + L \frac{d^2i}{dt^2} = \frac{dU}{dt} = \omega \cdot U \cdot \sqrt{2} \cos(\omega t + \theta) \end{cases}$$

وهذه المعادلة هي معادلة تفاضلية من الدرجة الثانية ذات أمثال ثابتة وذات طرف ثان لا يساوي الصفر. والحل العام لهذه المعادلة التفاضلية هو مجموع حلين يمثلان التيار المار في الدارة:

1- حل المعادلة التفاضلية بدون طرف ثان هو الحل العابر للدارة $i_e(t)$.

2- حل المعادلة التفاضلية بطرف ثان هو الحل المستقر للدارة $i_p(t)$.

أي يمكن أن نكتب:

$$(45-3) \quad i(t) = i_l(t) + i_p(t)$$

ويتم حساب الحل المستقر $i_p(t)$ باعتبار معادلة التوترات في الصيغة العقدية:

$$(46-3) \quad \begin{cases} \overline{U_R} + \overline{U_L} = \overline{U} \\ R \overline{I} + L \omega \overline{I} = \overline{U} \end{cases}$$

وباعتبار:

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

يمكن كتابة علاقة التيار كما يلي:

$$(47-3) \quad \overline{I} = \frac{\overline{U}}{Z}$$

$$(48-3) \quad i_p(t) = \frac{U \sqrt{2}}{Z} \sin(\omega t + \theta \pm \varphi) \text{ أو } i_p(t) = \frac{U \sqrt{2}}{Z} \sin(\omega t + \theta \pm \varphi)$$

$$(49-3) \quad \varphi = \arctg \frac{\omega L}{R} \text{ مع العلم أن:}$$

ويتم حساب المركبة العابرة للتيار $i_e(t)$ باعتبار المعادلة التفاضلية بالشكل التالي:

$$(50-3) \quad R \frac{di}{dt} + L \frac{d^2i}{dt^2} = 0$$

يفرض أن الحل الخاص بها له الشكل التالي:

$$(51-3) \quad i = A \cdot e^{ht}$$

تعوض قيمة التيار هذه من المعادلة في المعادلة (50-3) فينتج:

$$(52-3) \quad h^2 + \frac{R}{L} \cdot h = 0$$

ويمكن كتابة حل هذه المعادلة على الشكل التالي:

$$(53-3) \quad i_l = A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

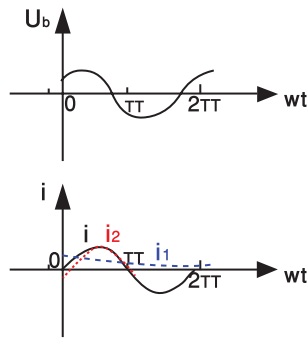
وتحدد قيمة ثابتة التكامل A من الشروط الأولية والتي تفترض أن $i(0) = 0$ فتنتج قيمة المركبة العابرة للتيار كما يلي:

$$(54-3) \quad i_l(t) = \frac{U \sqrt{2}}{Z} \sin(\theta \pm \varphi)$$

ويعطى التار الذي يمر في الدارة الكهربائية بالعلاقة:

$$(55-3) \quad i(t) = \frac{U \sqrt{2}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} [\sin(\omega t + \theta \pm \varphi) - \sin(\theta \pm \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}}]$$

بين الشكل رقم (3 - 10) تغيرات التيار الكهربائي في دائرة RL تسلسلية عندما يطبق عليها توتر كهربائي متناوب.



الشكل رقم (3 - 10)

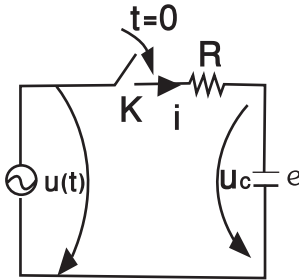
يمكن الملاحظة أنه إذا تم اغلاق القاطع K في اللحظة الزمنية التي تمر فيها المركبة المستقرة للتيار بالقيمة صفر فإن المركبة العابرة للتيار تنعدم وتدخل الدارة مباشرة في الحالة المستقرة.

3 - 5 - 2 الحالة العابرة عند تطبيق توتر كهربائي متناوب على مكثف كهربائية RC:

يبين الشكل رقم (3 - 11) دائرة تيار متناوب تحتوي على وشيعة كهربائية حقيقية RC . عند اغلاق القاطع K يتم تطبيق توتر كهربائي متناوب على الدارة.

يعطى هذا التوتر المتناوب بالعلاقة:

$$U(t) = U\sqrt{2}\sin(\omega t + \theta) \quad (3 - 56)$$



الشكل رقم (3 - 11) دائرة تيار متناوب تسلسلية تحتوي على العناصر RC

تكتب معادلة تشغيل هذه الدارة كما يلي:

$$\begin{aligned} u(t) &= u_R + u_C \\ u(t) &= R.i + u_C \end{aligned} \quad (3 - 57)$$

وإذا أخذنا بعين الاعتبار أن:

$$i = C \frac{du_C}{dt} \quad (3 - 58)$$

ينتج:

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = u(t) \quad (3 - 59)$$

وباشتقاق هذه المعادلة بالنسبة إلى الزمن t تنتج المعادلة التالية:

$$RC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + \frac{du_C}{dt} = \frac{du}{dt} = \omega.C.U.\sqrt{2}\cos(\omega t + \theta) \quad (3 - 60)$$

وهذه المعادلة هي معادلة تفاضلية من الدرجة الثانية ذات أمثال ثابتة وذات طرف ثان لا يساوي الصفر. والحل العام لهذه المعادلة التفاضلية هو مجموع حلين يمثلان:

1- حل المعادلة التفاضلية بدون طرف ثان هو الحل العابر للدارة $u_e(t)$.

2- حل المعادلة التفاضلية بطرف ثان هو الحل المستقر للدارة $u_p(t)$.
أي يمكن أن نكتب:

$$(61-3) \quad u(t) = u_1(t) + u_p(t)$$

ويتم حساب الحل المستقر $u_p(t)$ باعتبار معادلة التوترات في الصيغة العقدية:

$$(62-3) \quad \begin{cases} \overline{u_R} + \overline{u_C} = \overline{u} \\ R \overline{I} + \frac{1}{C\omega} \overline{I} = \overline{U} \end{cases}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{C\omega}\right)^2}$$

وباعتبار:

يمكن كتابة علاقة التوتر كما يلي:

$$(63-3) \quad \overline{U} = \overline{Z} \cdot \overline{I}$$

وبافتراض حل هذه المعادلة له الصيغة التالية:

$$(64-3) \quad u_p(t) = U_C \sqrt{2} \sin(\omega t + \theta \pm \varphi)$$

ينتج:

$$(65-3) \quad \begin{cases} U_C = \frac{X_C}{Z} U \\ X_C = \frac{1}{\omega C} \\ \tan \varphi = \frac{R}{X_C} = \omega RC \end{cases}$$

ويتم حساب المركبة العابرة للتوتر $u_1(t)$ باعتبار المعادلة التفاضلية بالشكل التالي:

$$(66-3) \quad RC \frac{du_C}{dt} + u_C = 0$$

وبفرض أن الحل الخاص بها له الشكل التالي:

$$(67-3) \quad u = A e^{ht}$$

تعوّض قيمة التوتر هذه في المعادلة (66-1) فينتج:

$$(68-3) \quad h^2 + \frac{R}{L} h = 0$$

ويمكن كتابة حل هذه المعادلة على الشكل التالي:

$$(69-3) \quad u_1 = A e^{-\frac{t}{\tau}}; \tau = RC$$

وتحدد قيمة ثابتة التكامل A من الشروط الأولية والتي تفترض أن $u_C(0) = 0$.
فتنتج قيمة المركبة العابرة للتيار كما يلي:

$$(70-3) \quad u_1(t) = U_C \sqrt{2} \sin(\theta \pm \varphi)$$

ويعطى التوتر الذي يظهر على طرفي المكثف يمر في بالعلاقة:

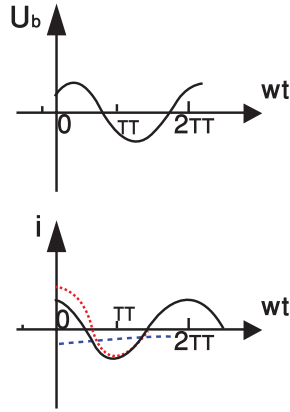
أما قيمة التيار الذي يمر في الدارة فتساوي:

$$(71-3) \quad u(t) = \frac{X_C U \sqrt{2}}{Z} [\sin(\omega t + \theta \pm \varphi) - \sin(\theta \pm \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}}]$$

أما قيمة التيار الذي يمر في الدارة فتعطى بالعلاقة:

$$(72-3) \quad \begin{cases} i(t) = C \frac{du_C}{dt} \\ i(t) = \frac{U \sqrt{2}}{Z} [\sin(\omega t + \theta \pm \varphi) + \frac{1}{\omega \tau} \sin(\theta \pm \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}}] \end{cases}$$

ويبين الشكل رقم (3-12) تغيرات التيار في دارة RC عندما يطبق عليها توتر كهربائي متناوب. يمكن الملاحظة أنه إذا تم إغلاق القاطع K في اللحظة الزمنية التي يكون محقق فيها ، فإن المركبة العابرة للتيار تنعدم وتدخل الدارة مباشرة في الحالة المستقرة.



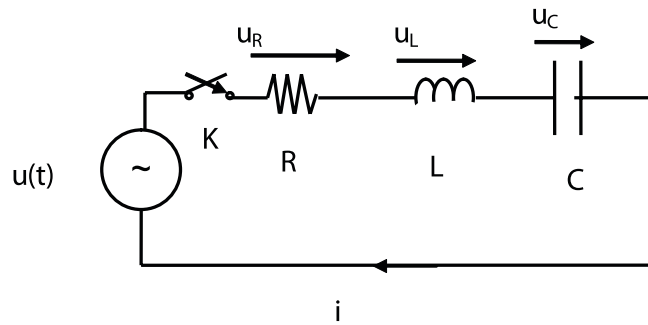
الشكل رقم (3-12)

3-5-3 الحالة العابرة عند تطبيق توتر كهربائي متناوب على دارة تسلسلية RLC:

يبين الشكل رقم (3-13) دارة تيار متناوب تسلسلية تحتوي على عناصر RLC. عند إغلاق القاطع K في الدارة يتم تطبيق توتر كهربائي متناوب على الدارة.

يعطى هذا التوتر المتناوب بالعلاقة:

$$(42-3) \quad u(t) = U \sqrt{2} \sin(\omega t + \theta)$$



الشكل رقم (3-13) دارة تيار متناوب تسلسلية تحتوي على العناصر RLC

تكتب معادلة تشغيل هذه الدارة كما يلي:

$$(73-3) \quad \begin{cases} U(t) = U_R + U_L + U_C \\ U(t) = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt \end{cases}$$

وباشتقاق هذه المعادلة بالنسبة إلى الزمن t تنتج المعادلة التالية:

$$(74-3) \quad \begin{cases} R \frac{di}{dt} + L \frac{d^2i}{dt^2} + \frac{i}{C} = \frac{dU}{dt} \\ \frac{R}{L} \frac{di}{dt} + \frac{d^2i}{dt^2} + \frac{i}{LC} = \frac{dU}{dt} = \frac{\omega U \cdot \sqrt{2}}{L} \cos(\omega t + \theta) \end{cases}$$

وهذه المعادلة هي معادلة تفاضلية من الدرجة الثانية ذات أمثال ثابتة وذات طرف ثان لا يساوي الصفر. والحل العام لهذه المعادلة التفاضلية هو مجموع حلين يمثلان التيار المار في الدارة.

1- حل المعادلة التفاضلية بدون طرف ثان هو الحل العابر للدارة $(ie(t))$.

2- حل المعادلة التفاضلية بطرف ثان هو الحل المستقر للدارة $(ip(t))$.

أي يمكن أن نكتب:

$$(75-3) \quad i(t) = i_l(t) + i_p(t)$$

ويتم حساب الحل المستقر $i_p(t)$ باعتبار معادلة التوترات في الصيغة العقدية:

$$(76-3) \quad \begin{cases} \overline{U_R} + \overline{U_L} + \overline{U_C} = \overline{U} \\ R \overline{I} + L \omega \overline{I} + \frac{1}{\omega C} \overline{I} = \overline{U} \end{cases}$$

وباعتبار:

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$$

$$\overline{I} = \frac{\overline{U}}{Z}$$

يمكن كتابة علاقة التيار كما يلي:

$$(77-3) \quad i_p(t) = \frac{U \sqrt{2}}{Z} \sin(\omega t + \theta \pm \varphi)$$

مع العلم أن:

$$(78-3) \quad \varphi = \arctg \frac{(\omega L - \frac{1}{\omega C})}{R}$$

ويتم حساب المركبة العابرة للتيار $ie(t)$ باعتبار المعادلة التفاضلية بالشكل التالي:

$$(79-3) \quad \frac{R}{L} \frac{di}{dt} + \frac{d^2i}{dt^2} + \frac{i}{LC} = 0$$

أو بالشكل:

$$(80-3) \quad i + R.C \frac{di}{dt} + LC \frac{d^2i}{dt^2} = 0$$

وللحصول على المعادلة المميزة للمعادلة التفاضلية (3-50) يفرض أن الحل الخاص بها له الشكل التالي:

$$(81-3) \quad i = A.e^{ht}$$

تعوض قيمة التيار من المعادلة (3-81) بالمعادلة (3-80) فينتج:

$$(82-3) \quad L.C.h^2 + R.C.h + 1 = 0 \Rightarrow h^2 + \frac{R}{L}.h + \frac{1}{L.C} = 0$$

إن المعادلة (3 - 82) هي معادلة من الدرجة الثانية لها حلان هما:

$$(3 - 83) \quad \begin{cases} h_1 = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \\ h_2 = -\frac{R}{2L} - \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \end{cases}$$

ويمكن أن تناقش أربعة حالات مختلفة تعتمد على الحدود الموجودة تحت الجذر فيما لو كانت موجبة أو سالبة أو مساوية للصفر. وذلك اعتمادا على مقارنة قيمة R مع المقاومة الحرجة RC والتي تعطى بالعلاقة:

$$(3 - 84) \quad R_C = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$$

الحالة الأولى:

وهي الحالة التي تكون فيها $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ أي $R < R_C$ وبالتالي يكون الحلان h_1, h_2 حلان تخيلان ومترافقان أي:

$$(3 - 85) \quad \begin{cases} h_1 = -\frac{R}{2L} + j\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \\ h_2 = -\frac{R}{2L} - j\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \end{cases}$$

فإذا تم اعتبار $\delta = \frac{R}{2L}$ و $\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ فإن β ستساوي:

$$(3 - 86) \quad \beta = \omega_o = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} = \omega_r \sqrt{1 - \frac{\delta^2}{\omega_r^2}}$$

وكذلك فإن :

$$(3 - 87) \quad \begin{cases} \frac{\delta}{\omega_r} = \frac{R}{R_C} \Rightarrow \\ h_1 = -\delta + j\beta \\ h_2 = -\delta - j\beta \end{cases}$$

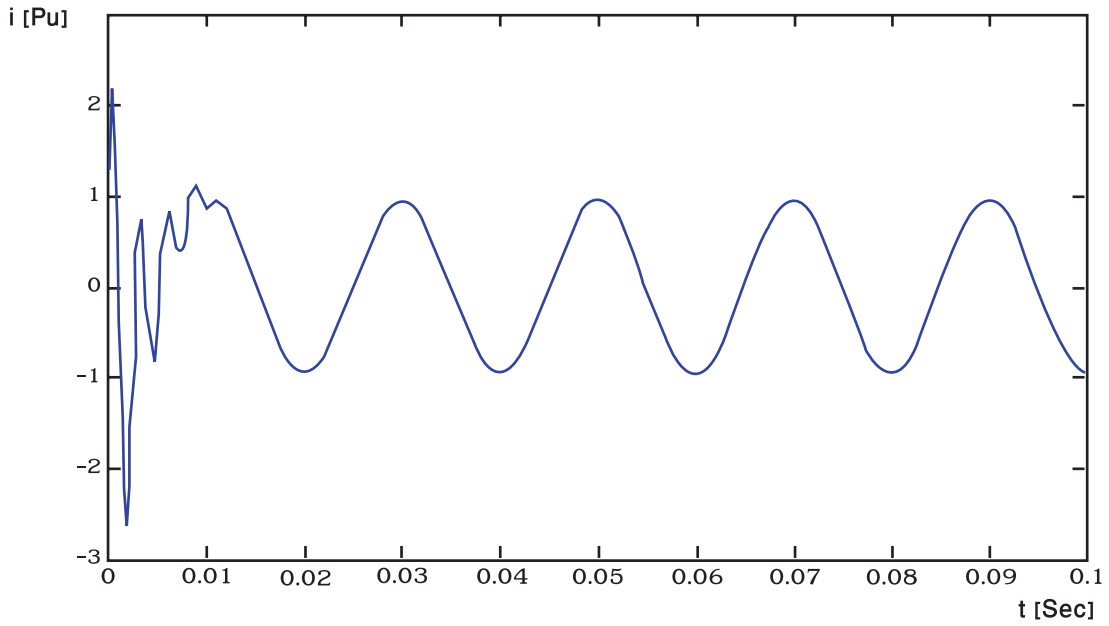
ويكون الحل العام للمعادلة:

$$(3 - 88) \quad \begin{cases} i_e = e^{-\delta t} (A_1 \cos \omega_o t + A_2 \sin \omega_o t) \\ i_e = e^{-\delta t} (A_1 \cos \beta t + A_2 \sin \beta t) \end{cases}$$

يبين هذا الحل العام أن الحالة العابرة هي عبارة عن نظام جيبي متخامد له نبضة تساوي ω_o وعامل تخامد δ . وبذلك يعطى الحل العام للمعادلة الذي يحدد قيمة التيار في هذه الحالة بالعلاقة:

$$(3 - 89) \quad i(t) = e^{-\delta t} (A_1 \cos \beta t + A_2 \sin \beta t) + \frac{U\sqrt{2}}{Z} \sin(\omega t + \theta \pm \phi)$$

ويبين الشكل رقم (3 - 14) الحالة العابرة للتيار عندما $R < RC$.



الشكل رقم (3 - 14) الحالة العابرة للتيار عندما $R < RC$

الحالة الثانية:

عندما تكون $R=0$ أي أن الضياعات الحرارية بفعل جول معدومة فيكون

$$\begin{aligned} h_1 &= j\omega_r \\ h_2 &= -j\omega_r \end{aligned} \quad (90-3)$$

حيث

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (91-3)$$

فيكون الحل العام لهذه الحالة:

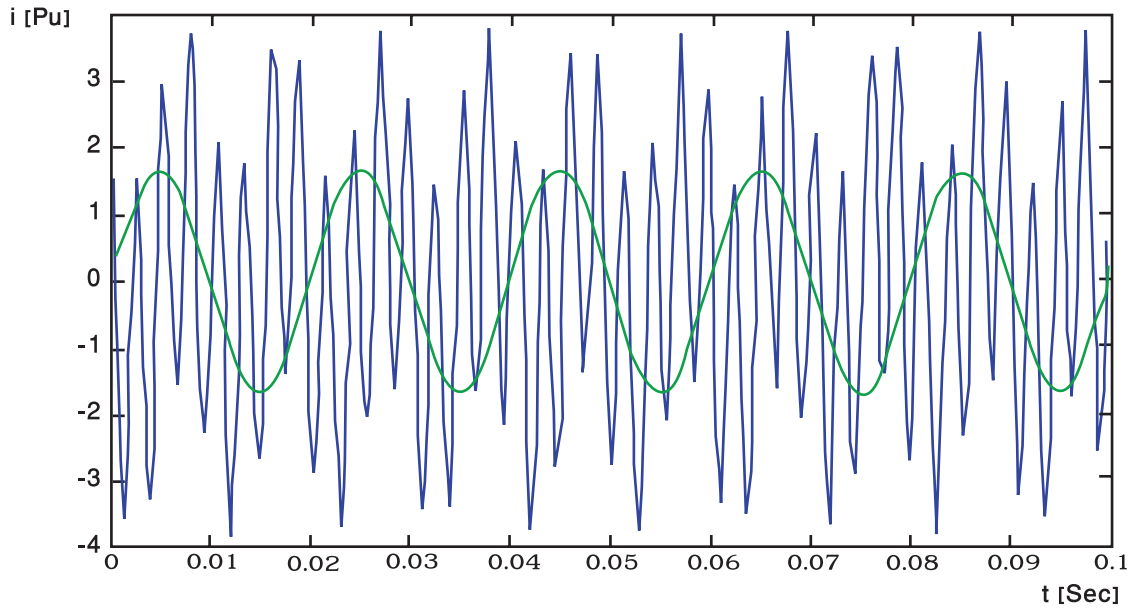
$$i(t) = A_1 \cdot \cos \omega_r t + A_2 \cdot \sin \omega_r t \quad (92-3)$$

وهذه الحالة العابرة هي عبارة عن حل جيبي بحت وهذا النظام يطابق تبادل مستمر للطاقة بين الملف والمكثف أي:

$$\frac{d}{dt}(\omega_{mag} + \omega_{pct}) \quad (93-3)$$

$$\frac{1}{2} Li^2 + \frac{1}{2} cu^2 = ct \quad (94-3) \text{ أو}$$

ويبين الشكل رقم (3 - 15) الحالة العابرة للتيار عندما $R=0$.



الشكل رقم (3 - 15) الحالة العابرة للتيار عندما $R=0$

الحالة الثالثة:

وهي الحالة التي يكون فيها $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ أي $R = R_c$ أي وبالتالي يكون الحلان h_1, h_2 متساويان وينتج $h_2 = h_1 = -\frac{R}{2L}$ وبالتالي يعطى الحل العام للمعادلة بالعلاقة:

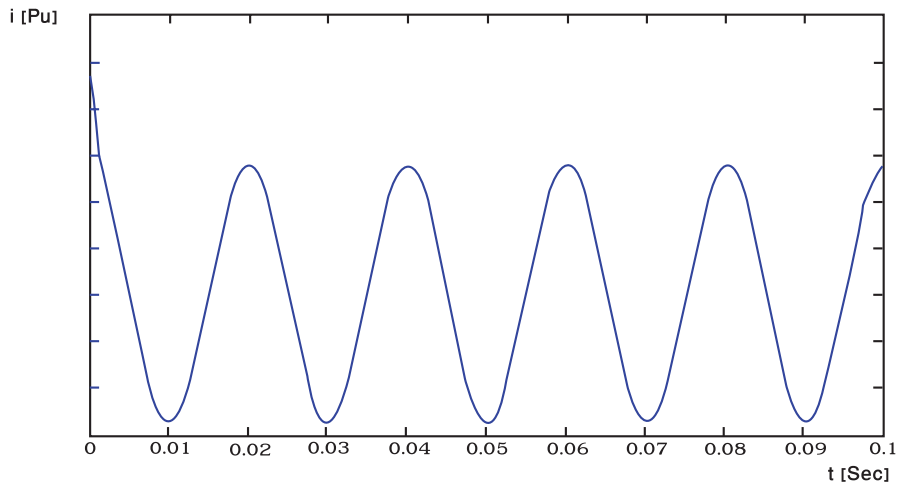
$$(95 - 3) \quad i e = e^{-\delta t} (A_1 + A_2 t)$$

وهذا يسمى النظام غير الجببي الحرج.

يعطى الحل العام للمعادلة الذي يمثل تراكم المركبة الحرة والمركبة القسرية للتيار الذي يمر في الدارة بالعلاقة:

$$(96 - 3) \quad i(t) = e^{-\delta t} (A_1 + A_2 t) + \frac{U\sqrt{2}}{Z} \sin(\omega t + \theta \pm \phi)$$

ويبين الشكل رقم (3 - 16) الحالة العابرة للتيار عندما $R=RC$.



الشكل رقم (3 - 16) الحالة العابرة للتيار عندما $R=RC$

الحالة الرابعة:

وهي الحالة التي تكون فيها $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ أي $R > R_c$ وبالتالي يكون h_1, h_2 حلان حقيقيان ويساويان:

$$(97-3) \quad \begin{cases} h_1 = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{CL}} \\ h_2 = -\frac{R}{2L} - \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{CL}} \end{cases}$$

وباعتبار:

$$(98-3) \quad \delta = \frac{R}{2L}, \beta = \delta \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_r}{\delta}\right)^2}$$

يمكن أن نكتب:

$$(99-3) \quad \begin{cases} h_1 = -\delta + \beta \\ h_2 = -\delta - \beta \end{cases}$$

ويكون الحل العام للمعادلة:

$$(100-3) \quad \begin{cases} i_e = A_1 e^{-(\delta+\beta)t} + A_2 e^{-(\delta-\beta)t} \\ i_e = e^{-\delta t} (A_1 e^{\beta t} + A_2 e^{-\beta t}) \end{cases}$$

يبين هذا الحل العام أن الحالة العابرة هي عبارة عن حالة متخامدة وتتميز بثابتي زمن، الأول $\tau_1 = \frac{1}{\delta + \beta}$ ، والثاني $\tau_2 = \frac{1}{\delta - \beta}$ ويساوي كل منهما مقلوب عامل التخامد.

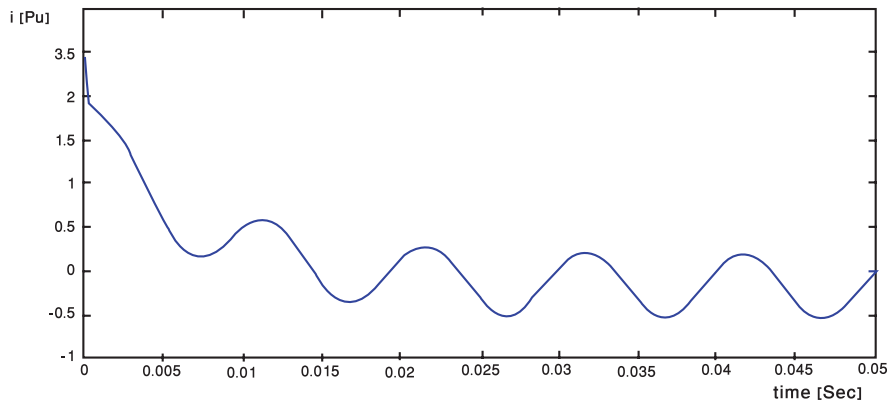
يعطى الحل العام للمعادلة الذي يمثل تراكم المركبة الحرة والمركبة القسرية للتيار الذي يمر في الدارة بالعلاقة:

$$(101-3) \quad i(t) = e^{-\delta t} (A_1 e^{\beta t} + A_2 e^{-\beta t}) + \frac{U\sqrt{2}}{Z} \sin(\omega t + \theta \pm \varphi)$$

حيث:

$$(102-3) \quad \begin{cases} \delta = \frac{R}{2L} \\ \beta = \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \end{cases}$$

وببين الشكل رقم (3-17) الحالة العابرة للتيار عندما $R > RC$.



الشكل رقم (3-17) الحالة العابرة التيار عندما $R > RC$

3 - 6 التفسير الفيزيائي للحالة العابرة

تؤثر عناصر الدارة الكهربائية وهي المقاومة والملف والمكثف على الحالة المستقرة والحالة العابرة التي تعمل بها هذه الدارة. ويشارك الملف من خلال عامل التحريض L في تحديد سمات الحالة المستقرة، أما في الحالة العابرة فإن السعة C هي التي تحدد هذه السمات. تتميز عناصر الدارة الكهربائية، المكثف والملف C, L بقدرتها على تخزين الطاقة، حيث يتم تخزين الطاقة المغناطيسية في الملف، ويتم تخزين الطاقة الكهربائية في المكثف. وتعطى قيمة الطاقة الكهربائية والطاقة المغناطيسية بالعلاقات التالية:

$$W_e = \frac{1}{2} C U^2 \quad (3-103)$$

$$W_m = \frac{1}{2} L I^2$$

وتقوم المقاومة الكهربائية في الدارة R بتبديد الطاقة وتعطى قيمة التبديد بالعلاقة $R.I^2$. وتكون الطاقة الكهربائية والطاقة المغناطيسية في دارة التيار المستمر ثابتة، أما في حالة دارة التيار المتناوب فإنها تكون متغيرة وتنتقل دورياً بين الملف والمكثف أي بين C, L . عندما يحدث تغير مفاجئ في حالة تشغيل دارة كهربائية ما، تنتج إعادة لتوزيع الطاقة لتلبية شروط العمل في حالة التشغيل الجديدة، لكن إعادة توزيع الطاقة هذه لا يمكن أن تحدث لحظياً لسببين:

1- يتطلب تغير الطاقة المغناطيسية في الملف تغير التيار، ولكن تغير التيار في الملف يؤدي إلى ظهور قوة محركة كهربائية تحريضية ذاتية تعمل لإزالة السبب الذي أدى إلى توليدها، أي أن هذه القوة المحركة الكهربائية التحريضية ستعمل لمعاكسة تغيرات التيار في الدارة، وتعطى هذه القوة المحركة الكهربائية التحريضية بالعلاقة:

$$e_a = L \frac{dI}{dt} \quad (3-104)$$

يحتاج التغير اللحظي للتيار إلى توتر غير محدود لتحقيقه، وباعتبار أنه لا يمكن تحقيق ذلك عملياً فإن التيار في الملف L لا يتغير بشكل حاد، وكذلك لا تتغير الطاقة المغناطيسية المختزنة فيه.

2- يتطلب تغير الطاقة الكهربائية في المكثف تغير التوتر، ويعطى التوتر على أقطاب المكثف بالعلاقة:

$$U = \frac{Q}{C} \quad (3-105)$$

حيث Q هي الشحنة الكهربائية للمكثف، وتتغير هذه الشحنة مع تغير التوتر المطبق على المكثف وفقاً للعلاقة:

$$\frac{dQ}{dt} = C \cdot \frac{dU}{dt} \quad (3-103)$$

يحتاج التغير اللحظي للتوتر إلى تيار غير محدود لتحقيقه، وباعتبار أنه لا يمكن تحقيق ذلك عملياً فإن التوتر على أقطاب المكثف C لا يتغير بشكل حاد وكذلك لا تتغير الطاقة الكهربائية المختزنة فيه.

أن إعادة توزيع الطاقة في الدارة في الحالة العابرة يستغرق زمناً محدداً، وخلال هذا الزمن كما في أي زمن آخر تخضع حالة تشغيل الدارة لمبدأ مصونية الطاقة.

إن هذه الحقائق الثلاثة محققة في جميع الحالات (المتناوب- المستمر).

ومن هنا يمكن القول: أن كل تغير في توزيع الطاقة المغناطيسية و الطاقة الكهربائية الساكنة في أي دارة كهربائية يؤدي إلى حالات عابرة في هذه الدارة.

مما سبق نحصل على الحقائق الثلاث البسيطة:

1- لا يتغير التيار فجأة عبر الملف الكهربائي.

2- لا يتغير التوتر فجأة عبر المكثف الكهربائي.

3- تبقى الطاقة الكلية في الدارة مصانة.

وتكون هذه الحقائق الثلاثة محققة في جميع الحالات، في دارات التيار المتناوب وفي دارات التيار المستمر.

وبذلك فإن أي تغيير في توزيع الطاقة المغناطيسية و الطاقة الكهربائية الساكنة في أية دارة كهربائية يؤدي إلى حالات عابرة في هذه الدارة.

الفصل الرابع

نمذجة ومحاكاة الدارات الكهربائية الأساسية في الحالات العابرة

4 – نمذجة ومحاكاة الدارات الكهربائية الأساسية في الحالات العابرة:

Modeling and Simulation for Basic Electric Circuits

4 - 1 تعريف النمذجة المحاكاة: Simulation and Modeling [6] و [3]

عرف النمذجة أنها استنتاج مجموعة من المعادلات الرياضية تمثل سلوك نظام ما مثل (نظام قدرة كهربائي- أجزاء من نظام القدرة الكهربائية- كالمولدات- المحولات- خطوط النقل – المنظمات- الأحمال أو نظام تحكم أو نظام قيادة) عند عمل هذه الأنظمة في كلتا الحالتين حالة التشغيل المستقرة (Steady state) أو حالة العمل الديناميكية (Dynamic State)، خاصة عندما يتعرض النظام لتغيرات طفيفة أو مفاجئة كما في الحالة العابرة. ويفيد النموذج الرياضي أحياناً في التنبؤ والتحكم بسلوك الأنظمة الفيزيائية .

يشكل النموذج الرياضي بحيث يكون مرناً وسهلاً وبسيطاً ، بحيث استخدامه في بناء مخطط محاكاة Simulation للنظام الذي يمثل هذا النموذج بشكل بسيط ، وذلك إما برمجياً من خلال استعمال البرمجيات المعروفة مثل فورتران أو C ++ أو C وغالباً ما يتم إجراء الحل الرياضي للنماذج باستخدام هذه البرمجيات، أما إظهار الإشارات الواصفة لسلوك النظام الذي تم تمثيله رياضياً فيتم من خلال بعض البرامج الأخرى مثل Excel أو Matlab.

عند وضع أو اختيار النموذج الرياضي يجب الأخذ بالحسبان الغاية من هذا النموذج ، أي ما هي العناصر المراد قياسها ومراقبتها أو التحكم بها أو التنبؤ بها عند تشغيل النموذج الحقيقي (النموذج الفيزيائي)، وبالتالي يتم النمذجة الرياضية Mathematical Modeling وضع علاقات وتوابع بين الكميات والقيم المراد قياسها أو دراستها، لذلك يجب أن يتم اختيار النموذج المناسب لوصف سلوك النظام.

- تعتبر المحاكاة من الوسائل المفيدة في الكثير من المواضيع العلمية مثل :
- مراقبة النظام الفيزيائي.

- التنبؤ بسلوك النظام من خلال الحل أو من خلال خصائص الموديل الرياضي.
- اختبار صحة أو صلاحية النموذج الرياضي الذي تم اختياره لوصف هذا النظام.

ويمكن أن تتم النمذجة الرياضية بعدة طرق منها :

أ- باستخدام معادلات خطية أو علاقات لا خطية Linear or non Linear .

ب - باستخدام معادلات تفاضلية عادية أو معادلات تفاضلية جزئية .

ج - تمثيل الحالات الساكنة Static أو الحالات الديناميكية Dynamic.

د - النمذجة في الحالة المستمرة Continuous أو الحالة غير المستمرة Discrete.

يتعين اختيار النموذج الرياضي المناسب لتمثيل ومحاكاة سلوك النظام المراد دراسته، والتعرف أو التنبؤ بسلوك النظام الحقيقي الذي يمثل هذا النموذج الرياضي، لذلك يجب أن يتم اختيار النموذج المناسب أو استنتاجه من نماذج أخرى. يمكن توضع النماذج الرياضية بأحد الأشكال التالية :

1- وضع النموذج الرياضي على شكل مجموعة من المعادلات التفاضلية : يستخدم هذا الأسلوب عندما يراد من النموذج الرياضي ونموذج المحاكاة الموافق له إظهار التغيرات في محددات النظام الذي يتم تمثيله نسبة للزمن، مثلاً إظهار التغيرات في التيارات- التوترات- السرعة – العزم بالقيم الحقيقية أو بالقيم الواحدة أثناء الحالة المستقرة ، أو أثناء الحالة العابرة التي تسببها تغيرات مفاجئة على النظام.

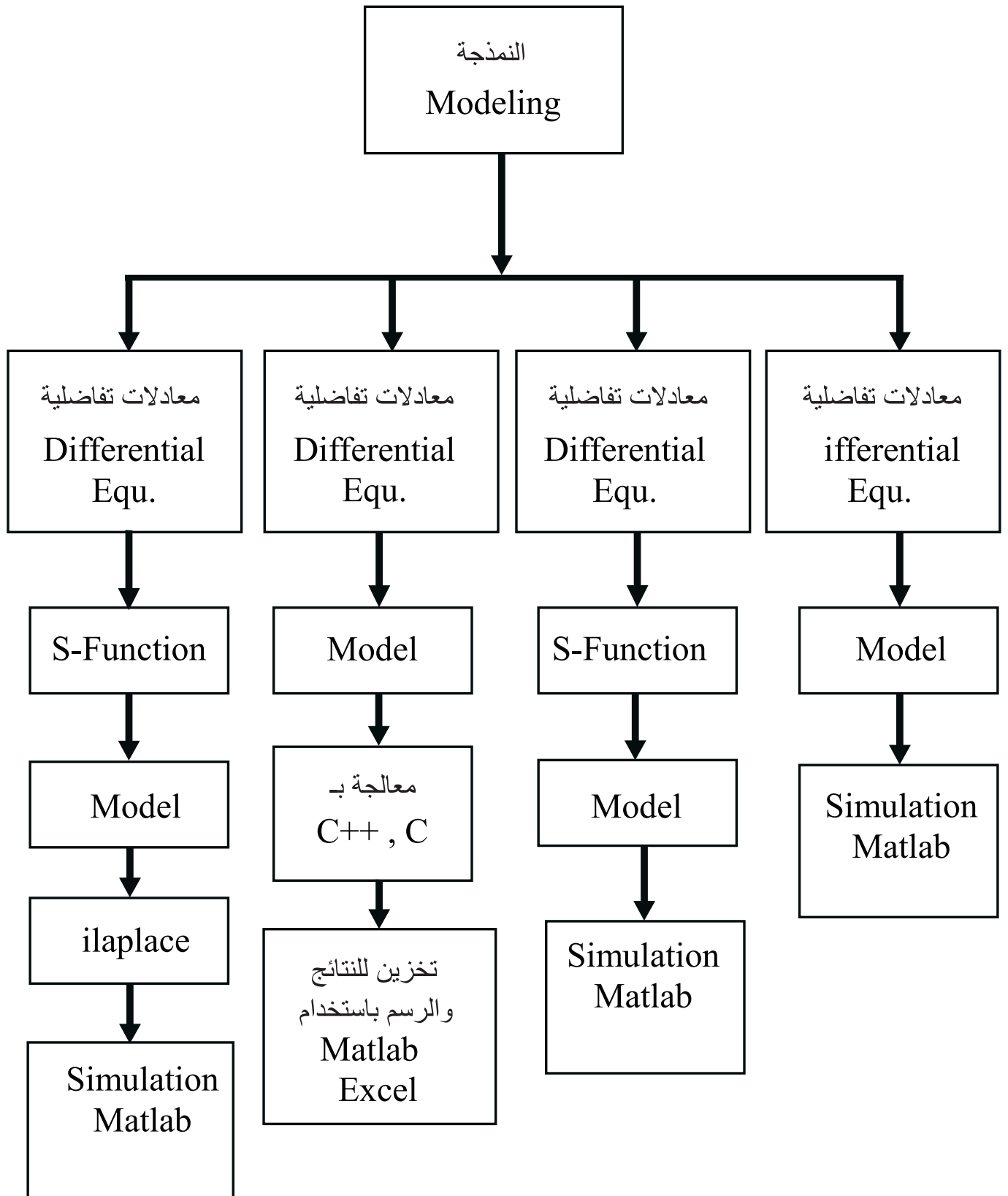
2- وضع النموذج الرياضي على شكل مجموعة من توابع النقل:

يستخدم هذا الأسلوب عندما يراد معرفة استجابة النظام response عند تعرضه لحالات تشغيل معينة (مثلاً حالات إقلاع، حالات تغير مفاجئ في الحمولة دون الاهتمام بتفاصيل الإشارات)، ويتم عادة استنتاج النموذج بهذه الحالة على شكل توابع لابلاس، أو توابع Z.

3- وضع النموذج الرياضي على شكل علاقات كتابع للزمن

ويتم ذلك بعد حل المعادلات التفاضلية الممثلة للنظام حيث يمكن وضع مخطط للمحاكاة بأشكال مختلفة من المخططات الصندوقية.

يبين الشكل (1-4) مخطط للخيارات التي يمكن استخدامها في النمذجة والمحاكاة للأنظمة الفيزيائية المختلفة. [3]



الشكل (1-4) مخطط الخيارات في النمذجة

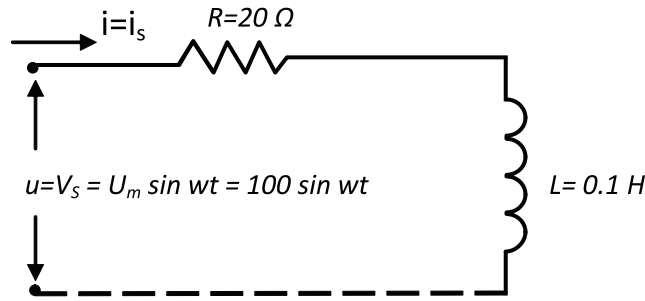
4 - 2 نمذجة ومحاكاة الدارات الكهربائية الأساسية باستخدام بيئة Simulink: [49] و [3]

تتمتع بيئة البرمجة ماتلاب بأنها تعتمد على منهج برمجي يمكن بواسطته نمذجة، ومحاكاة وتحليل الأنظمة الديناميكية سواء الخطية وبزمن مستمر أو زمن متقطع، ولتسهيل النمذجة تتضمن هذه البيئة أداة لروابط المحاكاة Simulink تمكن البرمجة البيانية الصندوقية وبناء التوابع المناسبة بشكل سهل وبسيط، يسمح بالوصول للبرمجة وتحقيق مخطط يعبر عن المسألة المطروحة. ويمكن أخذ تلك الصناديق البرمجية من مكتبات أداة روابط المحاكاة Simulink الواسعة والشاملة لكل النماذج الممكنة، سواء مكتبة المصادر أو مكتبة الخرج أو الكتلة المعبرة عن الحالات الخطية واللاخطية، أو أدوات الوصل بين تلك الكتلة. كما وتسمح بيئة روابط المحاكاة صياغة وبناء الكتلة وصناديق خاصة بالمستثمر، ويمكن الولوج إلى داخل الكتلة أو الصندوق بالنقر عليها نقراً مزدوجاً فتصبح بمستوى برمجي أعمق وهكذا يمكن التنقل ضمن مستويات مختلفة تعبر عن هيكليّة المسألة المطروحة بشكل واضح.

بعد الانتهاء من تشكيل البنية الصندوقية يمكن إجراء المحاكاة عن طريق التكامل وبطرائق مختلفة، كما ويمكن إظهار النتائج ومراقبتها في أثناء المكاملة باستخدام صناديق الخرج (وحدات الخرج مثل الشاشات scope وغيرها)، والتي تؤمن خيارات كثيرة وطرقاً عديدة لإخراج وإظهار النتائج، أو إرسالها لملف أو تخزينها.

4 - 2 - 1 نمذجة ومحاكاة دائرة كهربائية RL تستسلية في بيئة ماتلاب Matlab\Simulink: [49] و [3]

يبين الشكل رقم (4 - 2) دائرة كهربائية بسيطة تحتو على مقاومة وملف مربوطة على التسلسل.



الشكل رقم (4 - 2)

تكتب معادلة تشغيل هذه الدارة على الشكل:

$$(1 - 4) \quad u = u_1 + u_2 = Ri + L \frac{di}{dt}$$

ولسهولة المحاكاة يمكن وضع المعادلة بالشكل التالي:

$$(2 - 4) \quad \frac{di}{dt} = \frac{1}{L}u - \frac{R}{L}i$$

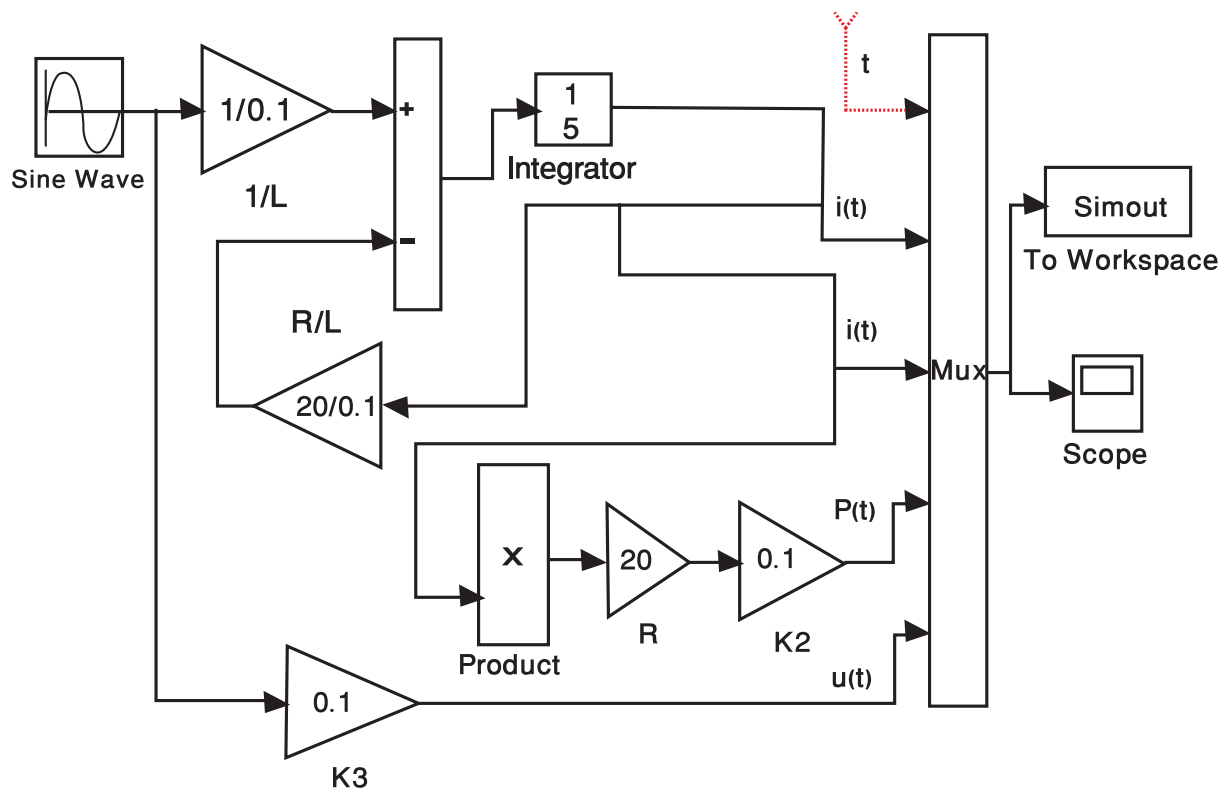
ويتم الحصول على قيمة شدة التيار المار في الدارة، بإجراء تكامل المعادلة التفاضلية، بافتراض أن القيمة الابتدائية للتيار (الشروط الابتدائية) تساوي الصفر $i(0) = 0$ ، وينتج النموذج الرياضي النهائي اللازم لتشكيل مخطط المحاكاة للدائرة الكهربائية بالشكل التالي:

$$(3 - 4) \quad i(t) = \int \left(\frac{1}{L}u - \frac{R}{L}i \right) dt + i_{(0)}$$

كما يمكن تغيير شكل المعادلة السابقة ليصبح كما يلي:

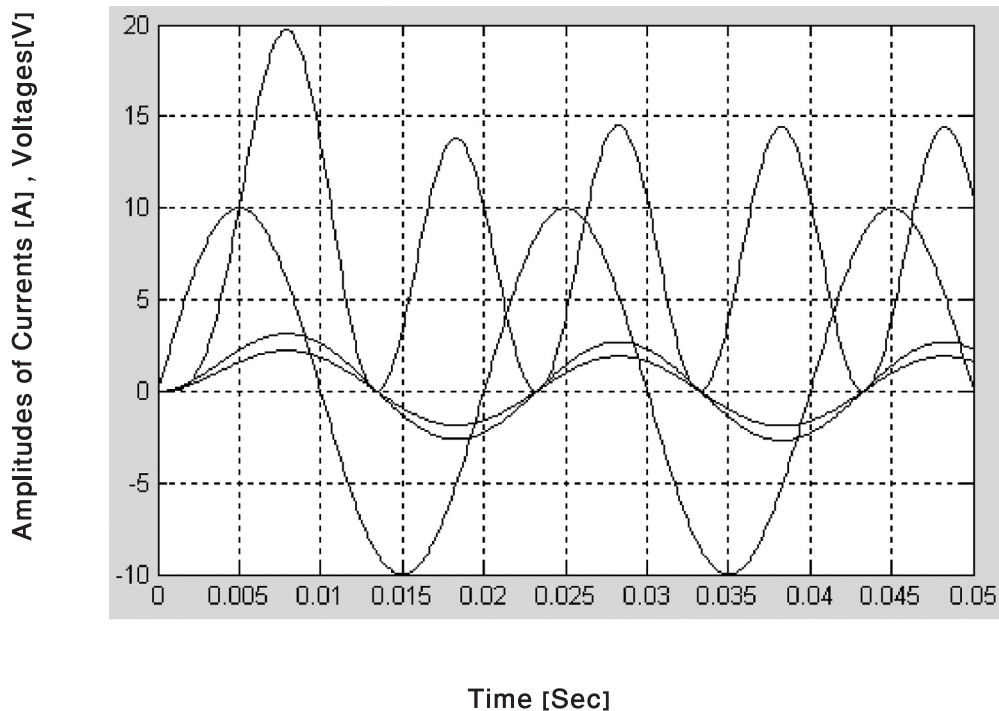
$$(4 - 4) \quad i(t) = \frac{1}{L} \int (u - Ri) dt + i_{(0)}$$

باستخدام أداة روابط المحاكاة Simulink يتم تشكيل المخطط الصندوقي للمحاكاة كما هو مبين في الشكل رقم (4 - 3):



الشكل رقم (4 - 3) المخطط الصندوقي في بيئة ماتلاب لمحاكاة دارة RL تسلسلية

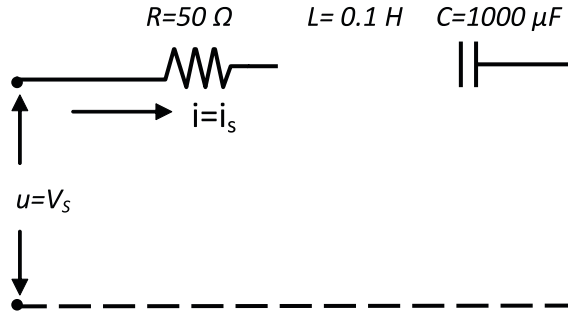
ويبين الشكل (4 - 4) نتائج محاكاة دارة RL تسلسلية في بيئة ماتلاب.



الشكل رقم (4 - 4) نتائج محاكاة دارة RL تسلسلية في بيئة ماتلاب.

4 - 2 - 2 نمذجة ومحاكاة دائرة كهربائية RLC تستعملية في بيئة ماتلاب Matlab\Simulink :

يبين الشكل رقم (4 - 5) دائرة كهربائية بسيطة تحتوي على مقاومة وملف ومكثف مربوطة على التسلسل.



الشكل رقم (4 - 5)

تكتب معادلة تشغيل هذه الدارة على الشكل:

$$(5-4) \quad u = u_1 + u_2 + u_3 = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt$$

ولسهولة المحاكاة يمكن وضع المعادلة بالشكل التالي:

$$(6-4) \quad \frac{di}{dt} = \frac{1}{L}u - \frac{R}{L}i - \frac{1}{LC} \int i dt$$

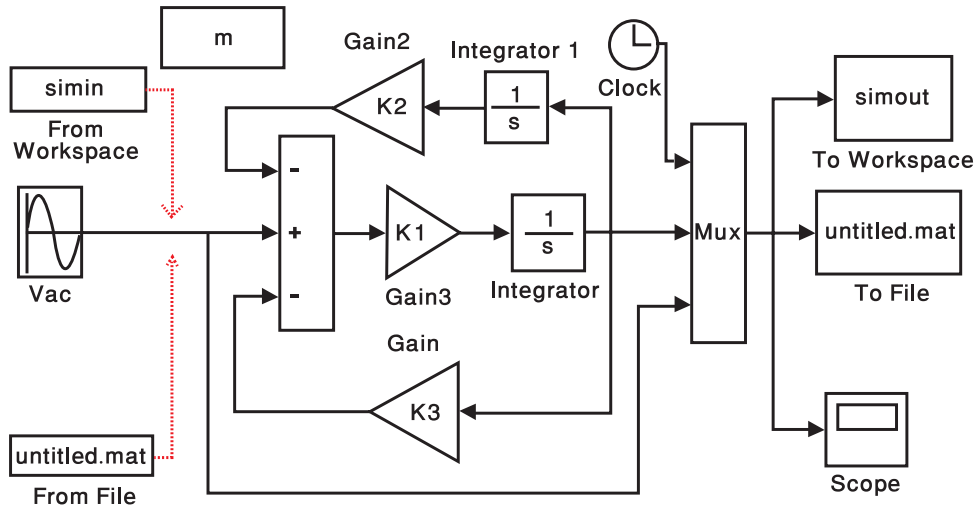
ويتم الحصول على قيمة شدة التيار المار في الدارة، بإجراء تكامل المعادلة التفاضلية، بافتراض أن القيمة الابتدائية للتيار (الشروط الابتدائية) تساوي الصفر $i(0) = 0$ ، وينتج النموذج الرياضي النهائي اللازم لتشكيل مخطط المحاكاة للدائرة الكهربائية بالشكل التالي:

$$(7-4) \quad i(t) = \int \left(\frac{1}{L}u - \frac{R}{L}i - \frac{1}{LC} \int i dt \right) dt + i_{(0)}$$

كما يمكن تغيير شكل المعادلة السابقة ليصبح كما يلي:

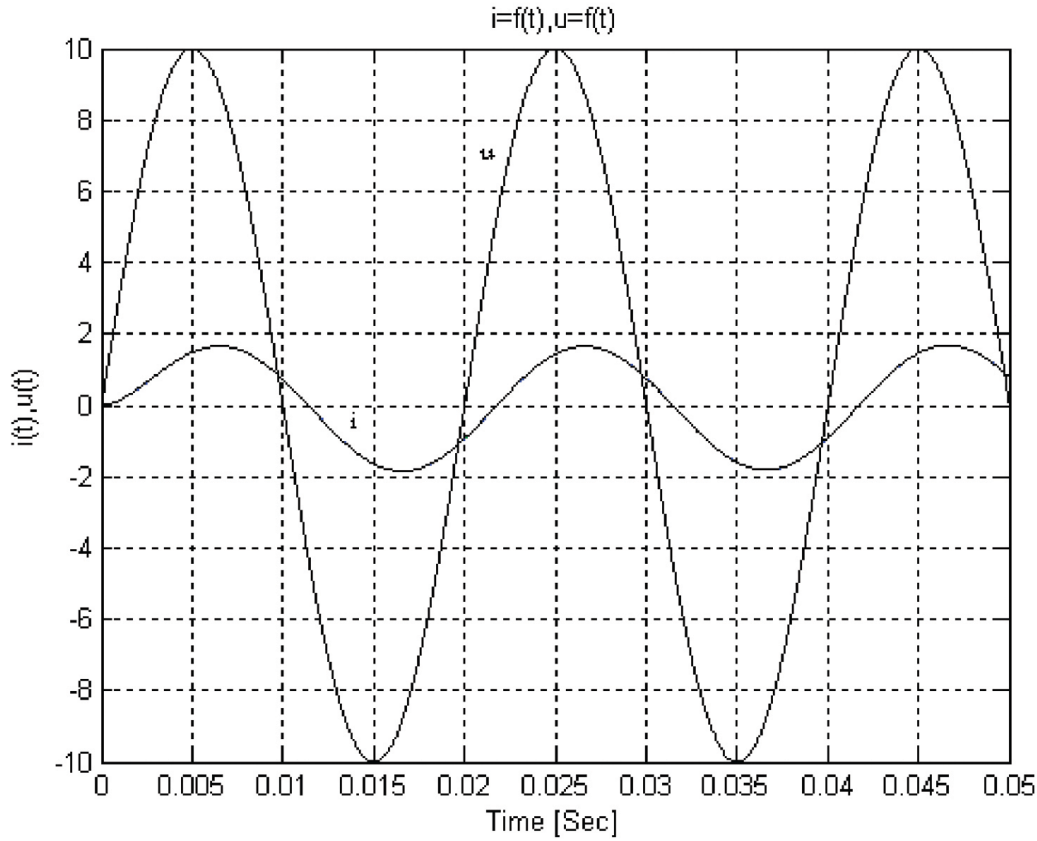
$$(8-4) \quad i(t) = \frac{1}{L} \int (u - Ri - \frac{1}{C} \int i dt) dt + i_{(0)}$$

باستخدام أداة روابط المحاكاة Simulink يتم تشكيل المخطط الصندوقي للمحاكاة كما هو مبين في الشكل رقم (4 - 6):



الشكل رقم (4 - 6) المخطط الصندوقي لمحاكاة دائرة RLC تستعملية في بيئة سيمولينك

ويبين الشكل (4 - 7) نتائج محاكاة دائرة RLC تسلسلية في بيئة Simulink.



الشكل رقم (4 - 7)

4 - 3 نمذجة ومحاكاة الدارات الكهربائية الأساسية باستخدام بيئة Simpower [3] و [50] و [49]

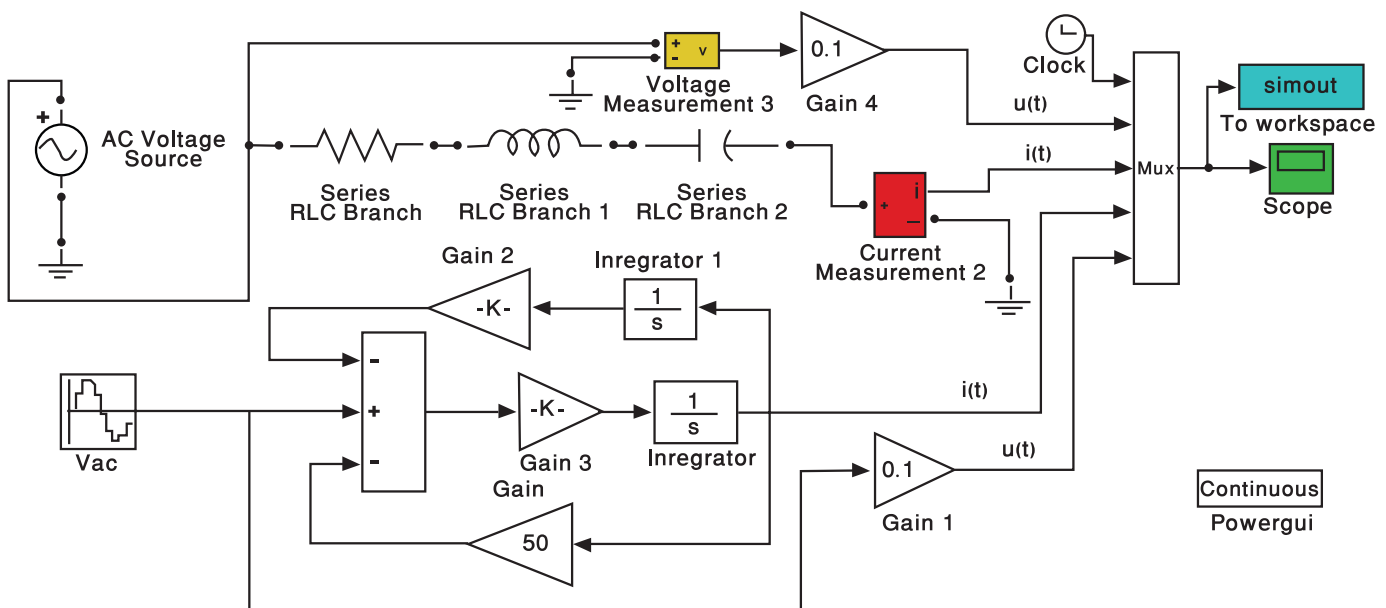
تُعد مكتبة تمثيل ومحاكاة نظم القدرة الكهربائية Simpower system من المكتبات الهامة في بيئة Matlab ، لأنها تختص بنمذجة عناصر نظم القدرة الكهربائية ومحاكاتها.

وقد زودت هذه الأداة بمجموعة من المكتبات الفرعية التي تحتوي على مكونات تمثل عناصر نظم القدرة الكهربائية، وتحاكي العناصر المتوافرة في مكتبة أداة محاكاة Simpower system الغالبية العظمى من عناصر نظام القدرة. وتم ربط كل عنصر من عناصر هذه الأداة بصندوق حوار مع المستثمر، بحيث يتم استدعاء هذا العنصر عند استخدام صندوق الحوار dialog box من أجل إدخال محددات العنصر دون التدخل بشكل النموذج الرياضي لهذا العنصر. فعلى سبيل المثال، زودت المكتبة بمجموعة من العناصر لتمثيل الآلات الكهربائية ومحاكاتها، وعند اختيار أحد تلك العناصر لمحاكاة آلة ما عند شروط معينة، يتطلب الأمر فقط إدخال محددات الآلة من استطاعة وتوتر ومقاومات ومفاعلات وعزم العطالة بالقيم الواحدية أو القيم الحقيقية حسب متطلبات النموذج الرياضي الذي استخدم من قبل المبرمجين في بناء العنصر، دون السماح بالدخول إلى النموذج الرياضي الذي بني من خلاله هذا العنصر.

4-3-1 النمذجة والمحاكاة لدارة تسلسلية RLC باستخدام مكتبة أداة التمثيل والمحاكاة Simpower:

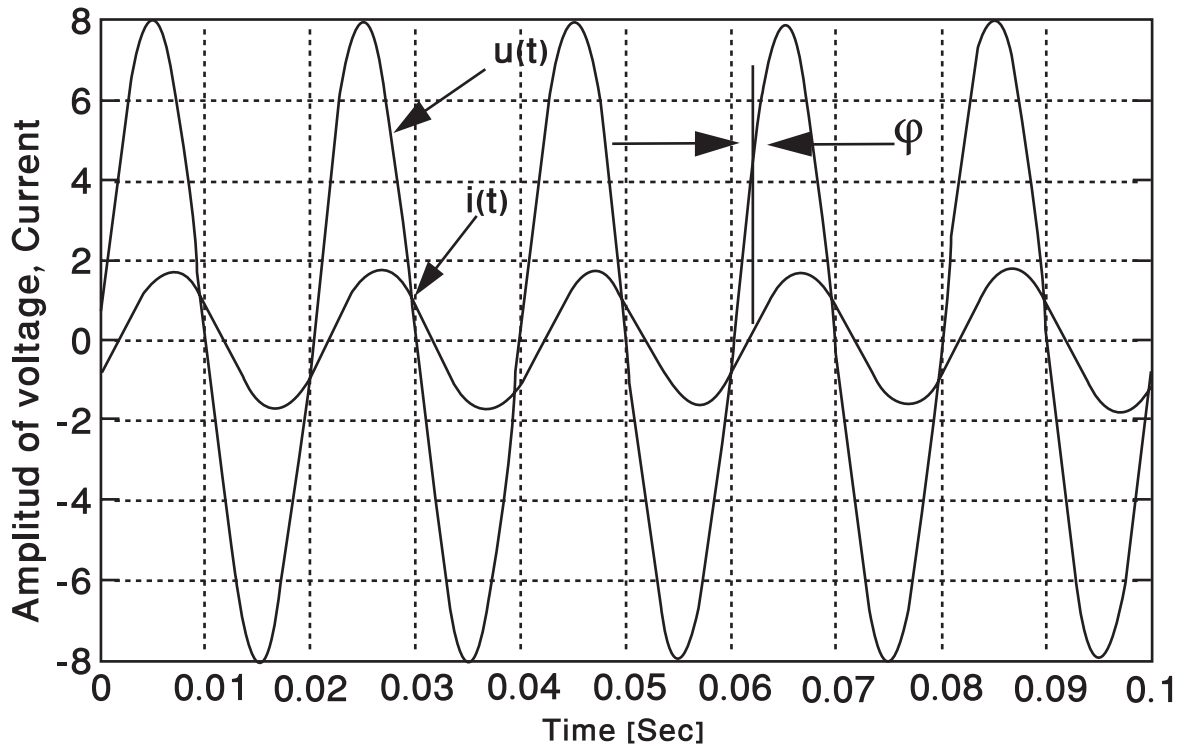
لقد تم وضع مخطط صندوقي لمحاكاة دائرة تسلسلية RLC اعتماداً على العناصر الفيزيائية المتوفرة في مكتبة أداة تمثيل ومحاكاة عناصر نظم القدرة الكهربائية، دون العودة للنموذج الرياضي الذي يحدد معادلة تشغيل الدارة الكهربائية المعتبرة. ونلاحظ من الشكل أنه تم إضافة مجموعة من وسائل القياس بغاية إظهار جميع الإشارات والنتائج من أجل معرفة قيم التيار الكلي والتوترات في جميع أجزاء الدارة من خلال وسيلة قياس التوتر.

وبين الشكل رقم (4 - 8) المخطط الصندوقي للمحاكاة ، حيث تم إضافة العديد من وسائل القياس والإظهار للتعرف على سلوك الدارة من خلال البرمجة.



الشكل رقم (4 - 8) المخطط الصندوقي لمحاكاة دائرة RLC تسلسلية في بيئة Simpower

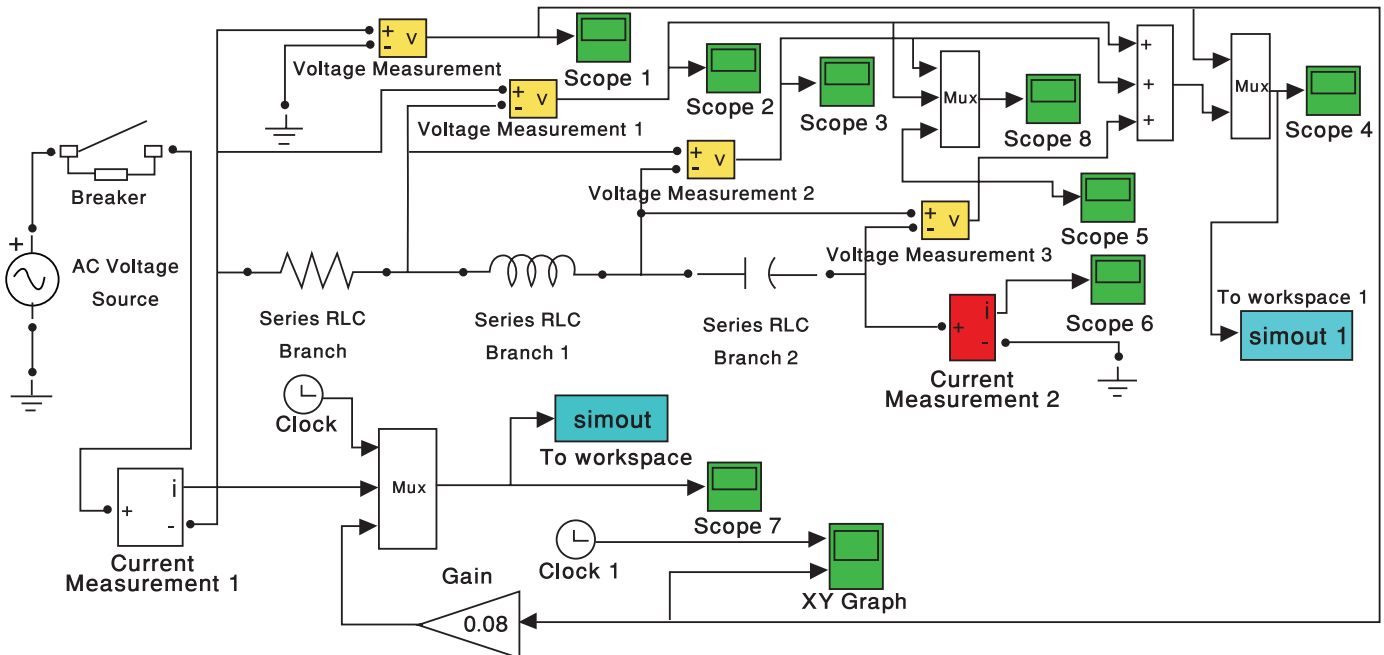
ويبين الشكل (4 - 9) نتائج محاكاة دارة RLC تسلسلية في بيئة Simpower.



الشكل رقم (4 - 9) نتائج المحاكاة لدارة RLC تسلسلية في بيئة Simpower

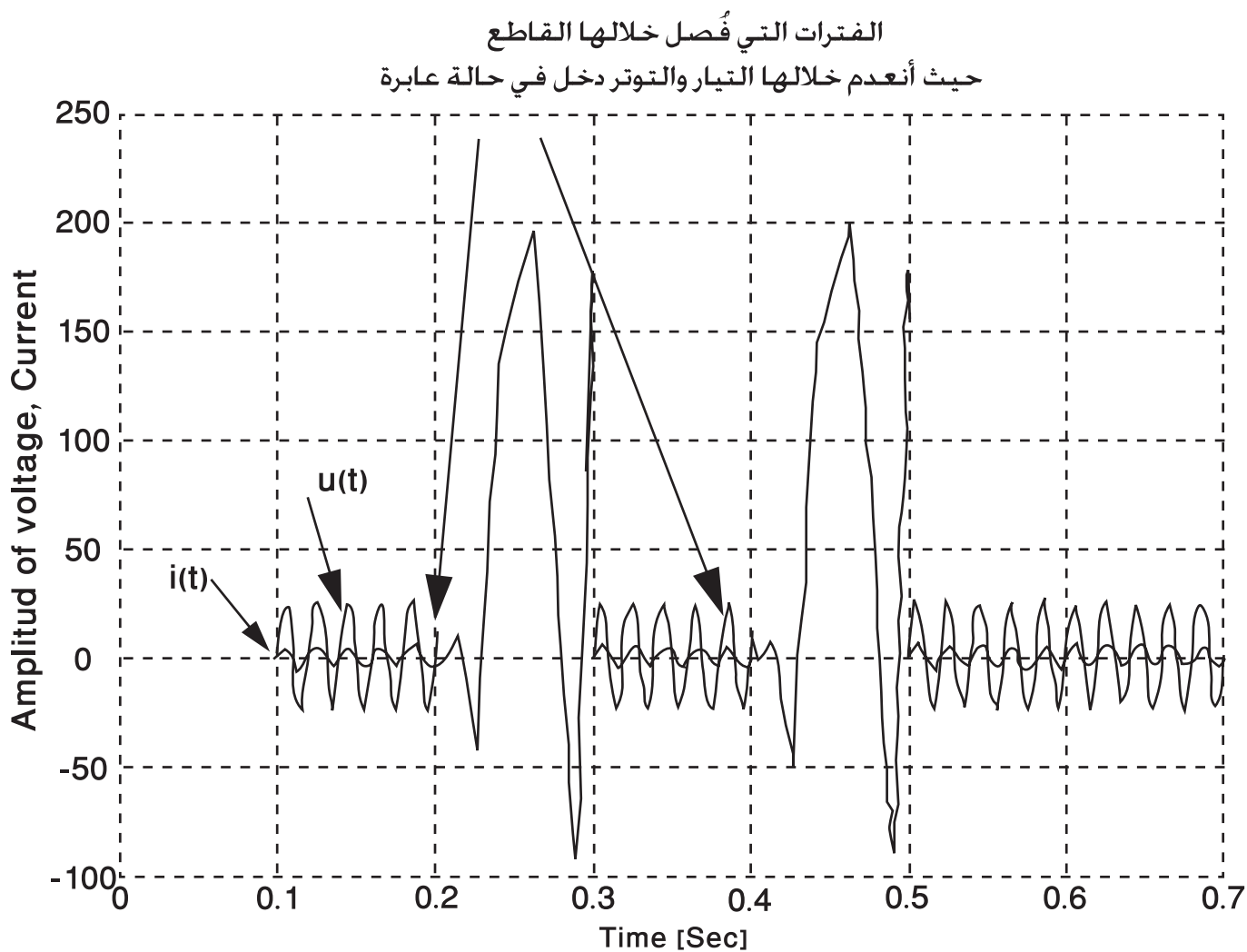
4 - 3 - 2 تمثيل حالة تشغيل الدارة الكهربائية RLC عند فصل ووصل قاطع التغذية باستخدام بيئة Simpower:

لقد تم اضافة قاطع آلي متوفر في مكتبة Simpower الى الدارة RLC التسلسلية لمحاكاة الحالة العابرة التي يمكن أن تنتج عند وصل القاطع وتطبيق التغذية الكهربائية على الدارة، أو عند فصل القاطع الآلي وقطع التغذية عن الدارة الكهربائية. ويبين الشكل رقم (4 - 10) المخطط الصندوقي لمحاكاة الدارة الكهربائية التسلسلية RLC عند وصل قاطع التغذية الآلي وتطبيق التوتر الكهربائي على هذه الدارة، وعند فصل القاطع الآلي وقطع التوتر عن الدارة.



الشكل رقم (4 - 10) المخطط الصندوقي لمحاكاة الدارة الكهربائية التسلسلية RLC مع قاطع الآلي

ويبين الشكل (4 - 11) نتائج محاكاة الدارة التسلسلية RLC باستخدام بيئة عن Simpower اجراء عمليات الوصل والفصل للقاطع الآلي.



الشكل رقم (4 - 11)

الفصل الخامس

نمذجة ومحاكاة عناصر نظم القدرة الكهربائية

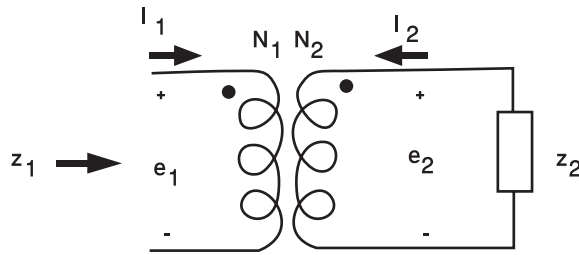
5 - نمذجة ومحاكاة عناصر نظم القدرة الكهربائية

تتم نمذجة ومحاكاة عناصر نظم القدرة الكهربائية من مولدات ومحولات وخطوط، انطلاقاً من معادلات تشغيل هذه العناصر ومن الدارات الكهربائية المكافئة لها. وقد تم وضع النموذج الرياضي لكل عنصر منها وجرى تمثيل ومحاكاة هذه النماذج الرياضية باستخدام بيئة برنامج Matlab\Simulink أولاً ثم باستخدام بيئة مكتبة أداة التمثيل والمحاكاة Simpower.

5 - 1 نمذجة ومحاكاة المحولات الكهربائية: [62] و [60] و [54]

5 - 1 - 1 نمذجة ومحاكاة المحولات الكهربائية باستخدام بيئة برنامج Matlab\Simulink

يبين الشكل رقم (5 - 1) الدارة الكهربائية المكافئة للمحولة الكهربائية ثنائية الملفات وأحادية الطور. ويتم تحديد معادلات تشغيل هذه المحولة بتطبيق قوانين كيرشوف الأول والثاني وقانون التحريض الكهروضيقي وقانون التدفق الكهروضيقي.



الشكل رقم (5 - 1) الدارة الكهربائية المكافئة للمحولة الكهربائية ثنائية الملفات وأحادية الطور

وتكتب معادلات التوتر للمحولة كما يلي:

$$\begin{cases} (1-5) & v_1 = i_1 r_1 + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_1}{dt} \\ (2-5) & v'_2 = i'_2 r'_2 + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi'_2}{dt} \end{cases}$$

أما معادلات الفيض المغناطيسي الذاتي لكل ملف والفيض المغناطيسي المتبادل فتأخذ الشكل:

$$(3-5) \begin{cases} \psi_1 = \omega_b \lambda_1 = X_{\ell 1} i_1 + \psi_m \\ \psi'_2 = \omega_b \lambda'_2 = X'_{\ell 2} i'_2 + \psi_m \\ \psi_m = \omega_b L_{m1} (i_1 + i'_2) = X_{m1} (i_1 + i'_2) \end{cases}$$

وتوضع معادلات التيارات كما يلي:

$$(4-5) \begin{cases} i_1 = \frac{\psi_1 - \psi_m}{X_{\ell 1}} \\ i'_2 = \frac{\psi'_2 - \psi_m}{X'_{\ell 2}} \end{cases}$$

ولتسهيل عملية التمثيل والمنذجة توضع معادلات الفيض المغناطيسي المختلفة على شكل تكامل فتصبح كما يلي:

$$(5-5) \begin{cases} \psi_1 = \int \left[\omega_b v_1 - \omega_b r_1 \left(\frac{\psi_1 - \psi_m}{X_{\ell 1}} \right) \right] dt \\ \psi'_2 = \int \left[\omega_b v'_2 - \omega_b r'_2 \left(\frac{\psi'_2 - \psi_m}{X'_{\ell 2}} \right) \right] dt \end{cases}$$

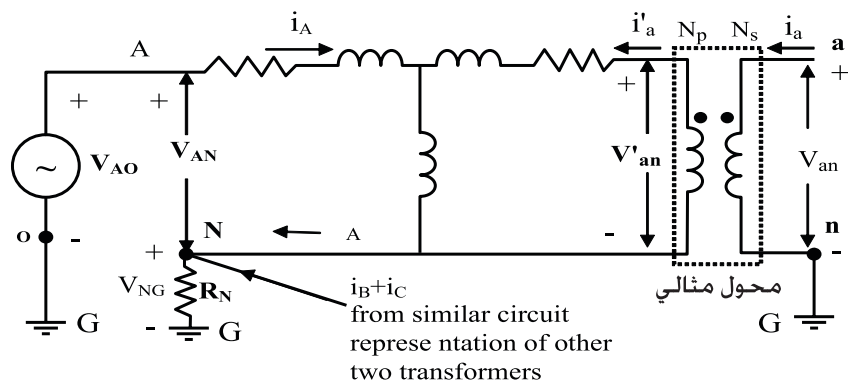
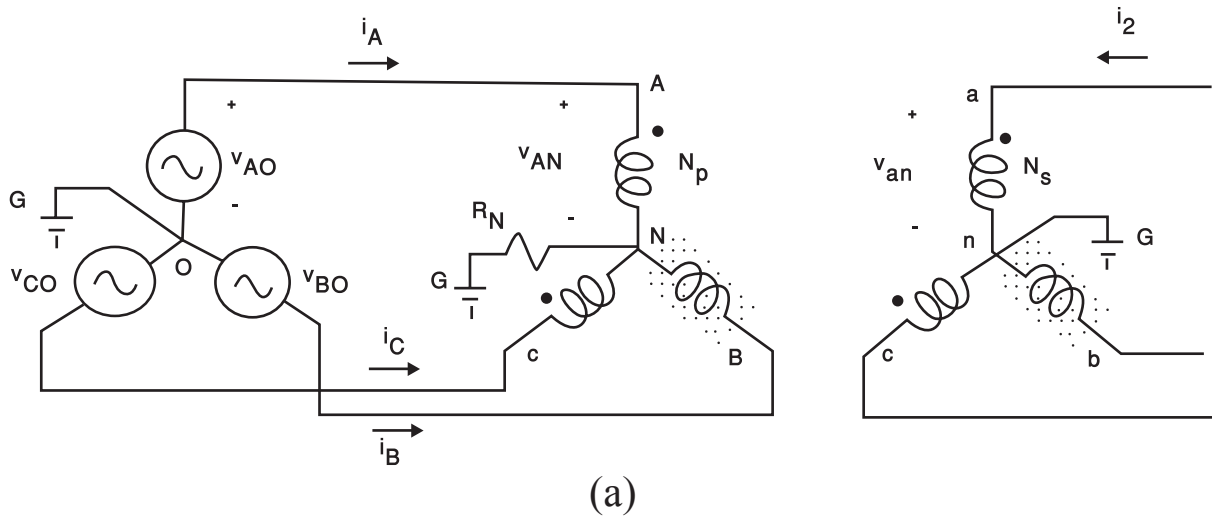
يمكن استناداً الى هذه المعادلات وضع نموذج المحاكاة والتمثيل الملائم.

5-1-2 نمذجة ومحاكاة المحولات الكهربائية الثلاثية ذات الربط نجمي نجمي Y/Y باستخدام بيئة برنامج

Matlab\Simulink: [62] و [60] و [54]

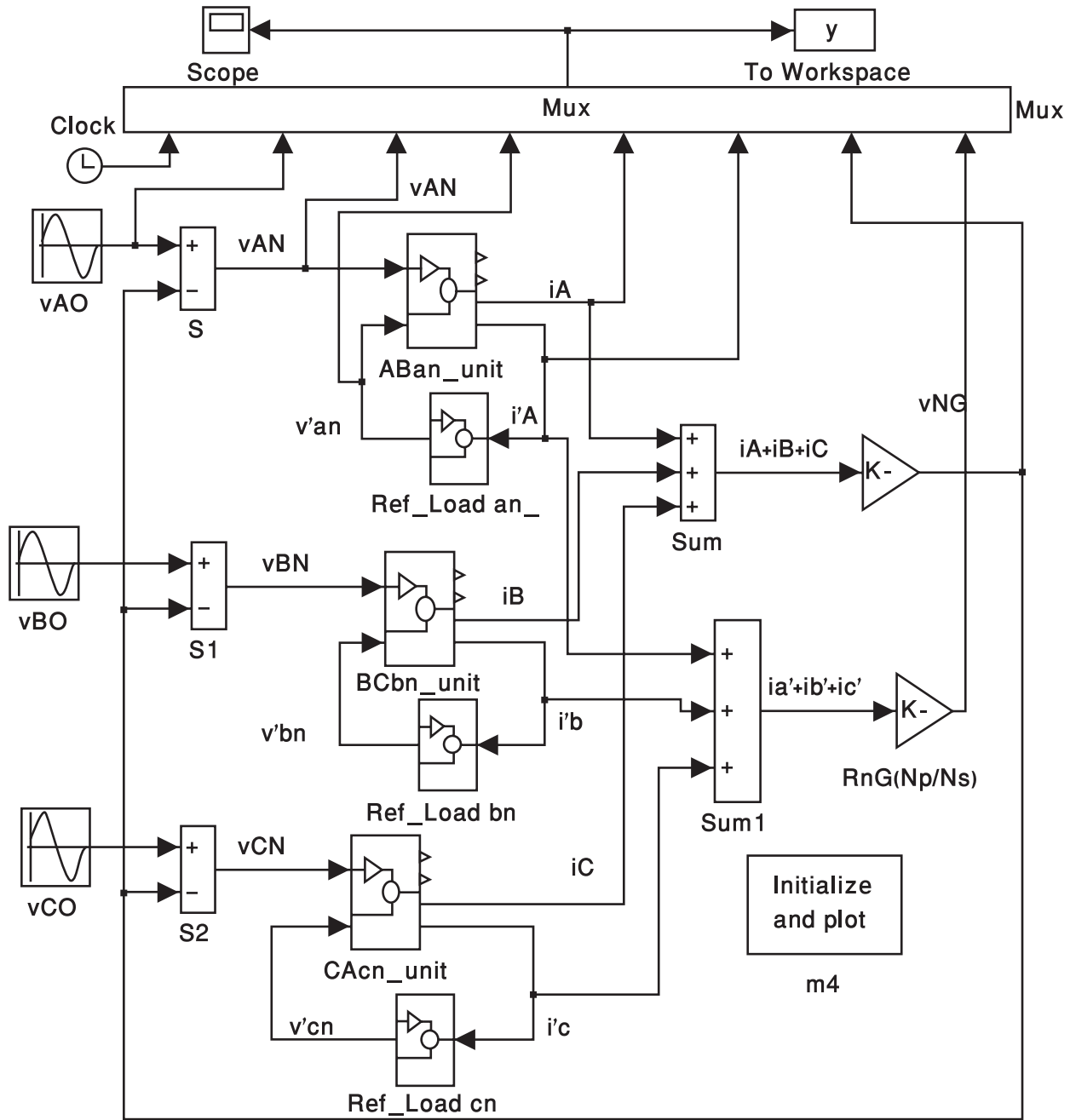
تتم عملية النمذجة للمحولات ثلاثية الطور اعتماداً على مخطط نمذجة المحولات الأحادية الطور، حيث يبين الشكل رقم (5-2) مخططاً لدارة المحولة موصولة إلى منبع التغذية والدائرة المكافئة الموافقة، وتظهر فيه جميع التفاصيل اللازمة لعملية النمذجة التي ستنتم لهذا النوع من توصيل المحولة.

ومن أجل التوضيح، فقد تم تأريض نقطة النجمة في الملف الابتدائي من خلال مقاومة، أما نقطتا النجمة لكلٍ من الطرف الثانوي والمنبع، فقد تم تأريضهما بشكل مباشر إلى الأرض. بما أن نقطة الحياضي للملف الابتدائي للمحول غير مؤرضة مباشرة فإن توترها سيكون عائماً.



الشكل رقم (5-2) مخططاً لدارة المحولة موصولة إلى منبع التغذية والدائرة المكافئة

يتضمن الشكل رقم (5 - 2 - b) الدارة المكافئة لتمثيل طور واحد فقط من الأطوار الثلاثة للمحول. ويبين الشكل رقم (5 - 3) المخطط الصندوقي لمحاكاة وتمثيل المحولة الكهربائية ثلاثية الأطوار المربوطة في مجموعة توصيل نجمي - نجمي Y/Y .



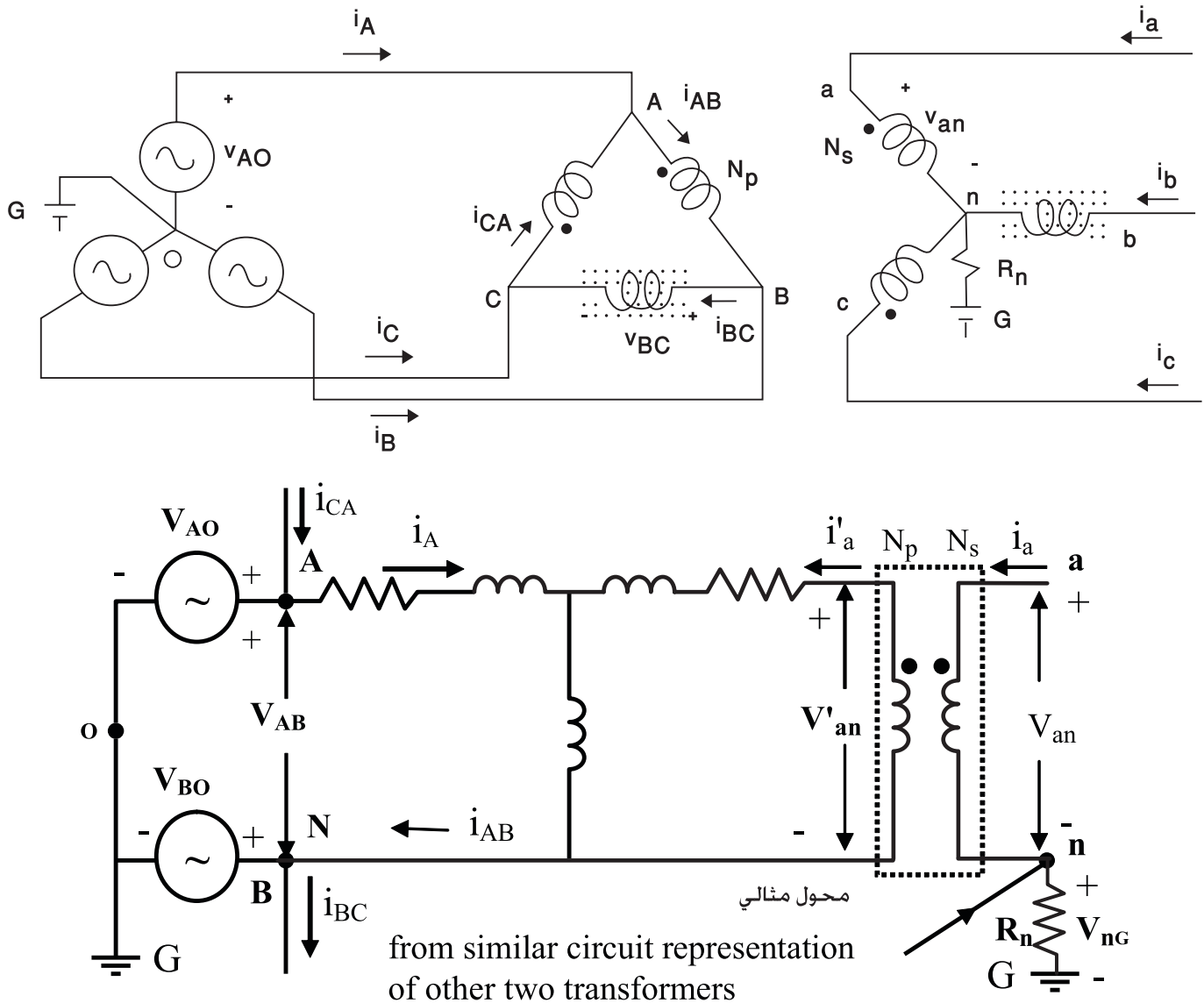
الشكل رقم (5 - 3) المخطط الصندوقي لمحاكاة وتمثيل المحولة الكهربائية ثلاثية الأطوار المربوطة في مجموعة توصيل نجمي - نجمي Y/Y .

5 - 1 - 3 نمذجة ومحاكاة المحولات الكهربائية الثلاثية ذات الربط نجمي مثلثي D/Y باستخدام بيئة برنامج

Matlab\Simulink : [62] و [60] و [54]

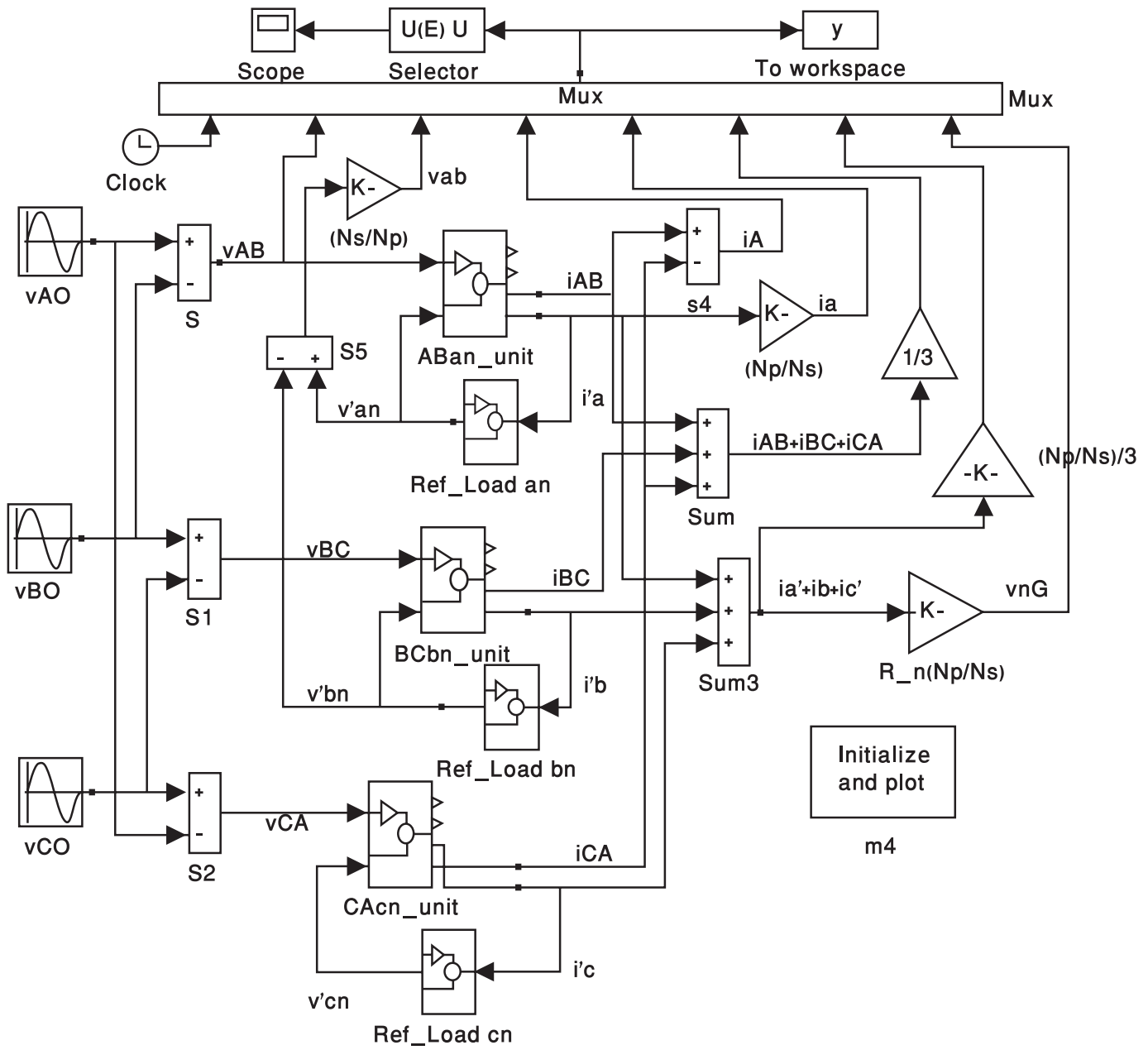
يبين الشكل رقم (4 - 5) الدارة المكافئة لمحول موصول بشكل مثلثي - نجمي مع منبع تغذية. حيث تكون نقطة الحيادي (n) في ثانوي المحول مؤرضة من خلال مقاومة.

يتم وضع المخطط الصندوقي لمحاكاة وتمثيل المحولة ثلاثية الطور ذي التوصيل نجمي/مثلثي استناداً الى معادلات تشغيل المحولة (5 - 1) و (5 - 2) و (5 - 3) و (5 - 4) و (5 - 5).



الشكل رقم (4 - 5) توصيل المحولة نجمي / مثلثي والدارة المكافئة للمحولة

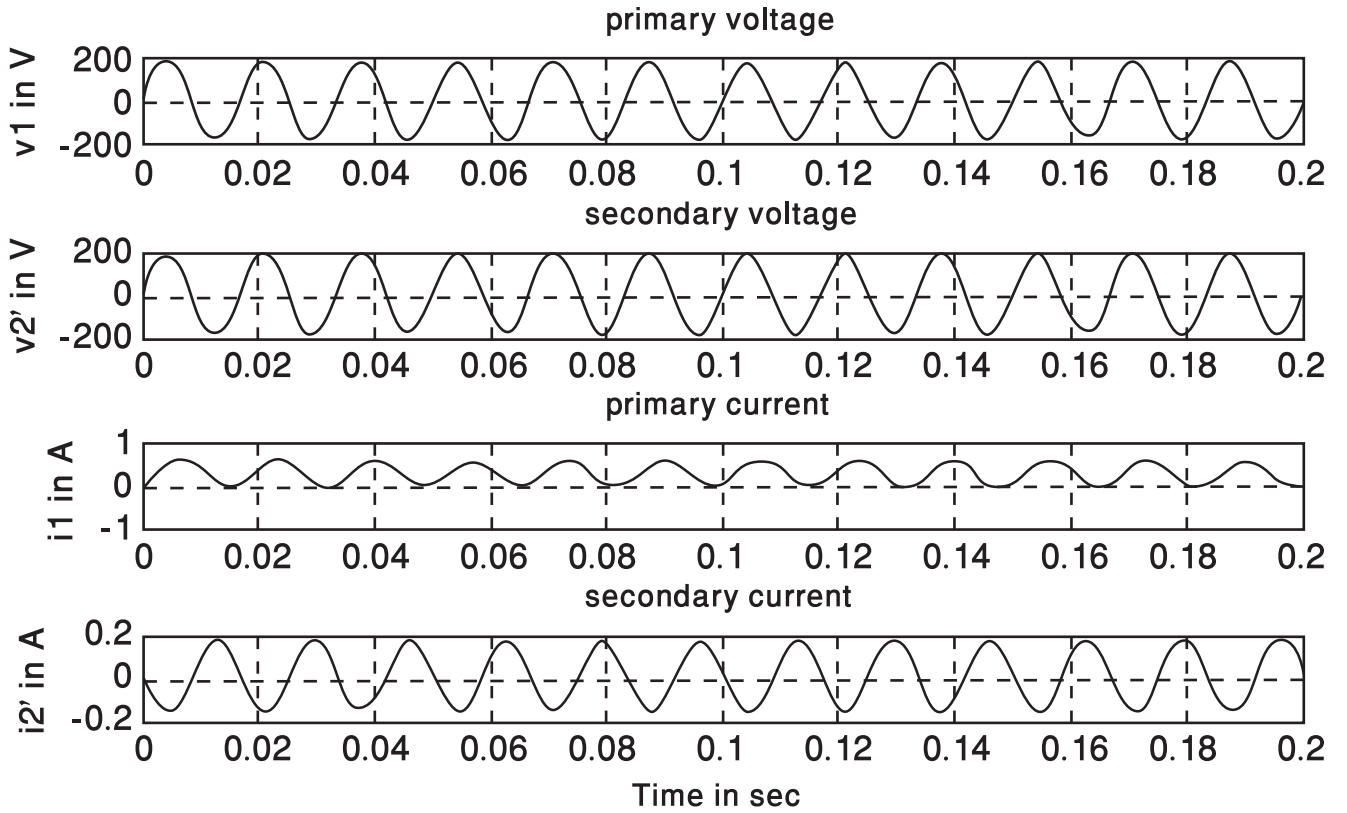
ويبين الشكل رقم (5 - 5) المخطط الصندوقي لتمثيل ومحاكاة محولة كهربائية ثلاثية الأطوار موصولة نجمي / مثلثي. في هذه الحالة لتمثيل ومحاكاة المحولة ثلاثية الأطوار تم اعتماد الفرضية أن جميع عناصر المحولة ومحدداتها تكون متناظرة على الأطوار الثلاثة، الأمر الذي يسمح بدراسة المحولة وكأنها محولة أحادية الطور، وبعد الحصول على النتائج يتم تعميمها على بقية الأطوار مع الأخذ بعين الاعتبار فرق الصفحة الكهربائي بين التوترات والتيارات التي تطبق أو التي تنتج في الأطوار الثلاثة.



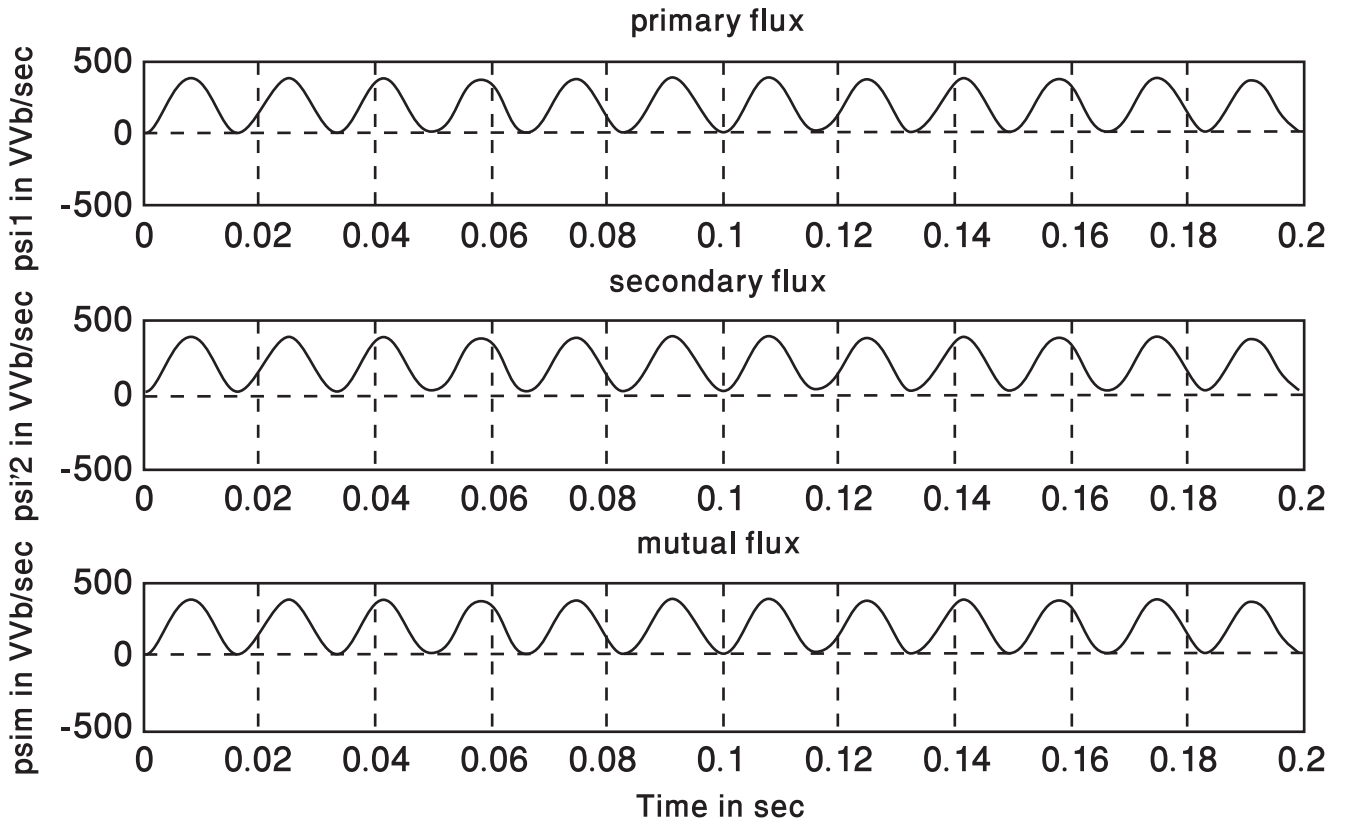
الشكل رقم (5 - 5) المخطط الصندوقي لتمثيل ومحاكاة محولة كهربائية ثلاثية الأطوار موصولة نجمي / مثلثي.

ويعطي الشكل رقم (5 - 6) نتائج المحاكاة والتي تمثل تغيرات التيارات وتغيرات التوترات في الملف الأولي وفي الملف الثانوي للمحولة ثلاثية الأطوار المربوطة بشكل نجمي/مثلثي.

ويبين الشكل رقم (5 - 7) تغيرات الفيض المغناطيسي الذاتي في الملف الأولي وفي الملف الثانوي وكذلك الفيض المتبادل بين الملفين.



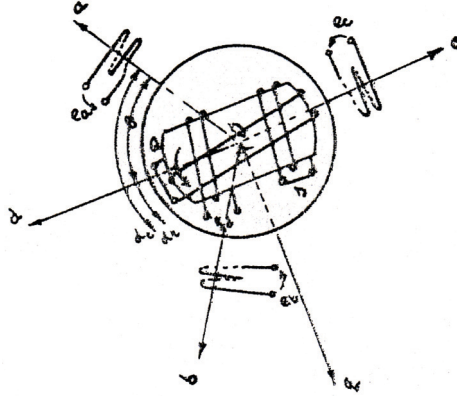
الشكل (5 - 6) تغيرات التيارات والتوترات في ملفات المحولة الكهربائية ثلاثية الأطوار الموصولة بشكل نجمي / مثلثي



الشكل رقم (5 - 7) تغيرات الفيض الذاتي في الملف الأول وفي الملف الثاني وتغيرات الفيض المتبادل

5 - 2 نمذجة ومحاكاة المولدات الكهربائية باستخدام بيئة برنامج Matlab\Simulink : [63] و [62] و [61] و [54]

يبين الشكل رقم (5 - 8) الدارة الكهربائية المكافئة للمولد الكهربائي. ويتم تحديد معادلات تشغيل هذا المولد بتطبيق قوانين كيرشوف الأول والثاني وقانون التحريض الكهروضي وقانون التدفق الكهروضي استناداً الى هذه الدارة المكافئة، حيث نفترض أن المولد الكهربائي هو



الشكل رقم (5 - 8)

الدارة المكافئة للمولد الزمني للمحور الطولاني d ويتوضع الآخر على المحور العرضاني q للدوار. يتم تحديد معادلات تشغيل المولد الكهربائي نسبة الى محاور احداثيات بارك Park كما يلي:
- معادلات التوترات الرئيسية:

$$(5-6) \left\{ \begin{array}{l} u_d = r_a \cdot i_d + p \psi_d - \omega \cdot \psi_q \\ u_q = r_a \cdot i_q + p \psi_q - \omega \cdot \psi_d \\ u_f = r_f \cdot i_f + p \psi_f \end{array} \right.$$

- معادلات توترات التخميد:

$$(5-7) \left\{ \begin{array}{l} u_D = r_D \cdot i_D + p \psi_D = 0 \\ u_Q = r_Q \cdot i_Q + p \psi_Q = 0 \end{array} \right.$$

- معادلات الفيوض المغناطيسية الرئيسية:

$$(5-8) \left\{ \begin{array}{l} u_d = r_a \cdot i_d + p \psi_d - \omega \psi_q \\ u_q = r_a \cdot i_q + p \psi_q - \omega \psi_d \\ u_f = r_f \cdot i_f + p \psi_f \end{array} \right.$$

- معادلات الفيوض المغناطيسية المتبادلة:

$$(5-9) \left\{ \begin{array}{l} \psi_{md} = x_{md} \cdot (-i_d + i_f + i_D) \\ \psi_{mq} = x_{mq} \cdot (-i_q + i_Q) \end{array} \right.$$

- معادلة العزوم:

$$(5-10) m_e = \psi_d i_q - \psi_q i_d$$

- معادلة العزوم الميكانيكية:

$$(5-11) p\omega = 1 / \tau (m_a - m_e)$$

- معادلات الحمل الكهربائي:

$$(12-5) \begin{cases} p i_d = u_d / X_\ell - (r_\ell / X_\ell) \cdot i_d + i_q \\ p i_q = u_q / X_\ell - (r_\ell / X_\ell) \cdot i_q - i_d \end{cases}$$

حيث:

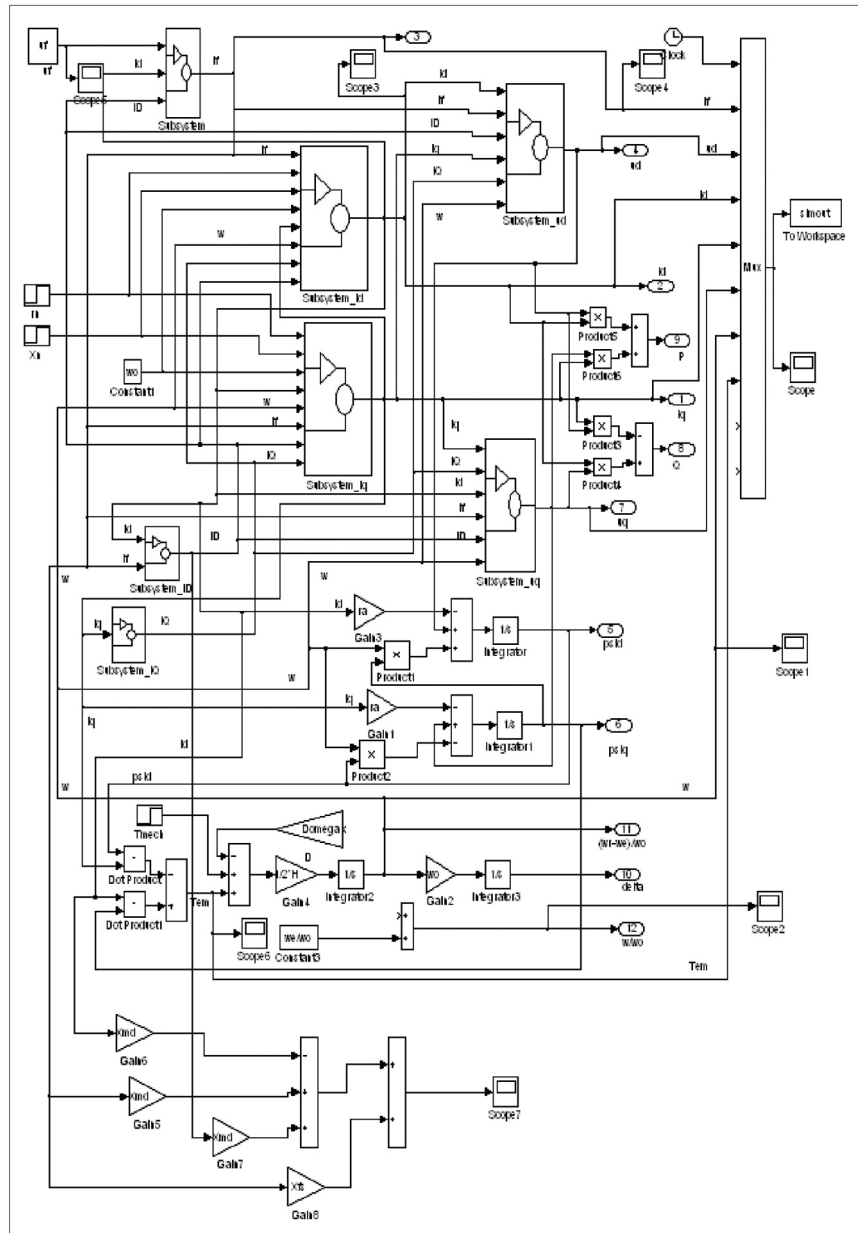
$$p = d / dt \quad , \quad \tau = (J \cdot \omega_0) / M_0$$

وقد تم في هذه المعادلات افتراض أن:

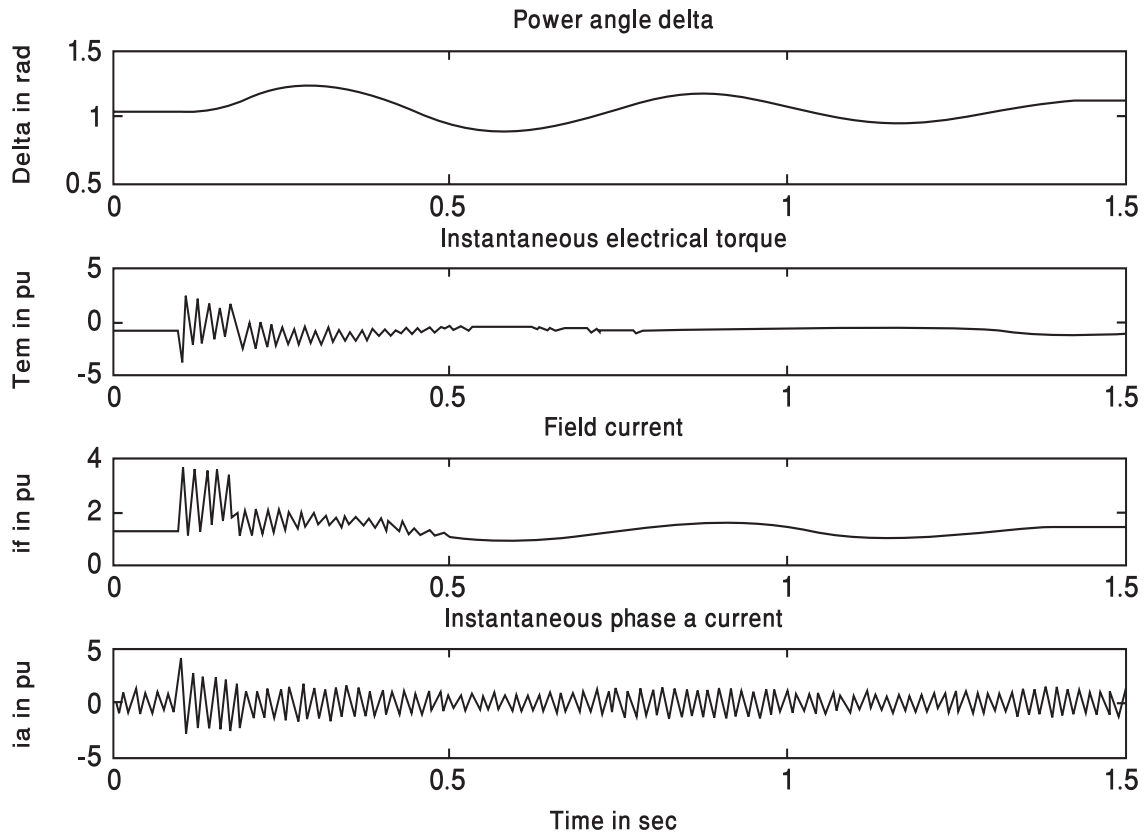
$$X_{ad} = X_{md} \quad , \quad X_{aq} = X_{mq}$$

الأمر الذي يعني أن عوامل التحريض المتبادل بين الملفات التي تقع على محور واحد تنتج متساوية.

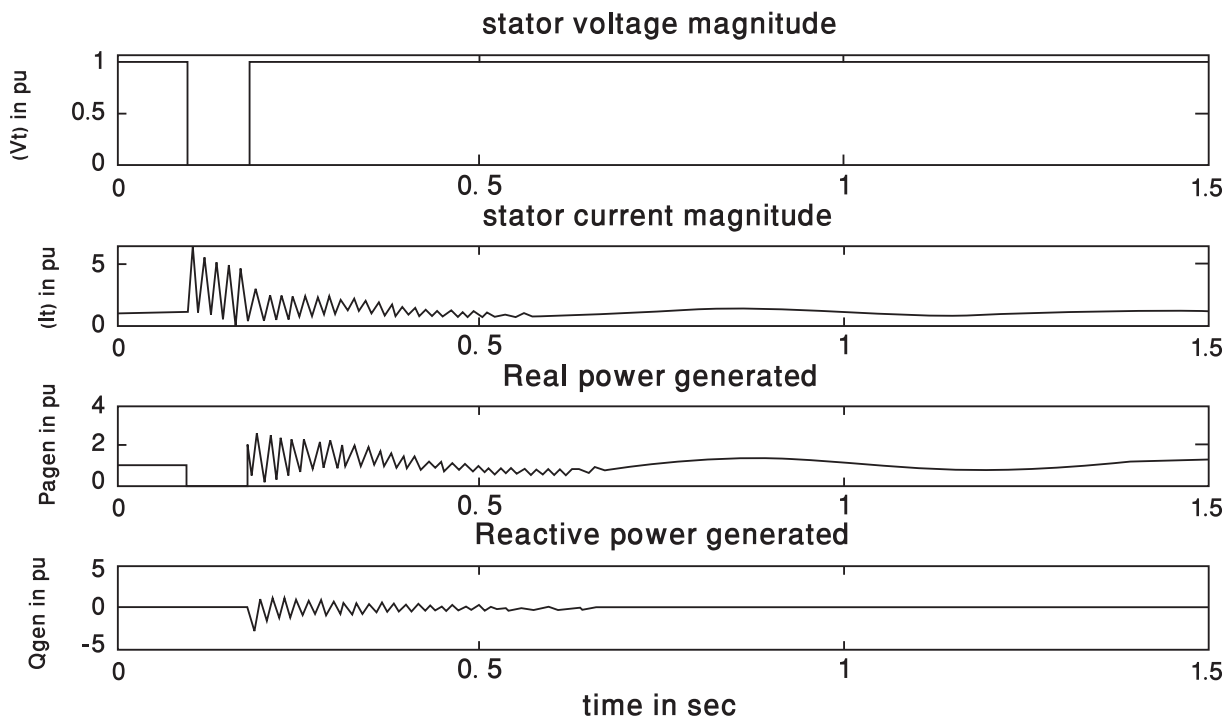
يبين الشكل رقم (5 - 9) المخطط الصندوقي لتمثيل ومحاكاة مولد كهربائي. أما الشكل رقم (5-10) فيعطي تغيرات i_a , i_f , T_{em} , δ عند حالة قصر مباشر على أقطاب المولد، ويعطي الشكل رقم (5 - 11) تغيرات التوترات.



الشكل رقم (5 - 9) فيبين المخطط الصندوقي لتمثيل ومحاكاة مولدة كهربائية.



الشكل رقم (5 - 10) تغيرات δ , T_{em} , i_f , i_a عند حالة قصر مباشر على أقطاب المولد



الشكل رقم (5 - 11) تغيرات $V(t)$, $i(t)$, P_{gen} , Q_{gen} عند حالة قصر مباشر على أقطاب المولد

5- 3 نمذجة ومحاكاة الخطوط الكهربائية باستخدام بيئة برنامج ماتلاب Matlab\Simulink : [62] و [59] و [54] و [50] و [49]

تعتمد مسألة تمثيل ومحاكاة الخطوط الكهربائية على معادلات تشغيل هذه الخطوط استناداً على اختيار الدارة الكهربائية المكافئة للخط الكهربائي والتي يمكن أن تكون:

- دائرة رباعي أقطاب على شكل π .
- دائرة رباعي أقطاب على شكل T.
- سلسلة دائرة رباعيات أقطاب على شكل π .
- سلسلة دائرة رباعيات أقطاب على شكل T.

تصنف الخطوط الكهربائية بحسب أطوالها كما يلي:

- الخطوط القصيرة ولا يزيد طولها عن 80 كم.
- الخطوط المتوسطة والتي يتراوح طولها ما بين 80 و 160 كم.
- الخطوط الطويلة والتي يزيد طولها عن 160 كم.

تمثل الخطوط الكهربائية القصيرة والمتوسطة في الدارات الكهربائية بواسطة رباعي أقطاب على شكل π , وعندها يمكن أن تعتبر السعة المكافئة للخط مركزة في منتصف الخط، أو على شكل T وعندها يمكن أن تعتبر السعة مجزأة إلى جزأين واحد في بداية الخط وواحد في نهايته. أما بالنسبة للخطوط الطويلة فتعتبر سعتها المكافئة موزعة بانتظام على طول الخط وذلك للحصول على نتائج دقيقة. تكتب معادلات الخطوط الكهربائية على الشكل التالي:

$$(5-13) \left\{ \begin{array}{l} \underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cdot \text{Cosh} \theta \ell + \underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_C \text{Sh} \theta \ell \\ \underline{I}_1 = \underline{U}_2 / \underline{Z}_C \text{Sh} \theta \ell + \underline{I}_2 \cdot \text{Cosh} \theta \ell \\ \theta \ell = \sqrt{\underline{Z} \underline{Y}} \end{array} \right.$$

وإذا أخذنا بعين الاعتبار أن :

فان هذه المعادلات تأخذ الشكل التالي :

$$(5-14) \left\{ \begin{array}{l} \underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cdot \text{Cosh} \sqrt{\underline{Z} \underline{Y}} + \sqrt{\frac{\underline{Z}}{\underline{Y}}} \cdot \underline{I}_2 \cdot \text{Sh} \sqrt{\underline{Z} \underline{Y}} \\ \underline{I}_1 = \sqrt{\frac{\underline{Z}}{\underline{Y}}} \underline{U}_2 \text{Sh} \sqrt{\underline{Z} \underline{Y}} + \underline{I}_2 \cdot \text{Cosh} \sqrt{\underline{Z} \underline{Y}} \end{array} \right.$$

حيث لدينا

$$\theta \ell = \sqrt{\underline{Z} \underline{Y}} = \alpha + j \beta$$

α ثابتة التخميد على الخط β زاوية إزاحة طور الأمواج المسافرة على الخط.

$\underline{Z}_C$ الممانعة المميزة للخط ، وتحسب بالعلاقة التالية:

$$\underline{Z}_C = \sqrt{\frac{\underline{Z}}{\underline{Y}}}$$

يمكن كتابة معادلات الخط الكهربائي المنشورة نسبة لتوتر و تيار الإرسال كما يلي :

$$(5-15) \left\{ \begin{array}{l} \underline{U}_2 = \underline{U}_1 \cdot \text{Cosh} \sqrt{\underline{Z} \underline{Y}} + \sqrt{\frac{\underline{Z}}{\underline{Y}}} \cdot \underline{I}_1 \cdot \text{Sh} \sqrt{\underline{Z} \underline{Y}} \\ \underline{I}_2 = \sqrt{\frac{\underline{Z}}{\underline{Y}}} \underline{U}_1 \text{Sh} \sqrt{\underline{Z} \underline{Y}} + \underline{I}_1 \cdot \text{Cosh} \sqrt{\underline{Z} \underline{Y}} \end{array} \right.$$

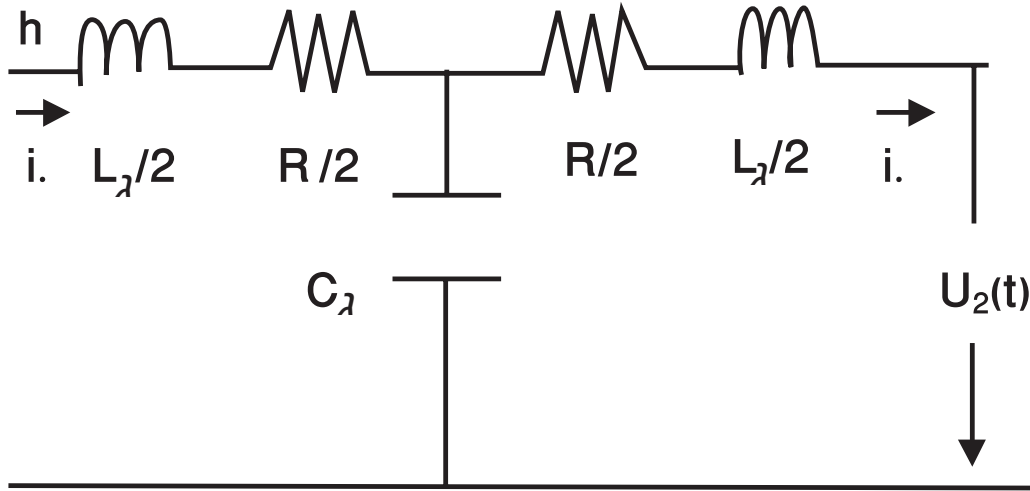
وعند تمثيل الخط الكهربائي برباعي أقطاب مكافئ فان معادلات رباعي الأقطاب تكتب على الشكل التالي:

$$(16-5) \begin{cases} \underline{U}_1 = A \underline{U}_2 + B \underline{I}_2 \\ \underline{I}_1 = C \underline{U}_2 + D \underline{I}_2 \end{cases}$$

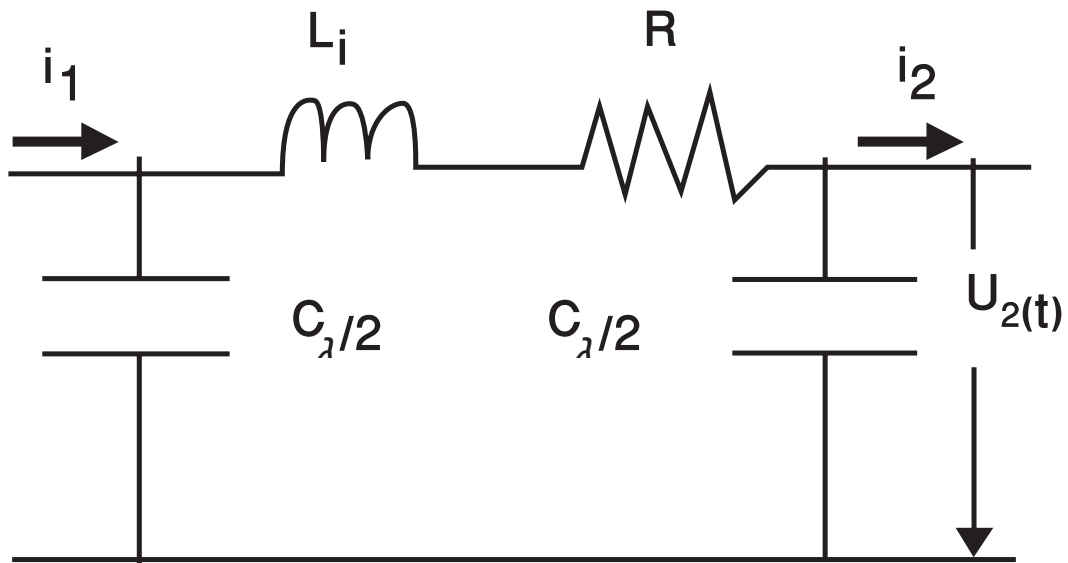
بمقارنة المعادلات (5 - 15) و (5 - 16) يمكن تحديد ثوابت رباعي الأقطاب المكافئ للخط كما يلي:

$$(17-5) \begin{cases} \sqrt{Z.Y} & A = D = \text{Cosh} \\ \sqrt{Z.Y} \cdot \text{Sh} \sqrt{\frac{Z}{Y}} & B = \\ \sqrt{\frac{Y}{Z}} & C = \cdot \text{Sh} \sqrt{Z.Y} \end{cases}$$

إن الخصائص الأساسية للخطوط الكهربائية هي : المقاومة والمحاوضة و السعة والناقلية. وتكون المقومة والمحاوضة عناصر تسلسلية وتشكلان الممانعة التسلسلية للخط، وتكون السعة والناقلية عناصر تفرعية وتشكلان المسابرة التفرعية للخط. ويبين الشكل رقم (5 - 12) والشكل رقم (5 - 12) الدارة المكافئة للخط الكهربائي على شكل رباعي أقطاب T وعلى شكل رباعي أقطاب π

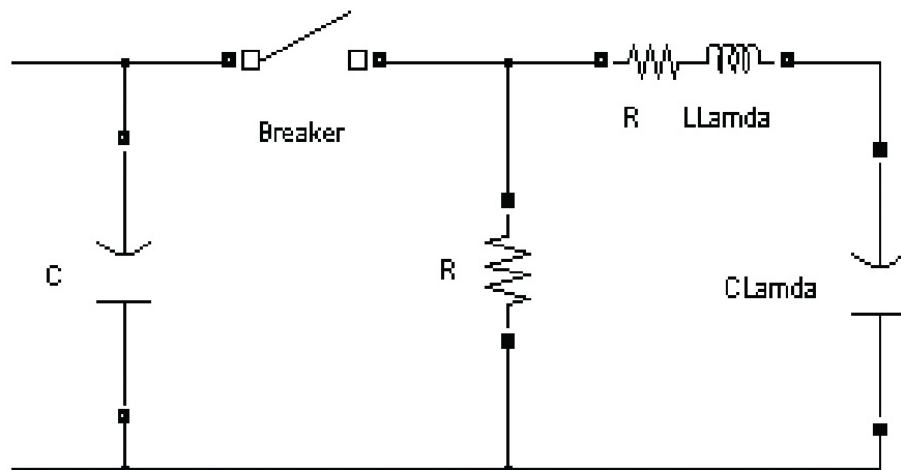


الشكل رقم (5 - 12) الدارة المكافئة للخط الكهربائي على شكل رباعي أقطاب T

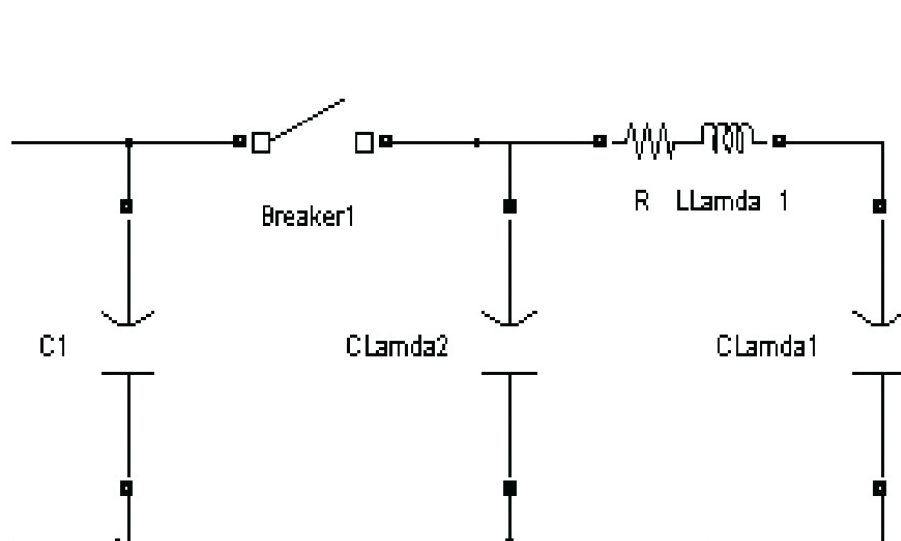


الشكل رقم (5 - 13) الدارة المكافئة للخط الكهربائي على شكل رباعي أقطاب π

يبين الشكل رقم (5 - 14) المخطط الصندوقي لتمثيل ومحاكاة رباعي الأقطاب المكافئة للخطوط الكهربائية باستخدام العناصر الكهربائية في بيئة برنامج Simpower .



رباعي أقطاب T



رباعي أقطاب π

الفصل السادس

الظواهر العابرة الكهرومغناطيسية في الشبكات الكهربائية
والتوترات الزائدة التي تنتج عنها

6 - الظواهر العابرة الكهرومغناطيسية في الشبكات الكهربائية والتوترات الزائدة التي تنتج عنها

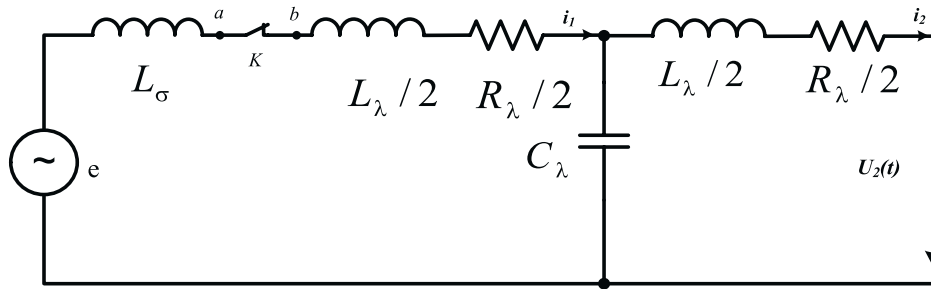
مقدمة:

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 الفترة الزمنية التي تمر فيها الشبكات الكهربائية بين حالتين عمل مستقرة متتاليتين. وتسبب الحالات العابرة ظهور توترات زائدة خطيرة في بداية الخطوط الكهربائية وفي نهايتها ، كما وقد تسبب دخول المولدات الكهربائية في حالة التهيج الذاتي، مما يسبب توليد جهودات كهربائية اضافية على العوازل قد تؤدي إلى انهيارها. يمكن أن تصل زيادة التوتر التي تظهر في هذه الحالة إلى قيم عالية جداً تؤثر سلباً على 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 $2.5 U_n$ [21].

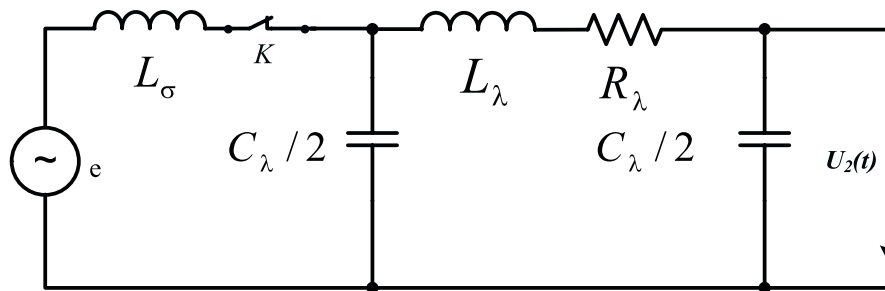
6 - 1 الحالة العابرة والتوترات الكهربائية الزائدة التي تنتج عند إغلاق القاطع الآلي للخط الكهربائي: و[26] و[23] و[62] و[59] و[27]

تمثل هذه العملية حالة وضع خط كهربائي ما تحت التوتر وهو بدون 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 بعين الاعتبار في هذه الدراسة أن الخط الكهربائي يمكن أن يكافئ رباعي أقطاب على شكل T كما هو مبين في الشكل رقم (6 - 1).



الشكل رقم (6 - 1) دائرة تمثيل الخط الكهربائي برباعي أقطاب T

أو رباعي أقطاب على شكل (π) كما هو مبين في الشكل رقم (6 - 2).

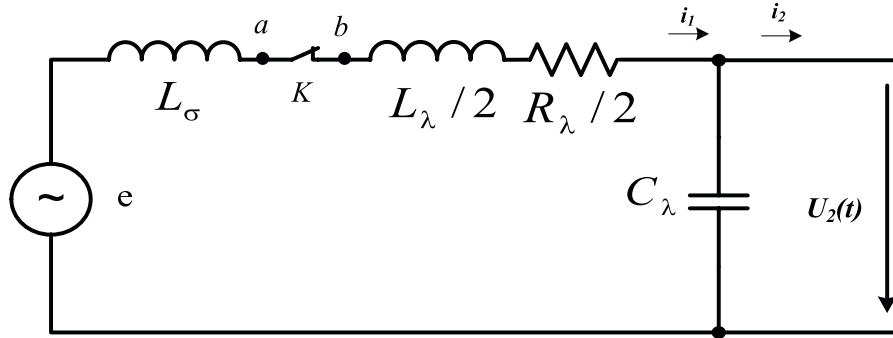


الشكل رقم (6 - 2) دائرة تمثيل الخط الكهربائي برباعي أقطاب π

حيث تمثل الرموز المستخدمة في هذه الإشكال ما يلي:

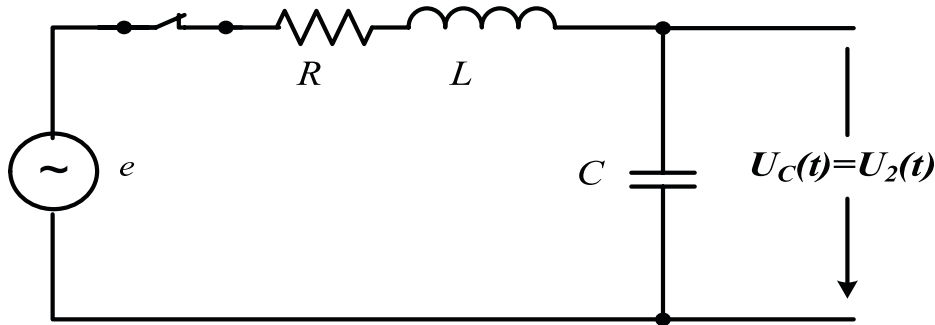
- L_σ عامل التحريض الذاتي لمكافئ لمحطة التوليد.
- L_λ عامل التحريض الذاتي المكافئ لخط النقل.
- C_λ السعة المكافئة للخط الكهربائي.
- R المقاومة المكافئة للخط الكهربائي.

يتم إغلاق القواطع الآلية وربط الخطوط الكهربائية في شبكات نقل الطاقة وفي شبكات التوزيع عندما تكون هذه الخطوط بدون 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 نهاية الخط $U_2(t)$ وستصبح الدارة المكافئة للشبكة الكهربائية كما هو مبين في الشكل رقم (3 - 6)،



الشكل رقم (3 - 6)

أو كما هو مبين في الشكل رقم (4 - 6):



الشكل رقم (4 - 6)

حيث:

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

يمكن أن 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 الطرق الحسابية التقليدية انطلاقاً من معادلة تشغيل هذه الدارة والمحددة بالعلاقة التالية :

$$(1 - 6) \quad e = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + C \int i \cdot dt$$

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

$$(2-6) \quad \underline{U_2(t)} = \frac{E}{C \cdot \omega \cdot Z} \left\{ \sin(\omega t + \psi - \varphi) - e^{\delta t} \cdot [\sin(\Omega_1 t + \alpha) \cdot \frac{\sin(\psi - \varphi)}{\sin \alpha} + \frac{\omega_1}{\Omega_1} \cdot \sin \Omega_1 t \cdot \cos(\psi - \varphi)] \right\}$$

حيث:

Z - الممانعة الكلية للدارة وتساوي:

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

$$(3 - 6) \quad |Z| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}$$

Ψ - فرق صفحة توتر التغذية في اللحظة $t = 0$
 φ - فرق الصفحة بين التوتر والتيار ويساوي :

$$(4-6) \quad \varphi = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega \cdot C}}{R}$$

δ - ثابت التخماد ويساوي :

$$(5-6) \quad \delta = \frac{R}{2L}$$

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

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

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

$$(7-6) \quad \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

ω - سرعة النبضة للقوة المحركة الكهربائية

α - زاوية إزاحة الطور وتساوي:

$$(8-6) \quad \alpha = \arctg \frac{\Omega_1}{\delta}$$

ويمكن في الحالة العابرة والتي تدوم لأجزاء من الثانية أن نفترض أن الأثر الحراري لمرور التيار في عناصر الدارة مهملاً، أي يمكن أن نعتبر أن $R = 0$ وبذلك ينتج :

$$(9-6) \quad R = 0, \quad \delta = 0, \quad \alpha = \pi/2, \quad \Omega_1 = \omega, \quad (1/C > \omega L)$$

وإذا تم افتراض أن توتر التغذية يكون أعظمياً في اللحظة $t = 0$ ، أي إذا تم افتراض أن $\Psi = 0$ ينتج من العلاقة (6-4) :

$$(10-6) \quad \varphi = -\arctg \pi/2 \rightarrow \varphi = -\pi/2$$

$$(11-6) \quad \sin(\Omega_1 t + \alpha) = \sin(\Omega_1 t + \frac{\pi}{2}) = \cos \omega_1 t$$

$$(12-6) \quad \sin(\psi - \varphi) = \sin(\psi + \frac{\pi}{2}) = \cos \psi$$

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

$$(13-6) \quad U_2(t) = \frac{E}{C \cdot \omega \cdot Z} \cdot [\cos \omega t - \cos \omega_1 t]$$

حيث:

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

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

$$(14-6) \quad U_2(t)_{\max} = \max \{U_2(t)\}$$

وتحسب هذه القيمة بالعلاقة :

$$(15-6) \quad U_2 = \frac{E}{C \cdot \omega \cdot Z} \cdot F_{\max}$$

حيث:

$$(16 - 6) \quad F = \cos \omega t - \cos \omega_1 t \Rightarrow F_{\max}$$

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

$$(17 - 6) \quad U_2 = \frac{E}{C \cdot \omega \cdot Z} K_{sh}$$

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

$$(18 - 6) \quad \frac{U_2}{U_{ph}} = \frac{E}{C \cdot \omega \cdot Z \cdot U_{ph}} \cdot K_{sh}$$

وإذا رمز لعامل زيادة التوتر في الحالة المستقرة بالعلاقة التالية:

$$(19 - 6) \quad K_{ov} = \frac{E}{C \cdot \omega \cdot Z \cdot U_{ph}}$$

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

$$(20 - 6) \quad U_2 = K_{ov} \cdot K_{sh} \cdot U_{ph}$$

6 - 1 - 1 دراسة زيادة التوتر في الحالة العابرة عند وصل خط إلى شبكة التوتر العالي: [33], [31], [30], [26]

لقد تم 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، وتم وضع برامج حاسوبية و نماذج تمثيلية ملائمة لهذه الحالة وذلك باستخدام:

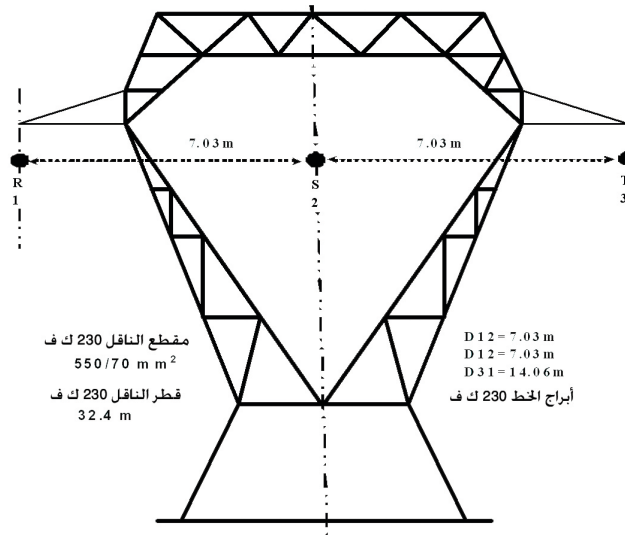
- نمذجة العناصر الكهربائية الممثلة للنظام
- النمذجة باستخدام المخططات الصندوقية بيئة ماتلاب MATLAB

6 - 1 - 2 دراسة حالة باستخدام نمذجة العناصر الكهربائية الممثلة للنظام: [1], [14], [12]

لقد 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، وبين الشكل رقم (6 - 5) نموذج الأبراج الحديدية المستعملة في هذا الخط، وبين الجدول رقم (6 - 1) المميزات الكهربائية لهذا الخط الكهربائي.

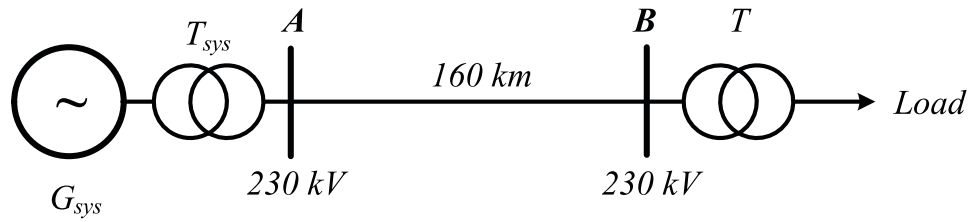
الجدول رقم (6 - 1) مميزات الخط الكهربائي

$r = 0.125 \, \Omega / \text{Km}$	مقاومة ناقل الخط
$x = 0.43 \, \Omega / \text{Km}$	مفاعلة الخط
$D = 32.4 \, \text{mm}$	قطر ناقل الخط
$S = 475 \, \text{mm}^2$	مقطع ناقل الخط
$l = 160 \, \text{Km}$	طول الخط



الشكل رقم (6 - 5)

ويبين الشكل رقم (6 - 6) الدارة الرمزية للشبكة الكهربائية المستخدمة في حساب التوترات الزائدة التي تظهر في نهاية الخط في الحالة العابرة



الشكل رقم (6 - 6)

وتم استناداً إلى هذه المعلومات حساب ثوابت ومحددات الخط الكهربائي كما هو مبين في الجدول رقم (6 - 2)

الجدول رقم (2-6)

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

وتم أيضاً حساب المفاعلة الكهربائية للمولدة المكافئة للشبكة الكهربائية في طرف الإرسال :

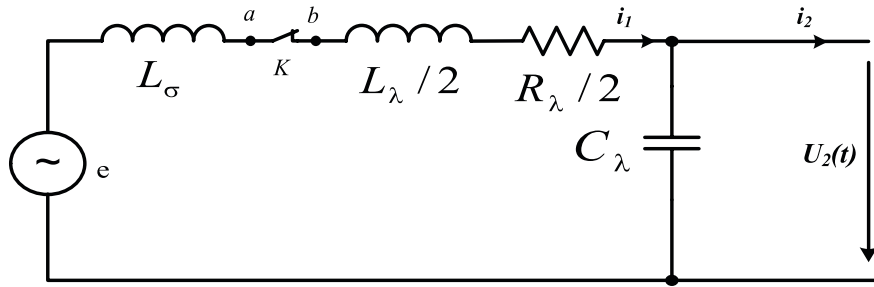
$$\Omega \quad 8.1 = X \sigma = X T + X g$$

حيث:

$X T$: مفاعلة المحولة.

$X g$: مفاعلة المولد.

بذلك تصبح الدارة الكهربائية المكافئة المستخدمة لحساب زيادة التوتر في الحالة العابرة عند تمثيل الخط بدارة رباعي أقطاب T كما هو مبين في الشكل رقم (6 - 7):



الشكل رقم (6 - 7)

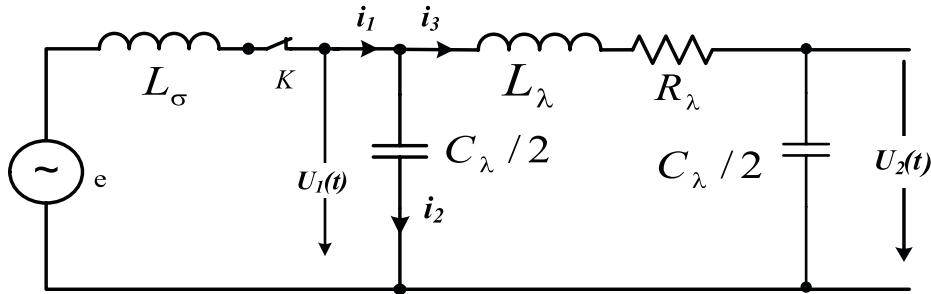
وقد تم وضع النموذج الرياضي الذي يمثل معادلات تشغيل النظام وكما يلي:

$$U_1 = R_{\lambda} / 2 \cdot i_1 + L_{\lambda} / 2 \cdot \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C_{\lambda}} \int i_1 \cdot dt$$

$$i_1 = \frac{1}{L_{\lambda} / 2} \cdot \int U_1 - R_{\lambda} / 2 \cdot i_1 - \frac{1}{C_{\lambda}} \cdot \int i_1 \cdot dt$$

$$(21 - 6) \quad U_2 = U_C = i_1 \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_{\lambda}}$$

وتصبح الدارة الكهربائية المكافئة المستخدمة لحساب زيادة التوتر في الحالة العابرة عند تمثيل الخط بدارة رباعي أقطاب t كما هو مبين في الشكل رقم (6 - 8):



الشكل رقم (6 - 8)

وقد تم وضع النموذج الرياضي الذي يمثل معادلات تشغيل هذا النظام وكما يلي:

$$i_1 = i_2 + i_3$$

تعطى قيمة التوتر في بداية الخط بالعلاقة :

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

وكذلك يمكن أن يحسب من العلاقة:

$$i_3 = \frac{1}{L_{\lambda}} \cdot \int U_1 - R \cdot i_3 - \frac{1}{C_{\lambda} / 2} \cdot \int i_3 \cdot dt$$

وتحسب التيارات في فروع الدارة بالعلاقات التالية :

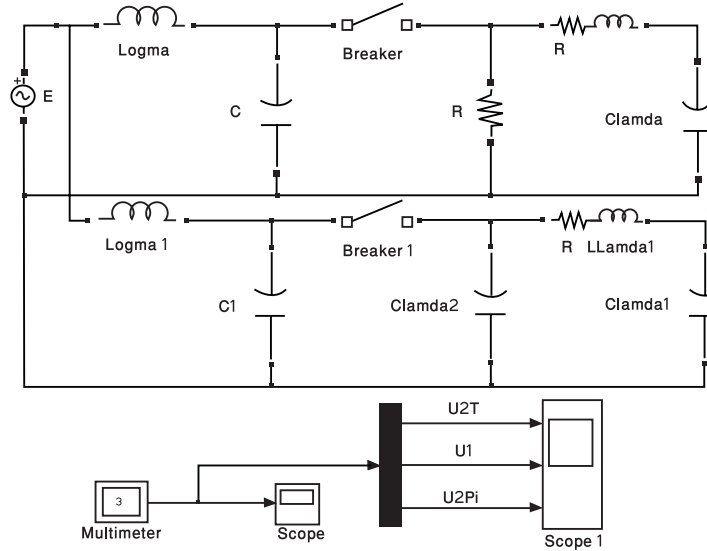
$$i_2 = \frac{C_{\lambda}}{2} \cdot \frac{du_1}{dt}$$

$$i_3 = \frac{1}{L_{\lambda}} \cdot \int U_1 - R \cdot i_3 - \frac{1}{C_{\lambda} / 2} \cdot \int i_3 \cdot dt$$

ويمكن بذلك حساب التوتر في نهاية الخط بالعلاقة :

$$U_2 = U_{C1} = i_3 \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_{\lambda} / 2} \quad (22 - 6)$$

يبين الشكل رقم (6 - 9) النموذج التمثيلي للخط الكهربائي بدارة π و دارة T مع الشبكة المغذية باستخدام العناصر الكهربائية:

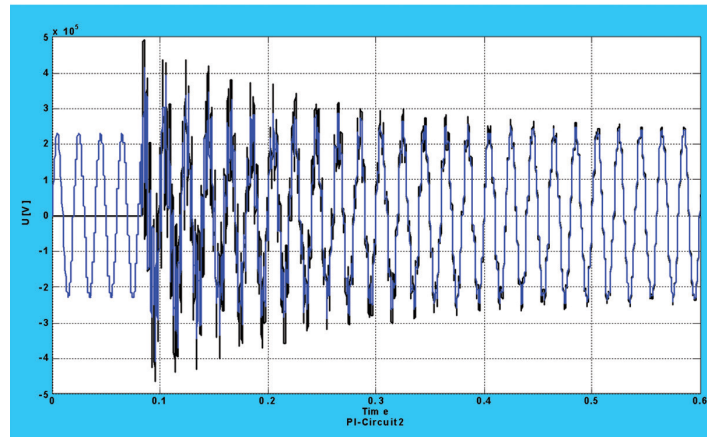


الشكل (6 - 9) النموذج التمثيلي للخط مع الشبكة المغذية باستخدام العناصر الكهربائية

ويبين الشكل رقم (6 - 11) تغيرات التوترات U_1 و U_2 في بداية ونهاية الخط الكهربائي كتابع للزمن في الحالة العابرة التي تظهر عند وصل الخط وهو بدون حمل إلى الشبكة الكهربائية عند تمثيل الخط برباعي 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 :

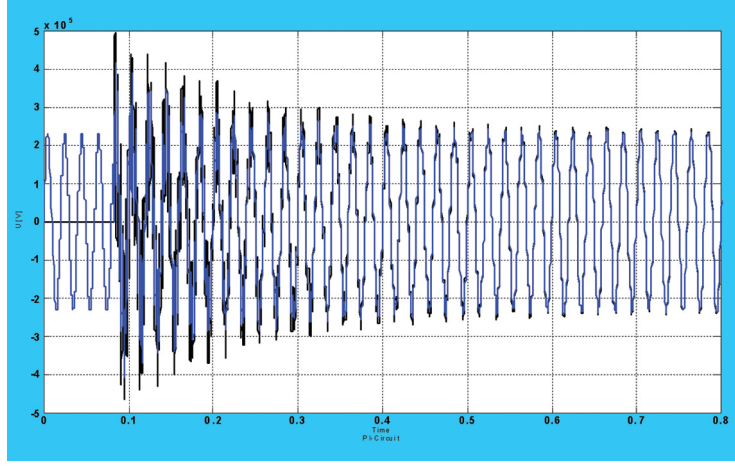
$$U_{2max} = 506 KV$$

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 $U_{TEST} = 2.50$



الشكل رقم (6 - 10) تغيرات التوترات U_1 و U_2 عند تمثيل الخط برباعي أقطاب على شكل π

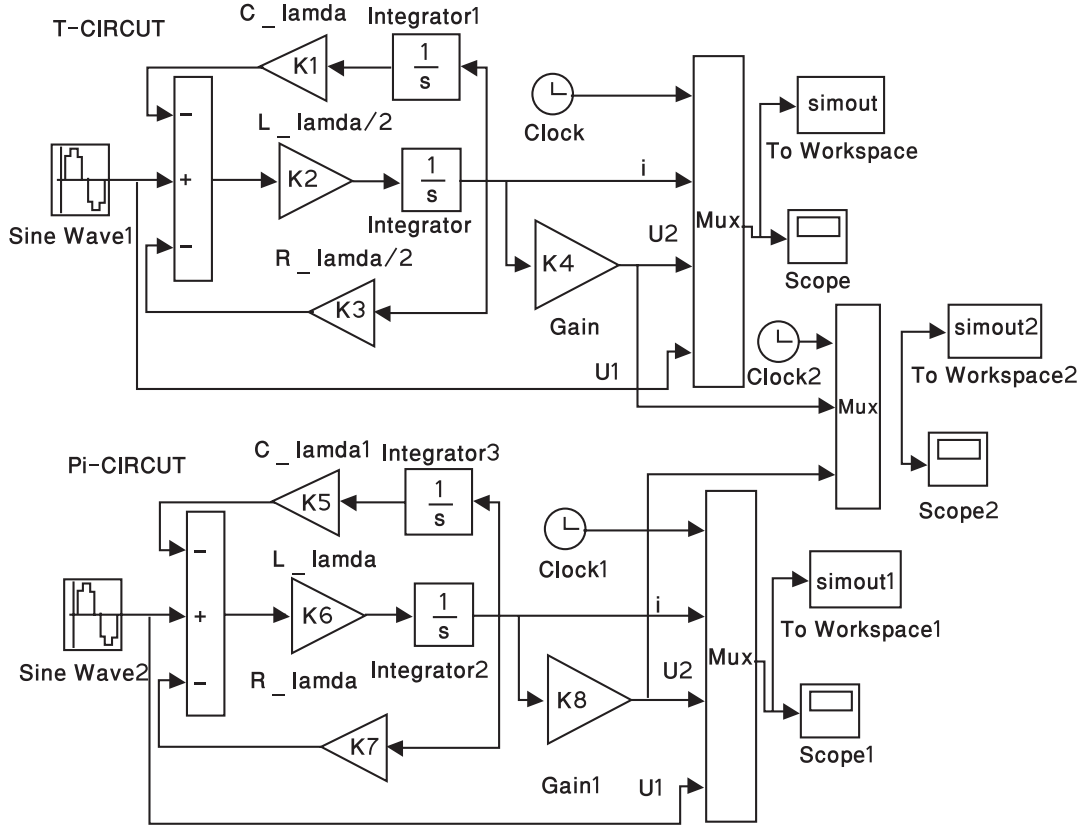
ويبين الشكل رقم (6 - 11) تغيرات التوترات U_1 و U_2 في بداية ونهاية الخط الكهربائي كتابع للزمن في الحالة العابرة التي تظهر عند وصل الخط وهو بدون حمل إلى الشبكة الكهربائية عند تمثيل الخط برباعي أقطاب على شكل T.



الشكل رقم (6 - 11) تغيرات التوترات U_2 و U_2 عند تمثيل الخط برباعي أقطاب على شكل T .

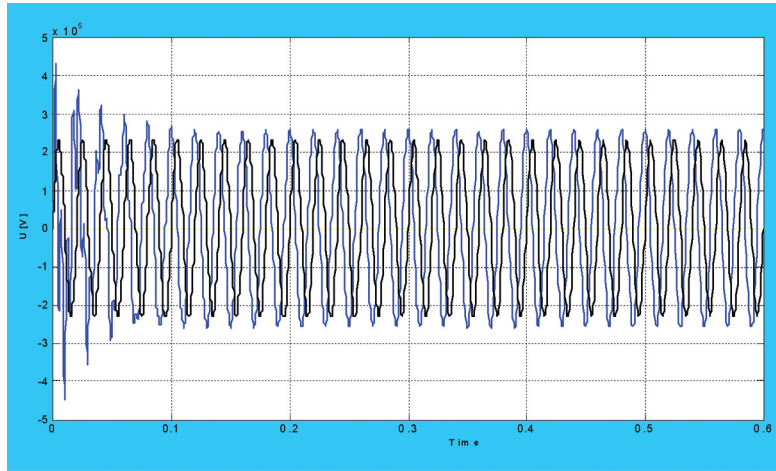
6 - 1 - 3 - دراسة حالة باستخدام النمذجة باستخدام المخططات الصندوقية: [49], [50]

نظرا للإمكانيات التي يتمتع بها برنامج MATLAB فقد تم استخدامه في الدراسة هذه للتأكد من النتائج التي تم الحصول عليها من خلال البرامج الحاسوبية ومقارنة النتائج في الحالتين. يعبر المخطط الصندوقي الذي تم وضعه والمبين في الشكل رقم (6 - 12) عن معادلات تشغيل النموذج الرياضي للنظام الفيزيائي الذي تمت دراسته المعادلات (6 - 22) والمعادلات (6 - 23) والتي تمثل حالة وصل الخط الكهربائي إلى الشبكة الكهربائية وهو بدون حمل، عند استخدام رباعي أقطاب π ورباعي أقطاب T لنمذجة الخط الكهربائي.



الشكل رقم (6 - 12) المخطط الصندوقي لنمذجة الخط المدروس عند إغلاق القاطع الكهربائي للخط وهو بدون حمل عند تمثيل الخط برباعي أقطاب على شكل T و π

ويبين الشكل رقم (6 - 13) تغيرات التوترات في بداية وفي نهاية الخط الكهربائي U2 , U1 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 .



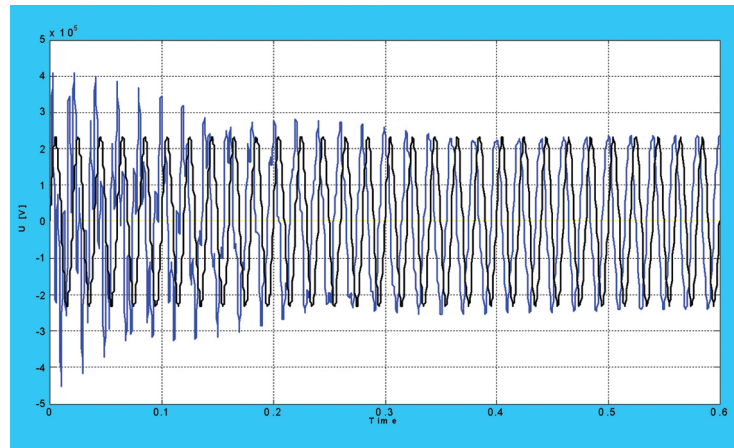
الشكل رقم (6 - 13) تغيرات التوتر في بداية و نهاية الخط الكهربائي U2 و U2 عند استخدام رباعي أقطاب π

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:

$$U2_{max} = 449 \text{ KV}$$

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. $U_{TEST} = 2.5 U_n$

ويبين الشكل رقم (6 - 14) تغيرات التوتر في نهاية الخط الكهربائي U2 الذي تم الحصول عليه بعملية النمذجة في بيئة ماتلاب وذلك عند وصل الخط إلى الشبكة وتطبيق توتر الإرسال في بدايته عند استخدام رباعي أقطاب T.



الشكل رقم (6 - 14) تغيرات التوتر في بداية و نهاية الخط الكهربائي U2 و U2 عند استخدام رباعي أقطاب T

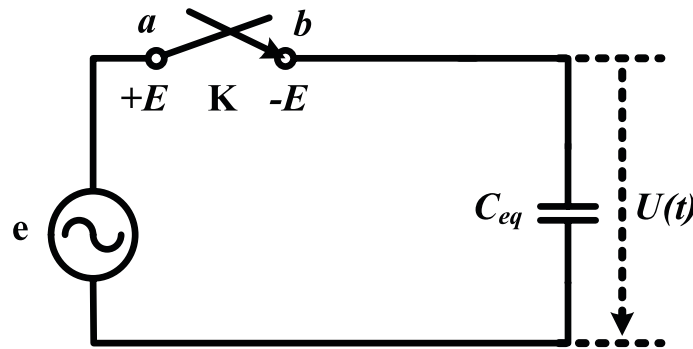
يمكن الملاحظة من منحنى التغيرات أن القيمة الأعظمية للتوتر الزائد الذي ينتج في هذه الحالة العابرة، عند وصل الخط الكهربائي ذي التوتر 230 ك ف إلى الشبكة العامة تساوي :

$$U_{2 \max} = 449 \text{ KV}$$

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 $2.5 U_n$.

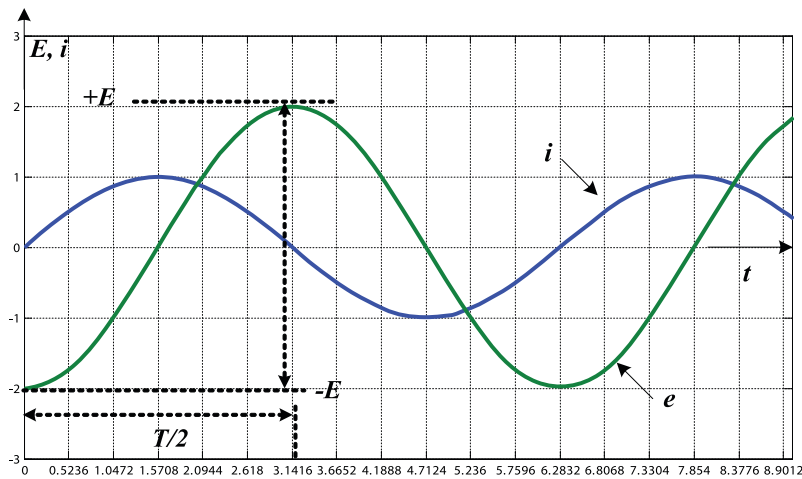
6 - 2 الحالة العابرة والتوترات الكهربائية الزائدة التي تنتج عند فصل القاطع الآلي للخط الكهربائي: [62], [59], [39], [34], [31], [27], [23]

يكافئ الخط الكهربائي الطويل وهو بحالة اللاحمل مكثفا كهربائيا كما هو مبين في الشكل رقم (6 - 15). ويمر التيار الكهربائي عبر هذا المكثف نتيجة تطبيق التوتر المتناوب الذي يولده المولد المكافئ المطبق على هذا الخط، ويتصف هذا التيار بأنه ستكون له طبيعة سعوية، أي سوف يتقدم على التوتر المطبق بفرق صفحة قدره $\pi/2$.



الشكل رقم (6 - 15) الدارة المكافئة للخط الكهربائي وهو بدون حمل

عند فتح تلامسات القاطع الآلي سيتولد قوس كهربائي بين أقطاب القاطع الآلي ويبقى الخط الكهربائي تحت التوتر حتى يمر التيار المتناوب بالقيمة صفر، عندها يتخامد القوس الكهربائي. لكن يلاحظ في نفس الوقت أن التوتر على قطبي القاطع يساوي في هذه اللحظة $(2E)$ ، حيث أن أحد أقطاب القاطع 'a' سيكون كمونه مساويا $(-E)$ ، وهي قيمة الكمون على طرف المكثف المكافئ للخط الكهربائي، وسيكون كمون القطب الآخر للقاطع الآلي 'b' مساويا $(+E)$ وبالتالي فإن فرق الكمون بين قطبي القاطع سيساوي $U = E - (-E) = 2E$ وذلك بعد فترة نصف دور، كما في الشكل (6-16).



الشكل (6-16) فرق التوتر على قطبي القاطع بعد نصف دور

بعد مرور هذه الفترة إذا كانت خواص العازلية الكهربائية للوسط مابين أقطاب القاطع الآلي قد عادت إلى طبيعتها وأصبحت قابلة لتحمل فرق كمون قدره $2E$ فإن الخط سيبقى مفصلاً، والتوتر

على قطبي هذا الخط سيتخامد مع تخامد شحنة المكثف المكافئ للخط. أما إذا كانت هذه العازلية الكهربائية لا تتحمل هذا الفرق في الكمون، فإن الخط سوف يوضع من جديد تحت التوتر من جراء حدوث القوس الكهربائي ويدخل الخط في حالة عابرة تماثل الحالة العابرة عند إغلاق القاطع الآلي لخط عالي التوتر وهو بدون حمل. ولكن في هذه الحالة ستكون هناك شروطاً أولية مختلفة وسيكون الخط مشحوناً بتوتر (E) ثم يطبق عليه التوتر عند عودة اشتعال القوس الكهربائي. ولكي تعاد المسألة إلى مسألة ذات شروط أولية تساوي الصفر يعتبر أن القوة المحركة الكهربائية التي تغذي الخط عند إغلاق القاطع تساوي:

$$e = E \cdot \cos \omega t + E$$

وبعد أن تحسب قيمة التوتر الذي يظهر على أقطاب القاطع يتم طرح قيمة E من التوترات العابرة التي تظهر في بداية الخط ونهاية الخط.

لحساب قيمة التوتر الزائد في هذه الحالة العابرة يتم الانطلاق من الدارة المكافئة للخط الكهربائي المبينة في الشكل (3-3) حيث تؤخذ قيمة القوة المحركة الكهربائية المكافئة للشبكة التي تغذي الخط مساوية:

$$e = E \cdot \cos \omega t + E$$

تبين العلاقات التالية معادلات تشغيل خط التوتر العالي الكهربائي في الحالة العابرة:

$$(23-6) \quad \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \cdot \cosh \theta \ell + \underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_C \sinh \theta \ell \\ \underline{I}_1 &= \underline{U}_2 / \underline{Z}_C \sinh \theta \ell + \underline{I}_2 \cdot \cosh \theta \ell \end{aligned}$$

وإذا اعتبر أن الخط الكهربائي يكون بدون ضياعات أومية، أي أن المقاومة الكهربائية للخط تكون مهملة، وهو أمر مقبول في الحالات العابرة التي تدوم لبضع أعشار من الثانية فإنه سوف ينتج:

$$r = 0, \quad \theta = j\beta$$

$$(24-6) \quad \sqrt{L_{eq} C} = \frac{\omega}{g} \quad \beta = \omega$$

حيث:

L_{eq} تمثل عامل التحريض الذاتي الكلي للمولد والمحولة والخط الكهربائي معاً.

C تمثل السعة الكهربائية المكافئة لخط التوتر العالي.

v تمثل سرعة انتشار الأمواج الكهرومغناطيسية على الخط الكهربائي وتساوي 300.000 Km/sec

وإذا تم الأخذ بعين الاعتبار الزمن اللازم للأمواج الكهرومغناطيسية كي تجتاز الخط كله والذي يعرف كما يلي: $\tau = \frac{\ell}{v}$ حيث τ تساوي طول الخط الكهربائي بالكيلومتر (Km)، فإنه يمكن الكتابة:

$$(25-6) \quad \beta \cdot \ell = \omega \cdot \tau \Rightarrow \beta = \frac{\omega \cdot \tau}{\ell}$$

وبالتعويض في المعادلات (24-6) ينتج:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cosh j\omega\tau + \underline{Z}_C \underline{I}_2 \sinh j\omega\tau$$

$$(26-6) \quad \underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_C} \sinh j\omega\tau + \underline{I}_2 \cosh j\omega\tau$$

يمكن حل هذه المعادلات بالانتقال بها إلى مستوي لابلاس التخلي وذلك بتبديل $P \rightarrow j\omega$ فينتج:

$$(27-6) \quad \begin{cases} U_1(P) = U_2(P) \cosh(P) + Z_c I_2(P) \sinh(P) \\ I_1 = \frac{U_2(P)}{Z_c} \sinh(P) + I_2(P) \cosh(P) \\ e(P) = L_{SYS}(P) \cdot I(P_1) + U(P_1) \\ I_2(P) = 0 \end{cases}$$

ويضاف إلى هذه المعادلات معادلتين، تنتج الأولى من تطبيق قانون أوم على الدارة المكافئة وتنتج الثانية من شرط العمل بدون حمل وانعدام تيار الحمل على الخط الكهربائي:

$$(28-6) \quad \begin{cases} e(P) = L_{SYS}(P) \cdot I(P_1) + U(P_1) \\ I_2(P) = 0 \end{cases}$$

وبذلك ينتج نظام مؤلف من 4 معادلات في مستوي لابلاس، وحلول هذا النظام هي:

$$(26-6) \quad U_1(P) = \frac{e(P) \cdot Z_c \cdot \cosh P \tau}{Z_c \cosh P \tau + L \cdot P \cdot \sinh P \tau}$$

$$(30-6) \quad \frac{e(P) \cdot Z_c}{Z_c \cosh P \tau + L \cdot P \cdot \sinh P \tau} = U_2(P) = \frac{U_1(P)}{\cosh P \tau}$$

$$(31-6) \quad \frac{e(P) \cdot \sinh P \tau}{Z_c \cosh P \tau + L \cdot P \cdot \sinh P \tau} = I_{1(P)} = \frac{U_2(P)}{Z_c} \sinh P \tau$$

وإذا تم أخذ معكوس لابلاس لهذه المعادلات، أي إذا تم نقل هذه المعادلات إلى المستوي الحقيقي فنتنتج الحلول التالية:

$$(32-6) \quad U_1(t) = E \cdot \frac{\cos \omega \tau \cdot \cos \omega t}{\cos \omega \tau - \frac{L \cdot \omega}{Z_c} \cdot \sin \omega \tau} - E \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-2\omega_k^2 + \omega^2) \cdot \cos \omega_k \tau \cdot 2 \cos \omega_k t}{(-\omega_k^2 + \omega^2) (\cos \omega_k \tau + \frac{\omega_k \tau}{\sin \omega_k \tau})}$$

أو بشكل آخر:

$$(33-6) \quad U_1(t) = A \cdot \cos \omega \tau \cdot \cos \omega t - \sum_{k=1}^{\infty} B_k \cdot \cos \omega_k \tau \cdot \cos \omega_k t = M - N$$

حيث اعتبرنا

$$(34-6) \quad A = \frac{E}{\cos \omega \tau - \frac{L \cdot \omega}{Z_c} \sin \omega \tau}$$

$$(35-6) \quad B_k = \frac{+2E(-2\omega_k^2 + \omega^2)}{(-\omega_k^2 + \omega^2) (\cos \omega_k \tau + \frac{\omega_k \tau}{\sin \omega_k \tau})}$$

وبالتعويض ينتج:

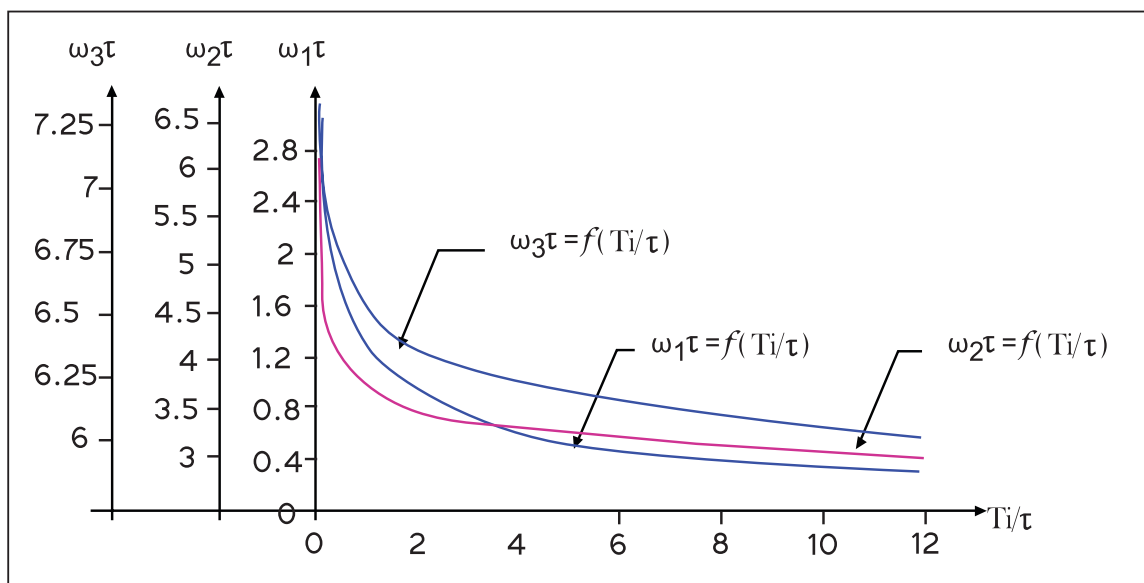
$$(36-6) \quad U_2(t) = A \cdot \cos \omega t - \sum_{k=1}^{\infty} B_k \cdot \cos \omega t$$

$$(37-6) \quad I_1(t) = \frac{A}{Z_c} \cdot \sin \omega \tau \cdot \sin \omega t - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{B_k}{Z_c} \cdot \sin \omega_k \tau \cdot \sin \omega_k t$$

من الملاحظ انه من اجل k كبيرة فإن المقدار $\omega_k \tau = (k-1)\pi$ سيكون كبير وبالتالي ينتج $\sin \omega_k \tau = 0$. أي أن قيمة B_k تميل نحو الصفر كلما كبرت k لذا يؤخذ فقط الحدان الأول والثاني أو الحدود الثلاثة الأولى من السلسلة السابقة مع العلم أن: السرعة الزاوية للتوافقيات التي تظهر عند فتح الخط وتحسب من العلاقات التالية:

$$(38-6) \quad \cot \omega_k \tau = \omega_k \cdot \tau \cdot \operatorname{tg} \frac{T_l}{\tau} = \omega_k \cdot \tau \cdot \operatorname{tg}(k)$$

حيث: $k = T / \tau$ هي كمية عددية نسبية، وتعطى هذه النسبة عادة على شكل مخطط بياني كما في الشكل رقم (6-17)



الشكل رقم (6-17) المنحني القياسي الذي يعطي قيم ω_k المقابلة لقيم k

ولحساب التوترات العابرة في هذه الحالة يتم تحديد ما يلي:
الممانعة فإن ثابت للمحطة:

$$(39-6) \quad L_{\sigma} = \frac{X_{\sigma}}{\omega} [H]$$

وبالتالي فإن ثابت الزمن يعطى بالعلاقة:

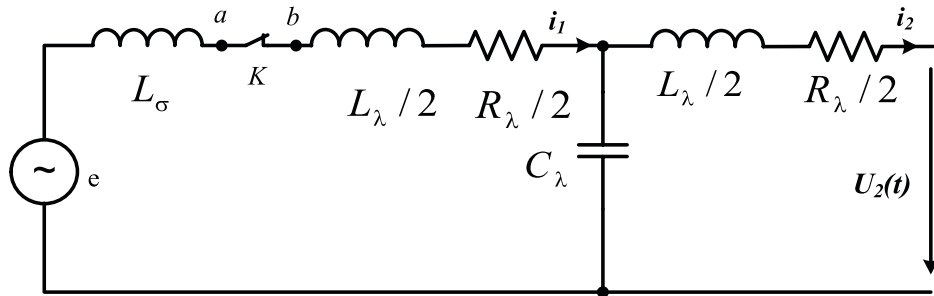
$$T_{\ell} = \frac{L_{\sigma}}{Z_c} [\text{sec}]$$

والزمن اللازم لسفر الأمواج على الخط:

$$(40-6) \quad \tau = \frac{\ell}{v} = \frac{\ell}{300000} [\text{sec}]$$

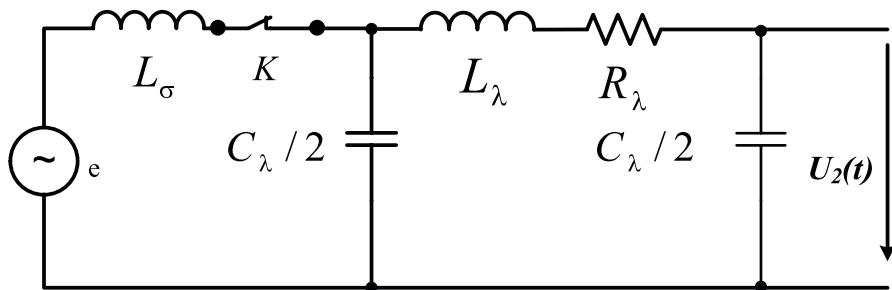
6 - 2 - 1 دراسة زيادة التوتر في الحالة العابرة عند فصل خط عن شبكة التوتر العالي: [62], [59], [50], [49]

تمثل هذه العملية حالة فصل خط كهربائي وهو بدون حمل عن 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 بعين الاعتبار في هذه الدراسة أن الخط الكهربائي يمكن أن يكافئ رباعي أقطاب على شكل T كما هو مبين في الشكل رقم (6-18)،



الشكل رقم (6 - 18) دائرة تمثيل الخط الكهربائي برباعي أقطاب T

أو رباعي أقطاب على شكل (π) كما هو مبين في الشكل رقم (6-19).

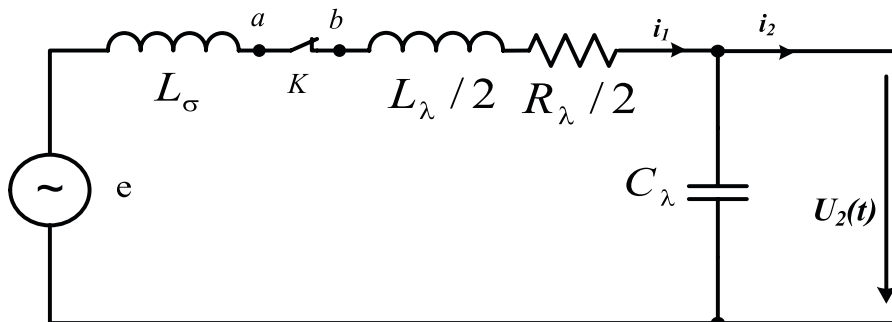


الشكل رقم (6-19) دائرة تمثيل الخط الكهربائي برباعي أقطاب π

حيث تمثل الرموز المستخدمة في هذه الأشكال ما يلي:

- $L\sigma$ عامل التحريض الذاتي المكافئ لمحطة التوليد.
- $L\lambda$ عامل التحريض الذاتي المكافئ لخط النقل.
- $C\lambda$ السعة المكافئة للخط الكهربائي.
- R المقاومة المكافئة للخط الكهربائي.

يتم فتح القواطع الآلية وفصل الخطوط الكهربائية في شبكات نقل الطاقة وفي شبكات التوزيع عندما تكون هذه الخطوط بدون حمل كهربائي، وبذلك سيكون التيار في نهاية الخط مساوياً للصفر ($i_2(t) = 0$)، وسيكون التوتر الذي يظهر على طرفي المكثف المكافئ $C\lambda$ في الدارة المبينة في الشكل رقم (1) مساوياً للتوتر في نهاية الخط $u_2(t)$ وستصبح الدارة المكافئة للشبكة الكهربائية كما هو مبين في الشكل رقم (6-21)،



الشكل رقم (6-20)

حيث:

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

يمكن أن الملاحظة أن الدارة المكافئة للشبكة قد أصبحت دائرة بسيطة وتمثل دائرة RLC تسلسلية مطبق عليها توتر كهربائي متناوب ناتج عن القوة المحركة الكهربائية $e(t)$ للمولدة المكافئة للشبكة الكهربائية ثم يتم فصل القاطع عندما يكون الخط الكهربائي بدون حمل. لقد تم في هذه الفقرة تحديد قيمة التوتر الزائد الذي يظهر في الحالة العابرة عند فصل خط كهربائي ما عن شبكة التوتر العالي عن طريق استخدام المعادلات السابقة، وتم وضع برامج حاسوبية و نماذج تمثيلية ملائمة لهذه الحالة وذلك باستخدام:

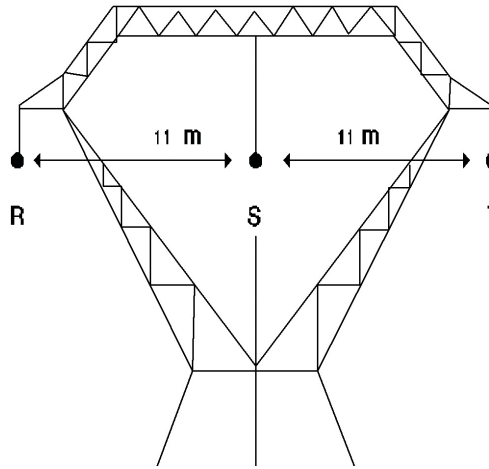
- نمذجة العناصر الكهربائية الممثلة للنظام
- النمذجة باستخدام المخططات الصندوقية بيئة ماتلاب MATLAB

6 - 2 - 2 دراسة حالة باستخدام المحاكاة باستخدام العناصر الكهربائية الممثلة للنظام:

لقد جرى تطبيق هذه الدراسة على حالة عملية باستخدام البرامج الحاسوبية لتحديد التوتر الزائد الذي يظهر في الحالة العابرة على خط كهربائي بتوتر 400 ك ف وبطول 140 كم، وهو الخط الذي يربط محطة تحويل عدرا 2 مع محطة تحويل فيروزة، وبين الشكل رقم (6-21) نموذج الأبراج الحديدية المستعملة في هذا الخط، وبين الجدول رقم (6-26) المميزات الكهربائية لهذا الخط الكهربائي.

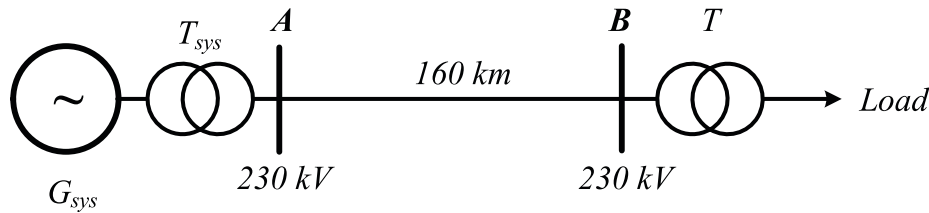
الجدول رقم (6 - 2) مميزات الخط الكهربائي

$r = 0.125 \ \Omega / \text{Km}$	مقاومة ناقل الخط
$x = 0.43 \ \Omega / \text{Km}$	مفاعلة الخط
$D = 32.4 \ \text{mm}$	قطر ناقل الخط
$S = 475 \ \text{mm}^2$	مقطع ناقل الخط
$l = 140 \ \text{Km}$	طول الخط



الشكل رقم (6 - 21)

ويبين الشكل رقم (6 - 22) الدارة الرمزية للشبكة الكهربائية المستخدمة في حساب التوترات الزائدة التي تظهر في نهاية الخط في الحالة العابرة



الشكل رقم (6 - 22)

وتم استناداً إلى هذه المعلومات حساب ثوابت ومحددات الخط الكهربائي الذي تمت دراسته كما هو مبين في الجدول رقم (4 - 6)
الجدول رقم (4 - 6)

القيمة	ثوابت ومحددات الخط
$R = r l \quad 4.55 \, \Omega$	المقاومة الكهربائية
$X = x l \quad 45.7 \, \Omega$	المفاعلة المباشرة الكلية
$Z = z l \quad 45.92 \, \Omega$	الممانعة الكلية
$Y = y l \quad 4.84 \cdot 10^{-4} \, S$	السماحية الكهربائية الكلية
$C = c l \quad 1.54 \cdot 10^{-6} \, F$	السعة الكهربائية الكلية

وتم أيضاً حساب المفاعلة الكهربائية للمولدة المكافئة للشبكة الكهربائية في طرف الإرسال :

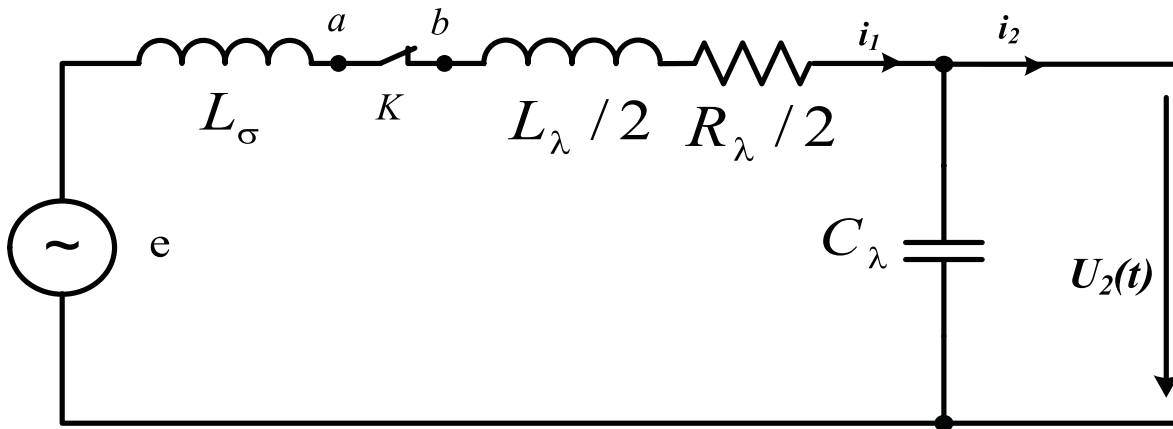
$$X_{\sigma} = X_g + X_T = 8.1 \, \Omega$$

حيث:

X_T : مفاعلة المحولة.

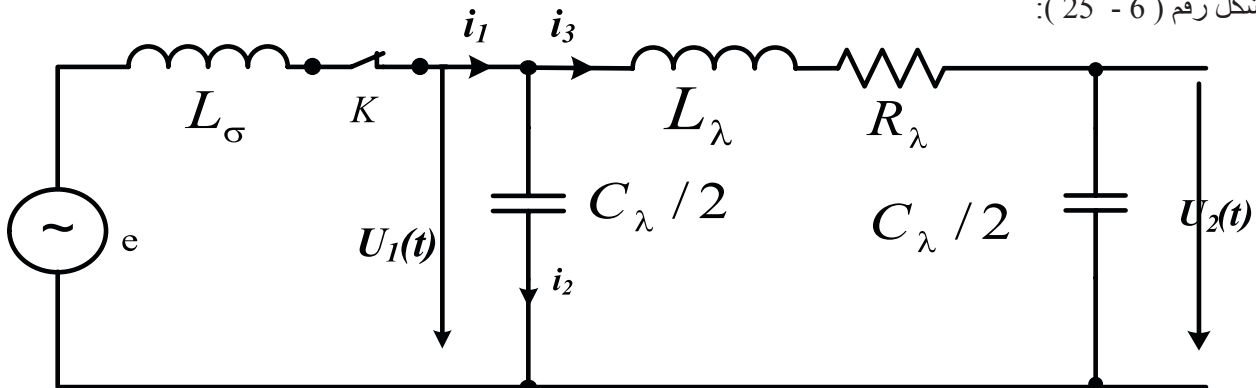
X_g : مفاعلة المولد.

بذلك تصبح الدارة الكهربائية المكافئة المستخدمة لحساب زيادة التوتر في الحالة العابرة عند تمثيل الخط بدارة رباعي أقطاب T كما هو مبين في الشكل رقم (6 - 23):



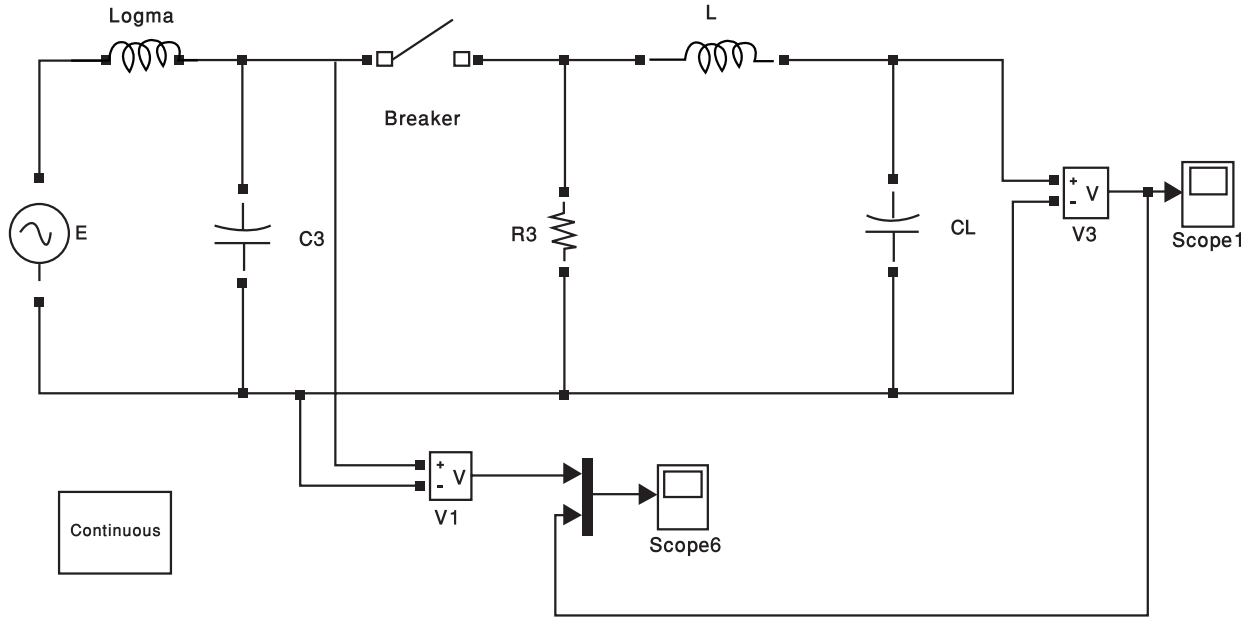
الشكل رقم (6 - 23)

وتصبح الدارة الكهربائية المكافئة المستخدمة لحساب زيادة التوتر في الحالة العابرة عند تمثيل الخط بدارة رباعي أقطاب π كما هو مبين في الشكل رقم (6 - 25):



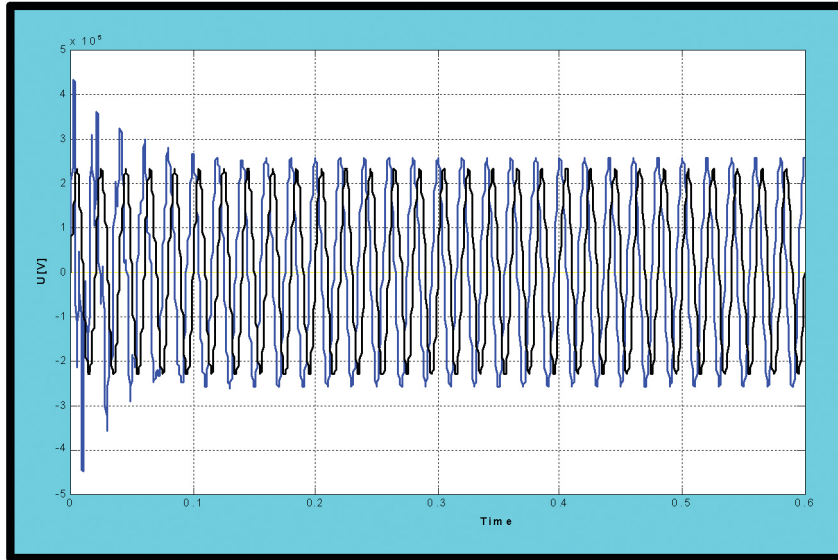
الشكل رقم (6 - 24)

وقد تم وضع النموذج الرياضي الذي يمثل معادلات تشغيل هاتين الدارتين المكافئتين.
يبين الشكل رقم (6 - 26) النموذج التمثيلي للخط الكهربائي بدارة T مع الشبكة المغذية باستخدام العناصر الكهربائية:



الشكل (6 - 25) النموذج التمثيلي للخط الكهربائي وهو يكافئ رباعي أقطاب T مع الشبكة المغذية باستخدام العناصر الكهربائية

يبين الشكل (6 - 27) تغيرات التوتر في نهاية وبداية الخط الكهربائي U_1 و U_2 الذي تم الحصول عليها بعملية النمذجة في بيئة البرنامج التمثيلي وذلك عند فصل الخط عن الشبكة عند استخدام رباعي أقطاب T.



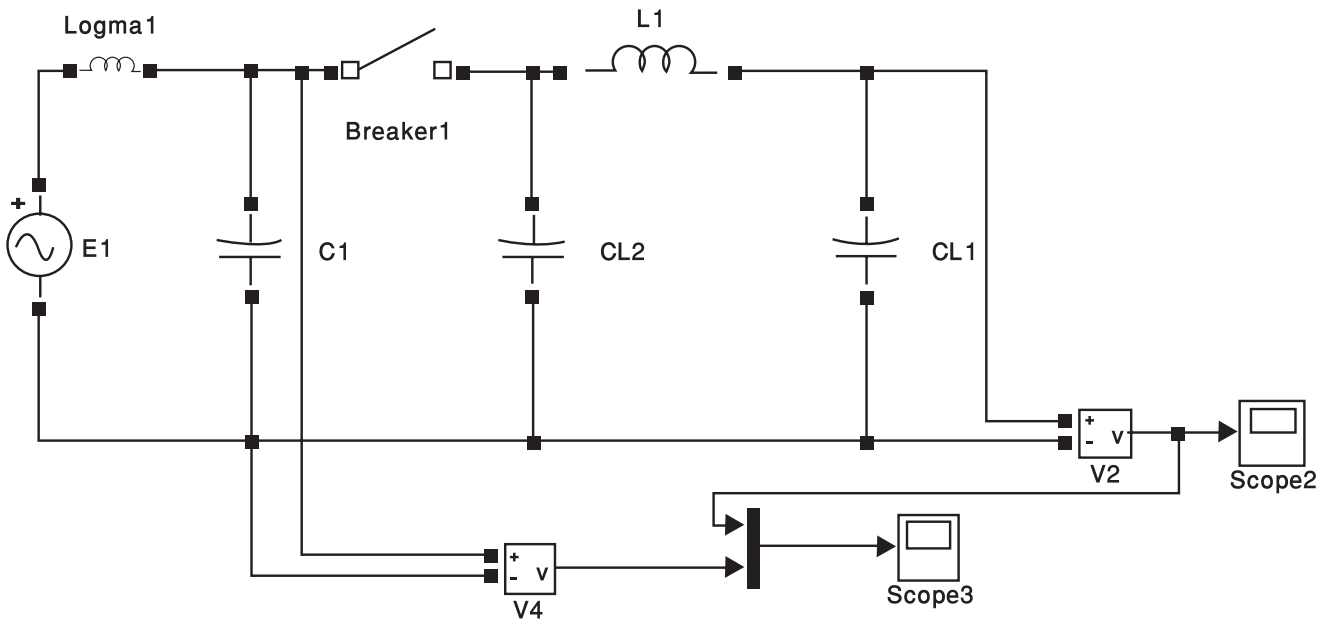
الشكل رقم (6 - 26) تغيرات التوتر في نهاية وبداية الخط الكهربائي U_1 و U_2 عند فصل الخط عن الشبكة عند استخدام رباعي أقطاب T.

يمكن الملاحظة من منحنى التغيرات أن القيمة الأعظمية للتوتر الزائد الذي ينتج في هذه الحالة العابرة، عند الخط ذي التوتر 400 ك ف عن

الشبكة العامة تساوي: $U_{2\max} = 452 \text{ KV}$

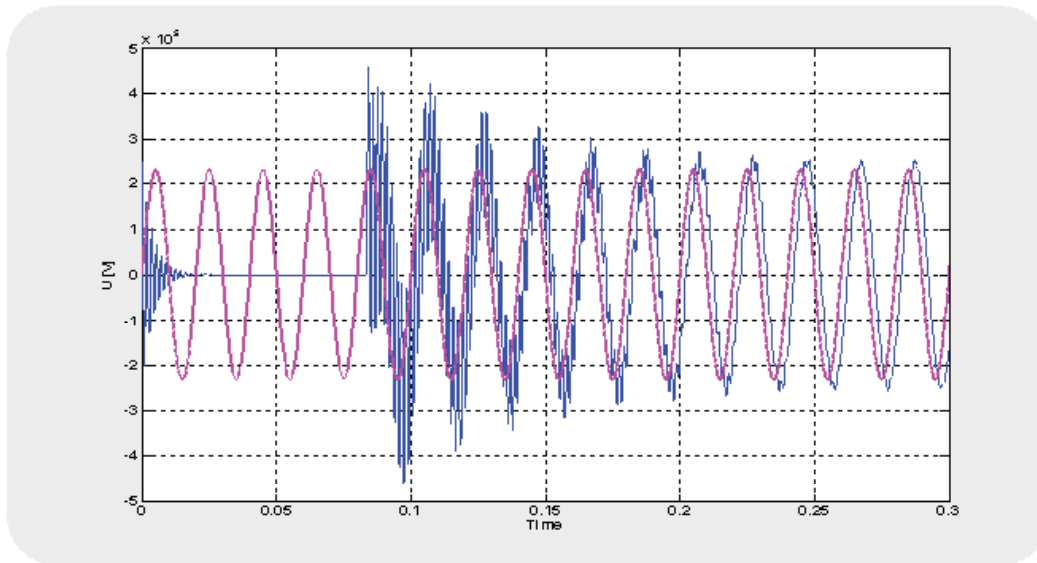
أي أن زيادة التوتر تبلغ 1.95 من قيمة التوتر النظامي للخط وهي أقل من قيمة توتر الاختبار الذي توصي الهيئة العالمية للكهرباء IEC والذي يساوي $U_{\text{test}} = 2,5 U_n$.

يبين الشكل رقم (6 - 27) النموذج التمثيلي للخط الكهربائي بدارة π مع الشبكة المغذية باستخدام العناصر الكهربائية:



الشكل رقم (6 - 27) النموذج التمثيلي للخط الكهربائي وهو يكافئ رباعي أقطاب π مع الشبكة المغذية باستخدام العناصر الكهربائية

يبين الشكل رقم (6 - 28) تغيرات التوتر في نهاية وبداية الخط الكهربائي U_1 U_2 الذي تم الحصول عليه بعملية النمذجة في بيئة البرنامج التمثيلي وذلك عند فصل الخط عن الشبكة عند استخدام رباعي أقطاب π .



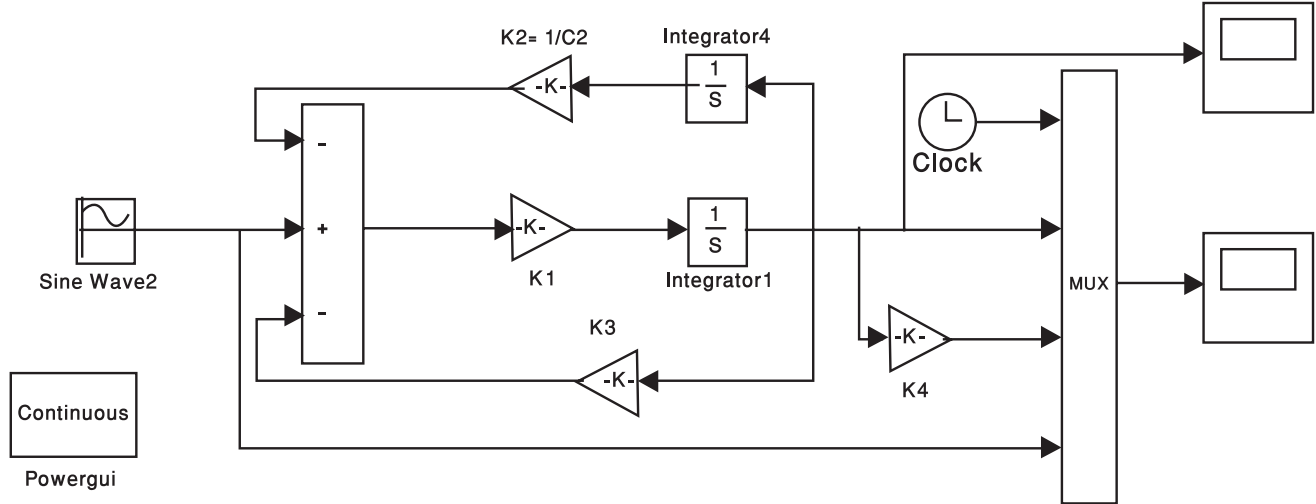
الشكل رقم (6 - 28)

يمكن الملاحظة من منحنى التغيرات أن القيمة الأعظمية للتوتر الزائد الذي ينتج في هذه الحالة العابرة عند فصل الخط ذي التوتر 400 ك ف عن الشبكة العامة تساوي: $U_2 \max = KV 442$

أي أن زيادة التوتر تبلغ 1.90 من قيمة التوتر النظامي للخط وهي أقل من قيمة توتر الاختبار الذي توصي الهيئة العالمية للكهرباء IEC والذي يساوي $U_{test} = 2.5 U_n$.

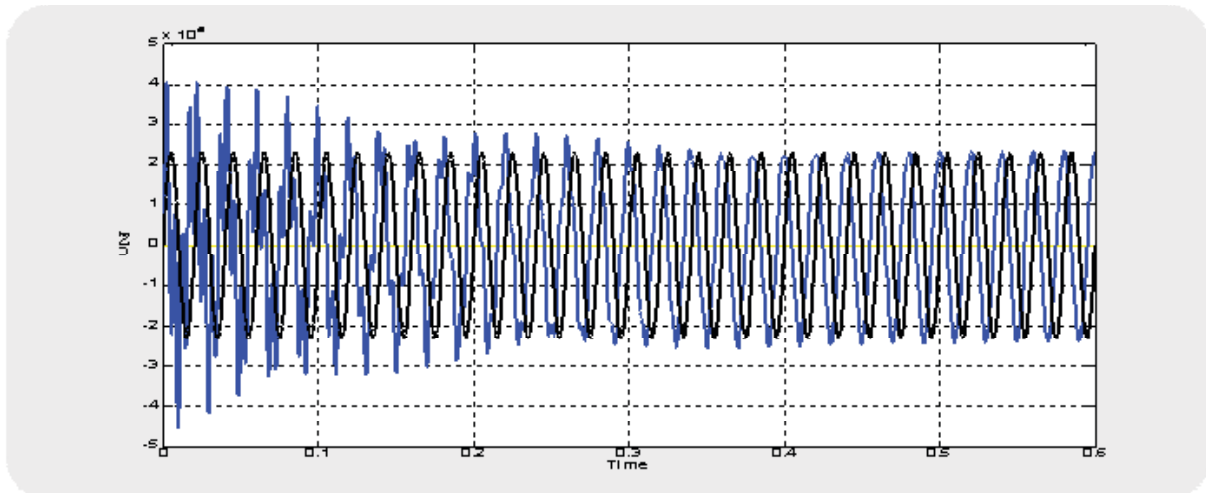
6 - 2 - 3 محاكاة العناصر الكهربائية الممثلة للنظام في بيئة MATLAB:

نمذجة الحالة العابرة الناتجة عن فصل الخط عن الشبكة الكهربائية باستخدام بيئة، يبين الشكل رقم (6 - 29) نمذجة الحالة العابرة الناتجة عن فصل الخط عن الشبكة الكهربائية باستخدام بيئة عند مكافئة الخط برباعي أقطاب T:



الشكل رقم (6 - 29)

يبين الشكل الشكل رقم (6 - 30) تغيرات التوتر في نهاية وبداية الخط الكهربائي U_1 U_2 الذي تم الحصول عليه بعملية النمذجة في بيئة ماتلاب وذلك عند فصل الخط عن الشبكة عند استخدام رباعي أقطاب T.



الشكل رقم (6 - 30)

يمكن الملاحظة من منحنى التغيرات أن القيمة الأعظمية للتوتر الزائد الذي ينتج في هذه الحالة العابرة، عند الخط ذي التوتر 400 ك ف عن

الشبكة العامة تساوي: $U_{2 \max} = KV 464$

أي أن زيادة التوتر تبلغ 1.99 من قيمة التوتر النظامي للخط وهي أقل من قيمة توتر الاختبار الذي توصي الهيئة العالمية للكهرباء IEC والذي يساوي $U_{test} = 2.5 U_n$.

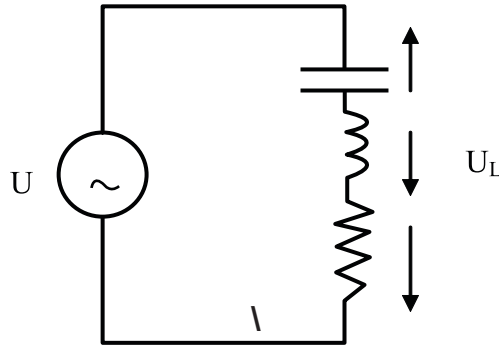
6 - 3 الحالة العابرة والتوترات الكهربائية الزائدة التي تنتج عند الطنين الكهرطيسي [1], [4], [6]

يمكن أن تظهر حالة الطنين في الدارة الكهربائية التي تحتوي على عنصر سعة C وعنصر تحريضي L عند تحقق شروط خاصة تسمى شروط الطنين، وقد يظهر الطنين في الدارة الكهربائية التي تحتوي على عناصر أومية وسعوية وتحريضية R, L, C مربوطة على التسلسل فتسمى هذه الحالة "ظاهرة الطنين التسلسلي"، أو وقد يظهر الطنين في الدارة الكهربائية التي تحتوي على عناصر أومية وسعوية وتحريضية مربوطة على التفرع فتسمى هذه الحالة "ظاهرة الطنين التفرعي". وحيث أن خطوط التوتر العالي الكهربائي تكافئ بعامل تحريض كهربائي L وبسعة كهربائية C مركزة أو موزعة بشكل خطي على طول الخط الكهربائي، وكذلك هي الحال في مكافأة ملفات وشائع التعويض العرضية أو ملفات وشائع محولات القدرة، فإن الدارة المكافئة للشبكة الكهربائية ستحتوي على عناصر R, L, C مربوطة على التسلسل أو على التفرع.

ويحدث الطنين الكهرطيسي في الدارة المكافئة للخط ولشبكة التغذية عندما تتساوى الممانعة الردية التحريضية مع الممانعة الردية السعوية في الدارة أي:

$$X_L = X_C \quad (42-6)$$

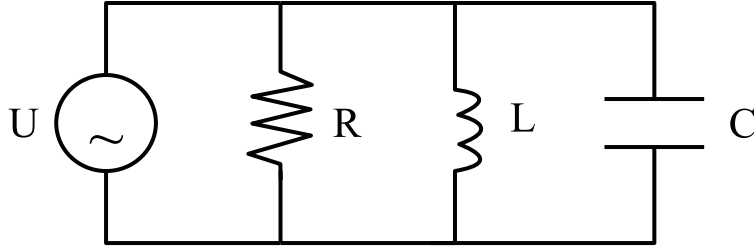
فإذا كانت السعات موصولة على التسلسل مع الملف التحريضي نحصل على الطنين التسلسلي وهو طنين التيار، أي أن التيار في الدارة التسلسلية يمكن أن يأخذ نظرياً قيمة لا نهائية، وهذه هي حالة الدارة الكهربائية المثالية والتي تكون قيمة المقاومة الكهربائية فيها مهملة ومساوية للصفر. ويبين الشكل رقم (6 - 33) دارة الطنين الكهرطيسي التسلسلي.



الشكل رقم (6 - 33) دارة الطنين الكهرطيسي التسلسلي

إلا أنه في الحالة العملية تكون للمقاومة الكهربائية المكافئة للدارة قيمة محددة ولا تساوي الصفر، وهذا يؤدي إلى تحديد قيمة التيار في الدارة التسلسلية، وتكون قيمة التوتر السعوي U_C مساوية لقيمة التوتر التحريضي U_L .

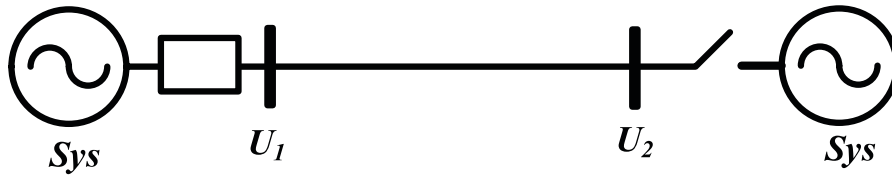
أما إذا كانت السعة موصولة على التفرع مع الملف التحريضي فإننا نحصل دارات الطنين التفرعية، حيث تنخفض قيمة التيار لتصبح أصغر، وتتساوى قيمة التيار السعوي I_c مع قيمة التيار التحريضي I_L ، وتصبح الدارة أومية كما في الشكل (6 - 34).



الشكل (34-6) دائرة الطنين الكهرطيسي التفرعي

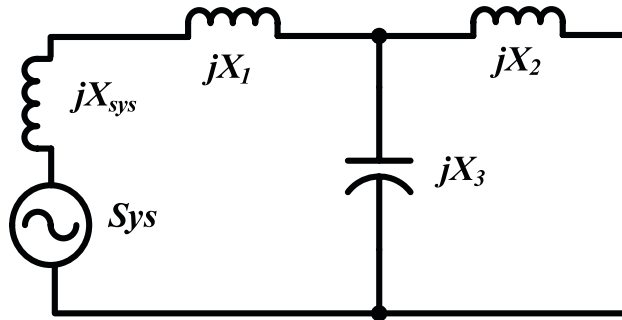
6 - 3 - 1 الحالة العابرة والتوترات الكهربائية الزائدة التي تنتج عن الطنين الكهرطيسي عند التردد الصناعي 50 Hz [16], [49], [55], [48], [40], [17]

يمكن أن تحدث هذه الحالة عمليا عند ربط شبكتين أو محطتين كهربائيتين على التوازي بواسطة خط كهربائي، كما هو مبين في الشكل رقم (6 - 35) حيث تتم تغذية الخط الكهربائي من أحد طرفيه مع بقاء الطرف الآخر على الفراغ (بدون حمل).



الشكل رقم (6 - 35)

تعتبر عند دراسة هذه الحالة في بداية الأمر، أن المقاومات الكهربائية المكافئة لمختلف عناصر الشبكة الكهربائية تكون مهمة، أي أنه يتم إهمال الضياعات الكهربائية في هذه المقاومات، وبين الشكل رقم (6 - 36) الدارة المكافئة للخط الكهربائي في حالة العمل النظامية وهو ممثل برباعي أقطاب على شكل T.



الشكل رقم (6 - 36)

حيث:

X_{sys} تمثل المفاعلة التحريضية المكافئة للشبكة الكهربائية
 X_1, X_2, X_2 المفاعلات التحريضية لرباعي الأقطاب T المكافئ للخط الكهربائي
تكتب معادلات تشغيل الخط الكهربائي في هذه الحالة كما يلي:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \cdot \cos \theta l + jZ_c \cdot \underline{I}_2 \cdot \sin \theta l \\ \underline{I}_1 &= j \frac{\underline{U}_2}{Z_c} \cdot \sin \theta l + \underline{I}_2 \cdot \cos \theta l \end{aligned} \right\} \quad (6 - 43)$$

حيث:

U_1, U_2 التوترات في بداية وفي نهاية الخط.

I_1, I_2 التيارات في بداية وفي نهاية الخط.

Z_c الممانعة المميزة للخط.

θ ثابتة انتشار الأمواج الكهرومغناطيسية على الخط، وتعطى بالعلاقة:

$$\theta = \alpha + j\beta \quad (6 - 44)$$

حيث:

α هي ثابتة التخميد للخط الكهربائي و β هي ثابتة انزياح الطور.

وينتج عند إهمال المقاومات الكهربائية ما يلي:

$$\alpha = 0$$

$$\theta = j\beta$$

$$\beta = \omega \sqrt{L_o C_o} = \frac{\omega}{g}$$

وبذلك يمكن كتابة معادلات الخط الكهربائي بالشكل التالي:

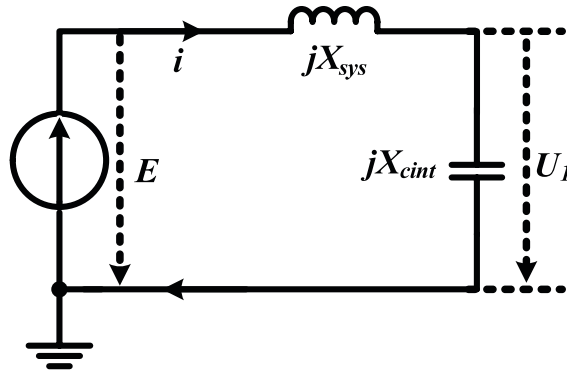
$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \cdot \cos \beta \ell \\ \underline{I}_1 &= j \frac{\underline{U}_2}{Z_c} \cdot \sin \beta \ell \end{aligned} \right\} \quad (6 - 45)$$

يمكن استناداً إلى هذه المعادلات تعريف سعة مكافئة تسمى سعة الدخول إلى الخط الكهربائي كما يلي:

$$(6 - 46) \quad jX_{cint} = \frac{U_1}{I_1} = -jZ_c \cdot \text{ctg}(\beta \cdot \ell)$$

يمكن الملاحظة من هذه العلاقة أنه عندما تكون $0 < \beta \ell < \frac{\pi}{2}$ فإن الخط الكهربائي يكون ذو طبيعة سعوية.

فتصبح الدارة المكافئة للخط كما في الشكل (6-37):



الشكل (6 - 37)

يمكن لهذا الخط الكهربائي أن يدخل في حالة طنين كهرومغناطيسي وذلك عندما تتساوى قيمة السعة المكافئة للخط مع المفاعلة المكافئة للشبكة. وتصبح بذلك قيمة التيار في الدارة المكافئة لانهائية وكذلك قيمة التوتر تصبح لا نهائية في الكبر. أن شرط الطنين يتحقق عندما تتحقق العلاقة:

أي:

$$X_{sys} - X_{cint} = 0$$

$$(47 - 6) \quad X_{C_{int}} = Z_c \cdot \text{ctg}(\beta \cdot \ell)$$

$$\text{ctg}(\beta \ell) = \frac{X_{sys}}{Z_c}$$

وبذلك يمكن كتابة قيمة التوتر في بداية الخط كما يلي:

$$(48 - 6) \quad \underline{U}_1 = \underline{E} \cdot \frac{-j \cdot X_{C_{int}}}{-j X_{C_{int}} + j X_{sys}}$$

أو بشكل آخر

$$(49 - 6) \quad \underline{U}_1 = \underline{E} \frac{1}{1 - \frac{X_{sys}}{X_{C_{int}}}}$$

أما قيمة التوتر في نهاية الخط الكهربائي فتعطى بالعلاقة التالية:

$$\underline{U}_2 = \frac{\underline{U}_1}{\cos(\beta \cdot \ell)}$$

وإذا تم استبدال قيمة التوتر في بداية الخط $\underline{U}_1$ فستنتج العلاقة التالية:

$$\underline{U}_2 = \frac{\underline{E}}{\cos(\beta \cdot \ell) - \frac{X_{sys}}{Z_c} \cdot \sin(\beta \cdot \ell)}$$

ومن تحليل هذه العلاقة الأخيرة يمكن استنتاج الملاحظات الهامة التالية:

- يظهر تأثير طول الخط الكهربائي على قيمة التوتر في نهاية الخط، فكلما ازداد طول الخط ازدادت قيمة $\sin \beta$ ونقصت قيمة $\cos \beta$ تزداد قيمة التوتر في نهاية الخط الكهربائي.
- يظهر تأثير المفاعلة المكافئة للشبكة الكهربائية على قيمة التوتر في نهاية الخط كما يلي:

تعطى قيمة المفاعلة المكافئة للشبكة الكهربائية بالعلاقة:

$$X_{sys} = \frac{U_n^2}{S_{sc}}$$

حيث:

- U_n هو التوتر النظامي للشبكة التي يربط إليها الخط الكهربائي.
- S_{sc} هي استطاعة القصر للشبكة التي يربط إليها الخط الكهربائي.

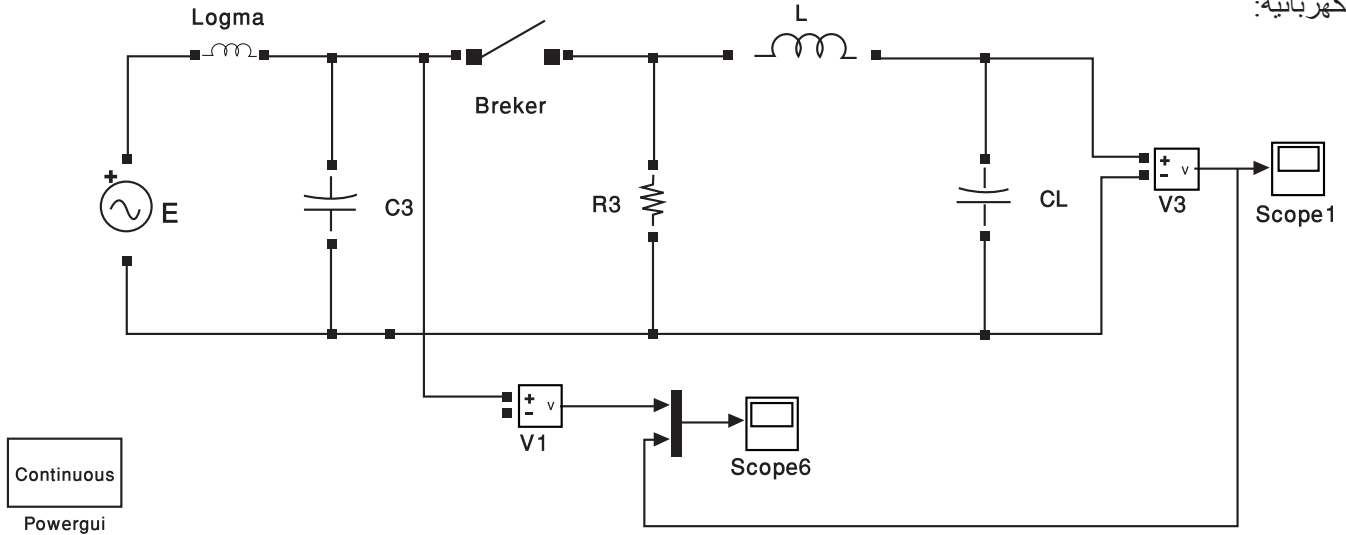
يلاحظ أنه كلما كانت استطاعة القصر للشبكة أصغر كانت قيمة المفاعلة المكافئة للشبكة أكبر، وتكبر بالتالي إمكانية الاقتراب من تحقيق شرط الطنين الكهربائي.

كما أنه لأجل قيمة ثابتة للمفاعلة المكافئة للشبكة X_{sys} ولأجل استطاعة قصر محددة للشبكة S_{sc} فإنه كلما ازداد طول الخط الكهربائي كلما اقتربت الدارة من الدخول في حالة الطنين الكهربائي.

لا تدخل الدارة الكهربائية عملياً في حالة الطنين ولا تصل قيمة التوتر الكهربائي إلى قيمة لا نهائية في الكبر لأن هناك ضياعات كهربائية تحد من قيمة هذه التوترات.

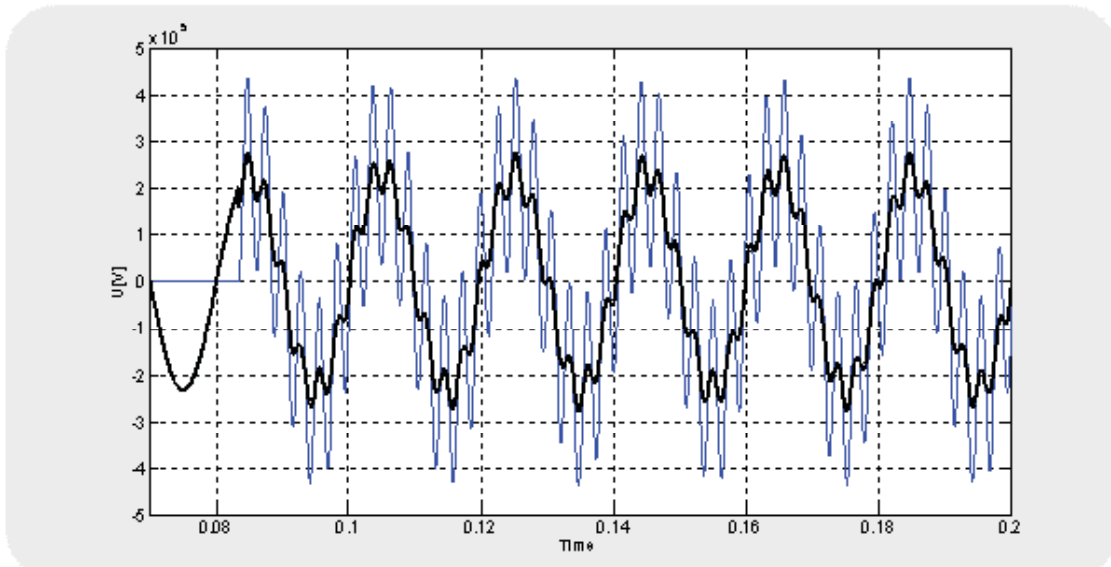
6 - 3 - 2 دراسة حالة المحاكاة باستخدام العناصر الكهربائية الممثلة للنظام:

يبين الشكل رقم (6 - 38) النموذج التمثيلي بدارة T للخط الكهربائي ذي التوتر KV 400 مع الشبكة المغذية باستخدام العناصر الكهربائية:



الشكل رقم (6 - 38) النموذج التمثيلي للشبكة باستخدام العناصر الكهربائية

يبين الشكل (6 - 39) تغيرات التوتر في نهاية وبداية الخط الكهربائي U_1 و U_2 الذي تم الحصول عليها بعملية النمذجة في بيئة البرنامج التمثيلي وذلك عند الاقتراب من شروط الطنين الكهرطيسي باستخدام رباعي أقطاب T.

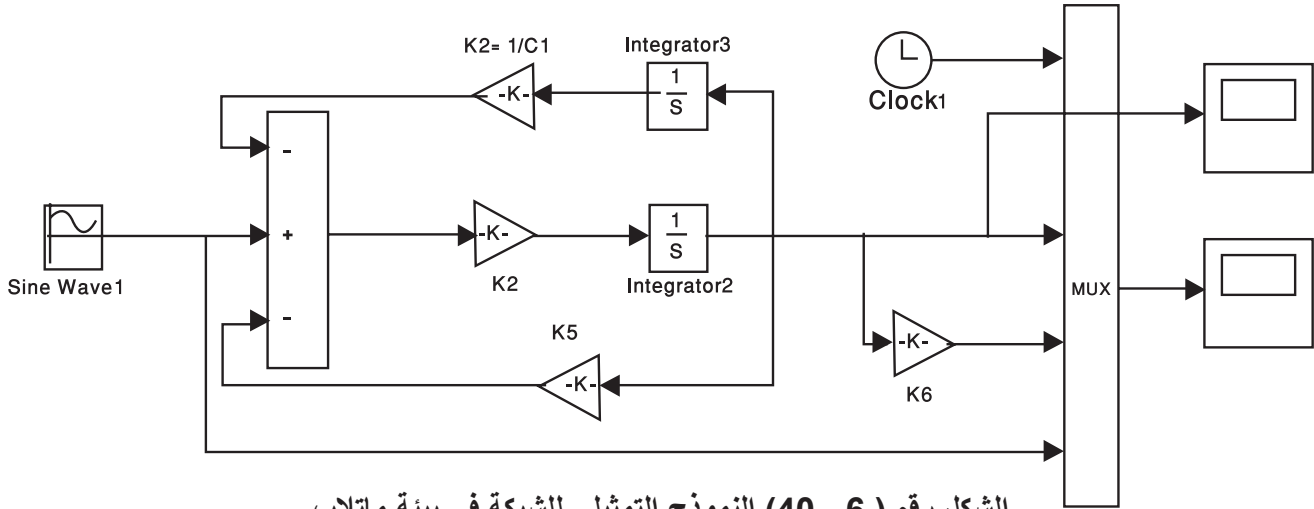


الشكل رقم (6 - 39) تغيرات التوتر في نهاية وبداية الخط الكهربائي U_1 و U_2 عند الاقتراب من شروط الطنين الكهرطيسي باستخدام البرنامج التمثيلي

يمكن الملاحظة من منحنى التغيرات أن القيمة الأعظمية للتوتر الزائد الذي ينتج في هذه الحالة العابرة، عند الخط ذي التوتر 400 ك ف وتوتر طور 232 ك ف عند الاقتراب من شروط الطنين الكهرطيسي تساوي: $U_{2\max} = 442 \text{ KV}$ أي أن زيادة التوتر تبلغ 1.91 من قيمة التوتر النظامي للخط وهي أقل من قيمة توتر الاختبار الذي توصي الهيئة العالمية للكهرباء IEC والذي يساوي $U_{\text{test}} = 2.5 U_n$.

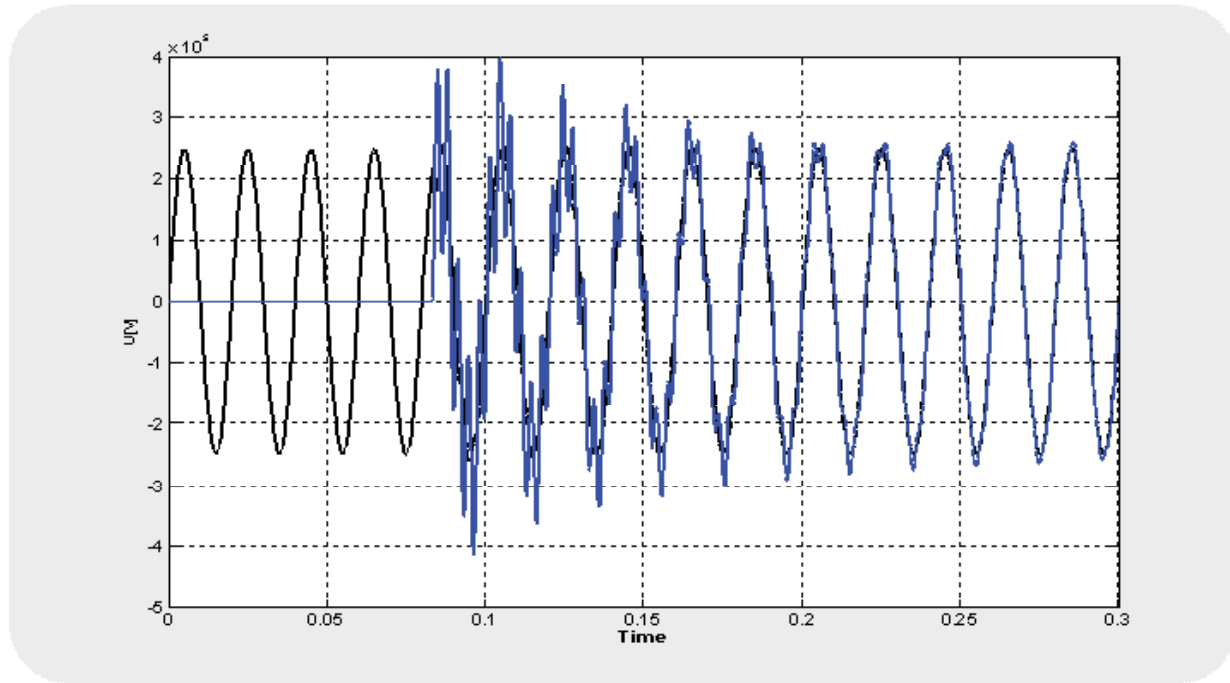
6 - 3 - 3 دراسة حالة باستخدام محاكاة العناصر الكهربائية الممثلة للنظام في بيئة MATLAB:

يبين الشكل رقم (6 - 40) النموذج التمثيلي بدارة π للخط الكهربائي ذي التوتر KV 400 مع الشبكة المغذية باستخدام بيئة ماتلاب:



الشكل رقم (6 - 40) النموذج التمثيلي للشبكة في بيئة ماتلاب

يبين الشكل (6 - 41) تغيرات التوتر في نهاية وبداية الخط الكهربائي U_1 و U_2 الذي تم الحصول عليها بعملية النمذجة في بيئة ماتلاب وذلك عند الاقتراب من شروط الطنين الكهرطيسي باستخدام رباعي أقطاب π .



الشكل رقم (6 - 41) تغيرات التوتر في نهاية وبداية الخط الكهربائي U_1 و U_2 عند الاقتراب من شروط الطنين الكهرطيسي باستخدام بيئة ماتلاب

يمكن الملاحظة من منحنى التغيرات أن القيمة الأعظمية للتوتر الزائد الذي ينتج في هذه الحالة العابرة، عند الخط ذي التوتر 400 ك ف عند الاقتراب من شروط الطنين الكهرطيسي تساوي: $U_2 \max = KV 424$ أي أن زيادة التوتر تبلغ 1.83 من قيمة التوتر النظامي للخط وهي أقل من قيمة توتر الاختبار الذي توصي الهيئة العالمية للكهرباء IEC والذي يساوي $U_{test} = 2.5 U_n$

6 - 4 الحالة العابرة الناشئة عن الأعطال غير المتناظرة في شبكات التوتر العالي الكهربائية:

يقال أنه قد حصل عطل في شبكة كهربائية ما، عندما يمس أحد النواقل بصورية عفوية ناقلا آخر توتره مختلف، أو عندما يمس أحد النواقل الأرض أو قطعة ناقلة موصولة بالأرض.

ويمكن تمييز نوعين من الأعطال:

- الأعطال المتناظرة: الأعطال التي توصل فيها الأطوار الثلاثة معا ويمكن أن تكون بتماس مع الأرض أو أن لا تمس الأرض.
- الأعطال غير المتناظرة: وتشمل عطل طور واحد مع الأرض، أو عطل طورين مع بعضهما ومع الأرض، أو عطل طورين مع بعضهما وبدون الأرض.

وتتسبب الأعطال الكهربائية غالبا في نشوء توترات عالية قد تؤدي إلى انهيار العازلية على خطوط القدرة الكهربائية. وتتعلق قيمة هذه التوترات بنوع العطل ولحظة وقوعه ومكانه وبخصائص الشبكة التي يحصل بها هذا العطل.

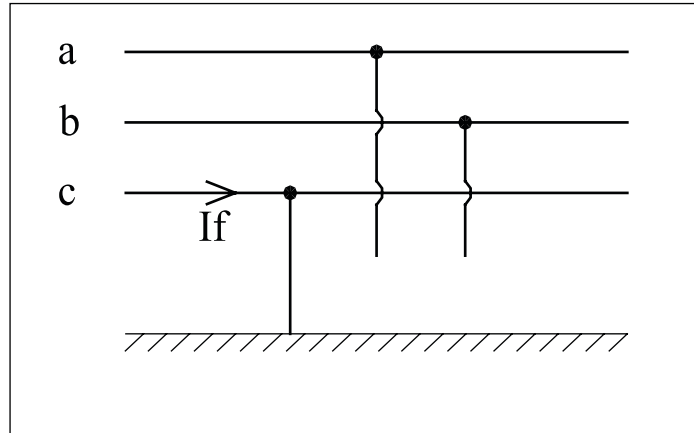
6 - 4 - 1 حساب التوترات العابرة الناتجة عن قصر دائرة غير متناظر: [59], [41], [17], [15]

إن ما يقارب 95 % من الأعطال التي تحدث في الشبكات الكهربائية هي من نوع قصر دائرة طور واحد مع الأرض. وقد تكون هذه الأعطال دائمة أو لحظية. وتنشأ عن أسباب كثيرة منها: انهيار العازل الحامل للناقل، أو نتيجة الاهتزاز أو نتيجة انفراغ بين الطور و الأرض، ويمكن لهذا النوع من الأعطال أن يؤدي إلى تيار عطل أكبر من تيار العطل الثلاثي (المتناظر) في بعض الحالات. ولكن بشكل عام يكون تيار العطل الأحادي أصغر من تيار العطل المتناظر. وسوف تتم دراسة نوعين من الأعطال وهي الأكثر حدوثا في الشبكات الكهربائية وهي: عطل طور مع الأرض و عطل طورين مع الأرض. وسيتم حساب التوترات الناتجة في مكان العطل على الأطوار السليمة وكذلك التوترات في بداية الخط وذلك بافتراض أن نقطة حصول العطل هي في نهاية الخط.

6 - 4 - 2 حساب التوترات العابرة الناتجة عن حالة عطل طور واحد مع الأرض:

إن الدائرة الرمزية المكافئة للعطل مبينة في الشكل رقم (6 - 42). أما تيار العطل فيعطى بالعلاقة التالية:

$$I_f = I_a = \frac{3 * E_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (6 - 50)$$



الشكل رقم (6 - 42)

وبافتراض أن $Z_1 = Z_0$ و $k = Z_0 / Z_1$ فإن التوترات على الأطوار السليمة في نقطة العطل تعطى بالعلاقات: (6 - 51)
 $U_a = 0$

$$U_b = E_a * [-\frac{3*k}{2} - j * (\frac{\sqrt{3}}{2}k + \sqrt{3})] * \frac{1}{(2+k)}$$

$$U_c = E_a * [-\frac{3*k}{2} + j * (\frac{\sqrt{3}}{2}k + \sqrt{3})] * \frac{1}{(2+k)}$$

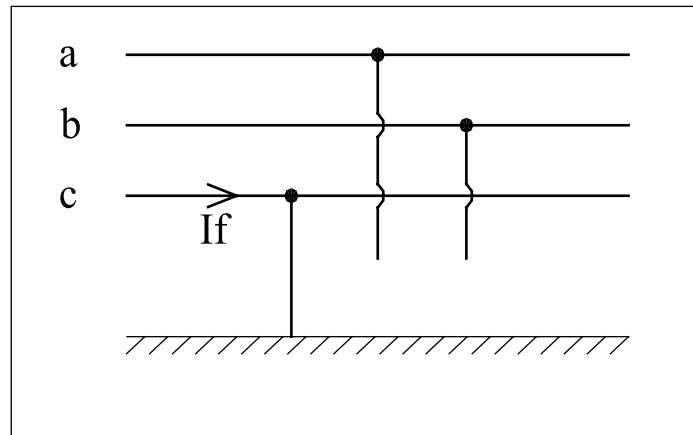
وإذا افترضنا أن $Z_1=Z_2=Z_0$ فإن تيار العطل يصبح مساويا:

$$I_f = \frac{E_a}{Z_1}$$

وفي هذه الحالة يكون تيار العطل مساويا للتيار الناتج عن عطل متناظر ثلاثي، وفيما عدا ذلك وحيث لدينا بشكل عام $Z_1=Z_2<Z_0$ لأن ممانعة الخطوط الكهربائية تشكل الممانعة الأكبر في الشبكة، حيث تصل الممانعة الصفرية للخطوط إلى حوالي $Z_0=(2.5-3)Z_1$ وخاصة في الخطوط متعددة الدارات (وذلك بفعل التحريض المتبادل)، في هذه الحالة يكون تيار العطل الأحادي مع الأرض أصغر من تيار العطل المتناظر. وهناك حالات يزيد فيها تيار العطل الأحادي مع الأرض عن نظيره تيار العطل المتناظر وخاصة الحالات التي يكون فيها مكان العطل قريبا جدا من المنوبة أو على أطرافها، حيث تكون ممانعة المنوبة هي التي تتحكم بشكل رئيسي بتيار العطل. وتكون Z_0 في المنوبات عادة أصغر من Z_1, Z_2 الأمر الذي يؤدي لأن تكون قيمة تيار العطل الأحادي مع الأرض أكبر من قيمة تيار العطل الثلاثي المتناظر. إن زيادة التوتر على الطورين السليمين V_b, V_c يؤدي إلى زيادة الإجهاد أكبر كلما ازدادت Z_0 مقارنة مع Z_1, Z_2 . إن الزيادة في توتر الطورين أثناء حدوث عطل للطور الثالث مع الأرض هي نتيجة للتحريض المتبادل بين تيار العطل و الطور السليم. ويمكن أن تؤدي زيادة التوتر هذه إلى انهيار عوازل الأطوار السليمة مما يؤدي إلى أن يتطور العطل الأحادي إلى عطل بين طورين أو ثلاثة أطوار.

6 - 4 - 3 حساب التوترات العابرة الناتجة عن حالة عطل طورين مع الأرض:

يبين الشكل رقم (6 - 43) الدارة الرمزية المكافئة للعطل.



الشكل رقم (6 - 43) الدارة الرمزية المكافئة لحساب تيار عطل طورين مع الأرض

تعطى شروط العمل عند حدوث العطل في هذه الحالة كما يلي:

$$I_a = 0$$

$$V_b = V_c = 0$$

$$I_f = I_b + I_c$$

وإذا تم افتراض أن: $Z_1=Z_2$ و $K=Z_0/Z_1$ فإن تيار العطل يعطى بالعلاقة :

$$(52-6) \quad I_f = \frac{E_a}{Z_1} \cdot \frac{3}{1+2K}$$

أي أن تيار العطل لطورين مع الأرض سيكون أكبر من تيار العطل المتناظر عندما تكون $K < 1$ أي عندما تكون $Z_0 < Z_1$ وهذا ممكن إذا حدث العطل قرب المنوبات وإذا كانت المنوبات مؤرضة تأريضا مباشرا أو عبر ممانعة صغيرة جداً. ويمكن حساب قيمة التيارين على الطورين المعطلين من العلاقتين : (53-6)

$$I_b = -\frac{E_a}{Z_1} * \frac{1}{(1+2k)} * \frac{\sqrt{3}}{2} [\sqrt{3} + j * (2k + 1)]$$

$$I_c = -\frac{E_a}{Z_1} * \frac{1}{(1+2k)} * \frac{\sqrt{3}}{2} [\sqrt{3} - j * (2k + 1)]$$

ويمكن حساب قيمة التوتر على الطور السليم عند نقطة العطل كما يلي:

$$(54-6) \quad V_a = E_a * \frac{3 * k}{(1+2k)}$$

ويتضح أن التوتر على الطور السليم يرتفع عندما يكون $K > 1$ أي $Z_0 > Z_1$ ويحدث العكس عندما يكون $K < 1$ أي $Z_0 < Z_1$. من المعلوم أنه عند حدوث الأعطال المذكورة سابقا فإن التوترات لا تستقر على قيمها المبينة في العلاقات السابقة وإنما تقفز إلى قيم مرتفعة خلال فترة زمنية صغيرة ثم تعود لتأخذ قيمها المستقرة المعروفة. ولتحديد قيم التوترات العابرة يمكن استخدام طريقة ثانية يتم فيها حساب قيمة الأعظمية للتوتر الزائد الذي ينتج في الحالة العابرة المرافقة لحدوث الأعطال غير المتناظرة، حيث يحسب التوتر العابر بالعلاقة:

$$(55-6) \quad U_{ov} = K_{ov} * K_{sh} * U_{ph}$$

حيث: K_{ov} يمثل قيمة ثابتة زيادة التوتر المستقر وتساوي

$$K_{ov} = \frac{U_{st}}{U_{ph}}$$

و حيث U_{st} تمثل القيمة المستقرة للتوتر بعد حدوث العطل.

U_{ph} التوتر الاسمي للطور.

ولحساب قيمة زيادة التوتر التي تنتج في الحالات المستقرة U_{st} عند حدوث القصر فإنه يتم استخدام نظرية المركبات المتناظرة وكما يلي:
- تحدد الدارات الرمزية المكافئة لكل مركبة من المركبات حسب شكل الشبكة الكهربائية وعناصرها وحسب طريقة توصيل المحولات والمنوبات بالنسبة للدارة الصفيرية وتحسب الممانعات التحريضية المكافئة لكل من هذه الدارات منسوبة إلى نقطة العطل.
إن زيادة التوترات التي تظهر عند حدوث عطل أحادي أو عطل ثنائي مع الأرض محسوبة في نقطة العطل تعطى بالعلاقات التالية وذلك بافتراض أن نقطة العطل تقع في نهاية الخط.

الطور	قصر دائرة أحادي مع الأرض a + G	قصر دائرة ثنائي طورين مع الأرض b+c
a	0	$U_a \cdot 3X_0 / (X_{12} + X_0)$
b	$U_a [-1.5 \cdot X_0 / (X_{02} + X_1) - j \cdot 0.886]$	0
c	$U_a [-1.5 \cdot X_0 / (X_{02} + X_1) + j \cdot 0.886]$	0

أما زيادة التوترات التي تظهر عند حدوث قصر دائرة أحادي مع الأرض محسوبة في نقطة غير نقطة القصر فتحسب بالعلاقات :

الطور	قصر دائرة أحادي مع الأرض a + G
a	$U_b - U_a \cdot (K_0 \cdot X_{02} + K_1 \cdot X_1) / (X_{02} + X_1)$
b	$(-0.5 - j \cdot 0.866) U_b - U_a \cdot (K_0 \cdot X_{02} + K_1 \cdot X_1) / (X_{02} + X_1)$
c	$(-0.5 + j \cdot 0.866) U_b - U_a \cdot (K_0 \cdot X_{02} - K_1 \cdot X_1) / (X_{02} + X_1)$

أما زيادة التوتر التي تظهر عند حدوث قصر دائرة ثنائي الطور مع الأرض محسوبة في أي نقطة غير نقطة القصر فتحسب بالعلاقات :

الطور	قصر دائرة ثنائي الطور مع الأرض b + c + G
a	$U_b + U_a \cdot (K_0 \cdot X_0 - K_1 \cdot X_1) / (X_{12} + X_0)$
b	$(-0.5 - j \cdot 0.866) U_b + U_a \cdot [(K_0 \cdot X_{00.5} + K_1 \cdot X_1) / (X_{12} + X_0) - j \cdot 0.866 \cdot k_1]$
c	$(-0.5 + j \cdot 0.866) U_b + U_a \cdot [(K_0 \cdot X_{00.5} + K_1 \cdot X_1) / (X_{12} + X_0) - j \cdot 0.866 \cdot k_1]$

حيث:

U_a توتر الطور a في نقطة القصر قبل حدوث العطل

U_b توتر الطور b في نقطة القصر قبل حدوث العطل

K_0, K_1 ثوابت نقل التوتر عبر الشبكة المكافئة المركبة الموجبة والسالبة

$$K_1 = \frac{1}{\cos \beta_1 \cdot l} \cdot \frac{X_{st1}}{X_{st1} + X_{int1}} \quad (57 - 6)$$

$$K_0 = \frac{1}{\cos \beta_0 \cdot l} \cdot \frac{X_{st0}}{X_{st0} + X_{int0}}$$

حيث X_{st1} , X_{st0} المفاعلة الموافقة و الصفرية لنظام الإرسال

X_{int1} , X_{int0} مفاعلة الدخول الصفرية والموجبة للخط

يحسب التوتر الزائد العابر في بداية الخط عند حدوث العطل بالعلاقة:

$$\underline{U}_1 = E \cdot \frac{jX_{1\ell 0}}{jX_{st1} + jX_{1\ell 0}} \quad (58 - 6)$$

حيث:

$$E = 1.1 \cdot U_{ph} \quad (59 - 6)$$

$$X_{1\ell 0} = j \cdot Z_{c1} \cdot \text{ctg} \beta \ell$$

مفاعلة الدخول للخط وهو بدون حمل

$$X_{st1} = jX_g + jX_T$$

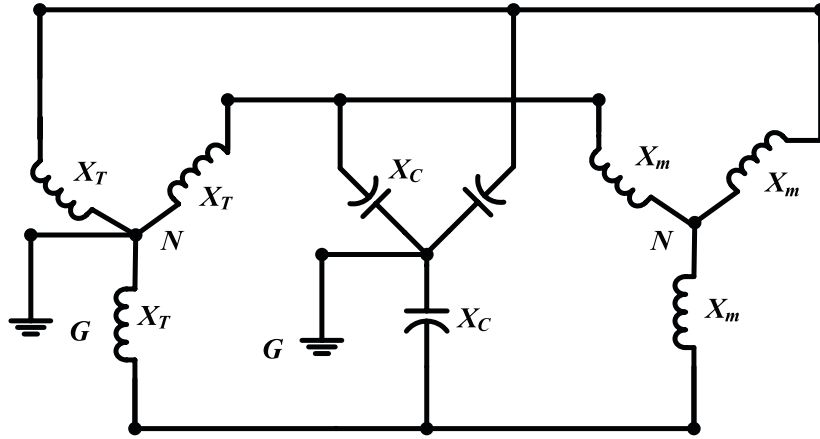
$$\underline{U}_2 = \frac{1}{\cos \beta_1 l} \cdot \underline{U}_1 \quad \text{مفاعلة محطة الإرسال والتوتر في نهاية الخط :}$$

6 - 5 الحالة العابرة الناتجة عن انقطاع أطوار الخط الكهربائي في شبكات التوتر العالي الكهربائية: [59], [15]

قد يحدث في شبكات التوتر العالي وعند إجراء عمليات الوصل والفصل لأحد الخطوط الكهربائية أن يتم إغلاق قطبين من أقطاب القاطع الآلي في بداية الخط ويبقى القطب الثالث مفتوحاً، وتشبه هذه الحالة عملية انقطاع أحد أطوار الخط الكهربائي، كما قد يحدث عند إجراء عمليات الوصل والفصل لأحد الخطوط الكهربائية أن يتم إغلاق قطب واحد من أقطاب القاطع الآلي في بداية الخط ويبقى القطبان الآخران مفتوحان، وتشابه هذه الحالة عملية انقطاع طورين من أطوار الخط الكهربائي. أحياناً عند حدوث عطل أرضي على أحد الأطوار يتم فصل الطور المعطل فقط، في حين تبقى التغذية مستمرة على الطورين السليمين. يؤدي هذا الإجراء إلى تهيئة الظروف المناسب لظهور حالة عابرة.

6 - 5 - 1 الحالة العابرة الناتجة عن انقطاع أحد أطوار الخط الكهربائي في شبكات التوتر العالي الكهربائية: [59], [15]

يبين الشكل رقم (6 - 44) دائرة مكافئة لشبكة تغذية ثلاثية الطور، حيث تكون نقطة النجمة لمحولة التغذية موصولة إلى الأرض بشكل مباشر حيث:

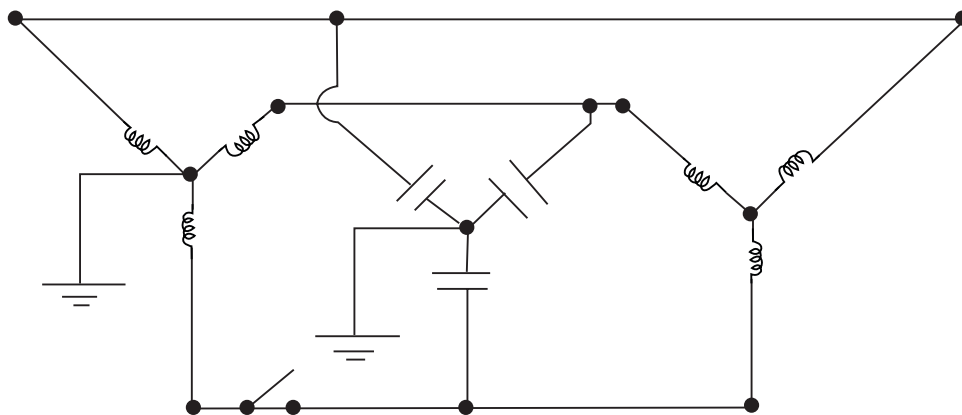


الشكل رقم (6 - 44) دائرة مكافئة لشبكة تغذية ثلاثية الطور

- الممانعة التحريضية لمحولة التغذية لكل طور
- الممانعة المتناظرة لكل طور من أطوار الخط ذات الصفة السعوية
- الممانعة التحريضية المتناظرة لمحولة محطة الاستقبال .

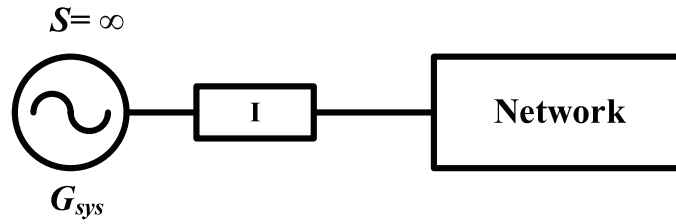
عند انقطاع الطور A مثلاً بين النقطة $A - A'$ ، تصبح الدائرة المكافئة كما هو مبين في الشكل رقم (6 - 45)، وإذا تم افتراض أن X_T صغيرة جداً بالمقارنة مع بقية عناصر الشبكة ويكمن إهمالها وبذلك يصبح كمن العقدة 1 وكمن العقدة 2 مساوٍ لكمن النقطة "O" أي يساوي الصفر.

ويمكن أن تحدث عملياً مثل هذه الظاهرة عندما نقوم بإغلاق أو فتح القاطع الآلي لخط كهربائي ما، فلا تغلق تماسات الأطوار الثلاثة معاً، بحيث يبقى تماس القاطع الآلي لأحد الأطوار مفتوحاً في حين تغلق الأطوار الأخرى، وفي هذه الحالة يمكن أن تنتج حالة عابرة للاقتراب من شروط الطنين الكهربائي ويظهر توتر عابر زائد على الطور الذي يبقى مفتوحاً.



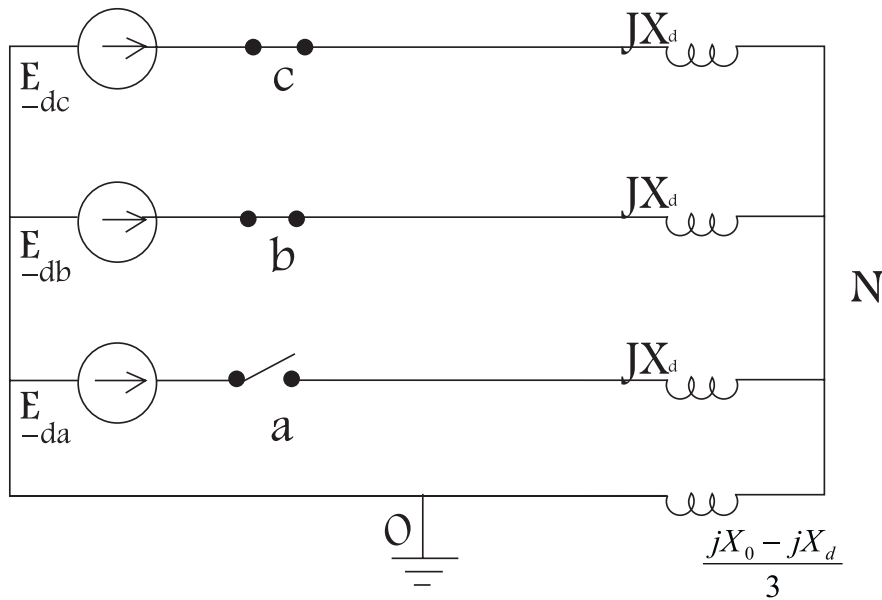
الشكل (6 - 45) انقطاع أحد الأطوار في النقطة A

ويمكن طرح مسألة زيادة التوتر في الحالة العابرة كما يلي:
إذا تم اعتبار شبكة كهربائية ذات استطاعة كهربائية $S = \infty$ كما في الشكل رقم (6 - 46)،



الشكل رقم (6 - 46)

يمثل القاطع I في هذه الحالة نقطة عدم التناظر الذي سيحدث في الشبكة حيث سيغلق القاطع تماس طورين فقط ويبقى تماس الطور الثالث مفتوحاً، وإذا اعتبرت الشبكة بدون ضياعات أومية فإنه يمكن تحديد الدارة المكافئة لمثل هذه الاختلال في التناظر كما في الشكل رقم (6 - 47):



الشكل رقم (6 - 47) اغلاق قطبين للقاطع الآلي وبقاء القطب الثالث مفتوح

حيث:

- X_d تمثل المركبة المباشرة لممانعة الدخول إلى الشبكة بعد حذف القوى المحركة منها.
 - X_0 تمثل المركبة الصفرية لممانعة الدخول إلى الشبكة بعد حذف القوى المحركة منها.
- يطلب في هذه الدارة تحديد التوتر على الطور "a" أي على طرفي التماس "a" للقاطع الآلي حيث يمكن أن يظهر التوتر العابر. أما التوترات U_b و U_c فإننا نلاحظ أنها تساوي:

$$\underline{E}_b = \underline{U}_b = \underline{E}_{db}$$

$$\underline{U}_c = \underline{E}_{dc} = \underline{E}_c$$

وبذلك لا تؤثر الحالة العابرة على الأطوار السليمة وسوف ينحصر الأثر على الطور الذي أصيب بالعطل. والتدقيق في الشكل رقم (6 - 48) يلاحظ أن الدارة تكافئ بدارة مؤلفة من مولدتين مع مفاعلتين على التفرع مع مفاعلة ثالثة على التسلسل. يتم حساب المولد المكافئ للدارة بالعلاقة:

$$(60 - 6) \quad \underline{E}_{eq} = \frac{\sum \underline{Y}_K \underline{E}_K}{\sum \underline{Y}_K}$$

حيث:

$$Y_q = \sum_{K=1}^m Y_K \quad \text{• السماحية المكافئة للدارة}$$

$$\underline{Y}_K = \frac{1}{Z_K} \quad \text{أو} \quad \underline{Z}_K \quad \text{• الممانعة المكافئة لضاع المولدة}$$

ويتم حساب القوة المحركة الكهربائية في الدارة المبينة أعلاه بالعلاقة:

$$(61 - 6) \quad E_{eq} = \frac{\underline{E}_{db} \cdot \frac{1}{jxd} + \underline{E}_{dc} \cdot \frac{1}{jxd}}{\frac{1}{jxd} + \frac{1}{jxd}} = \frac{\underline{E}_{db} + \underline{E}_{dc}}{2}$$

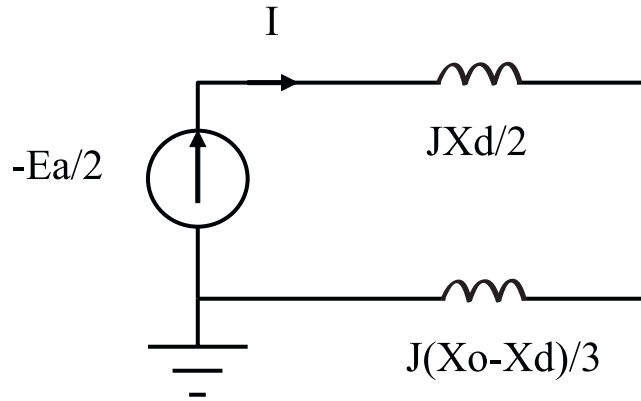
$$\underline{E}_{db} + \underline{E}_{dc} = -\underline{E}_{da} \quad \text{وباعتبار أن:}$$

$$(62 - 6) \quad \underline{E}_q = -\frac{\underline{E}_{da}}{2} \quad \text{ينتج:}$$

وكذلك

$$(63 - 6) \quad \underline{Z}_q = \frac{1}{jxd} + \frac{1}{jxd} = \frac{2}{jxd} \Rightarrow \underline{Z}_q = j \frac{xd}{2}$$

وبذلك يتم الحصول على الدارة المكافئة المبينة في الشكل رقم (6 - 48):



الشكل رقم (6 - 48) الدارة المكافئة عند انقطاع أحد أطوار الخط

المهم في هذه الدارة هو تحديد قيمة فرق الكمون بين النقطة المحايدة N والأرض O أي:

$$(64 - 6) \quad \underline{U}_N = j \frac{x_0 - x_d}{3} \underline{I} = \underline{U}_a$$

لكن لدينا:

$$(65 - 6) \quad \underline{I} = -\frac{\frac{\underline{E}_{da}}{2}}{j \frac{xd}{2} + j \frac{x_0 - x_d}{3}} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\underline{E}_a}{j(\frac{xd}{2} + \frac{x_0 - x_d}{3})}$$

يمكن الملاحظة في هذه الحالة، وعندما تكون قيمة المخرج في المعادلة السابقة مساوية للصفر، فإن التيار I يأخذ قيمةً متزايدة تصل نظرياً للنهاية وهذا يعني أن U_a تأخذ قيمةً لا نهائية نظرياً. هذا الشرط يشبه شرط الطنين ويعرف كما يلي:

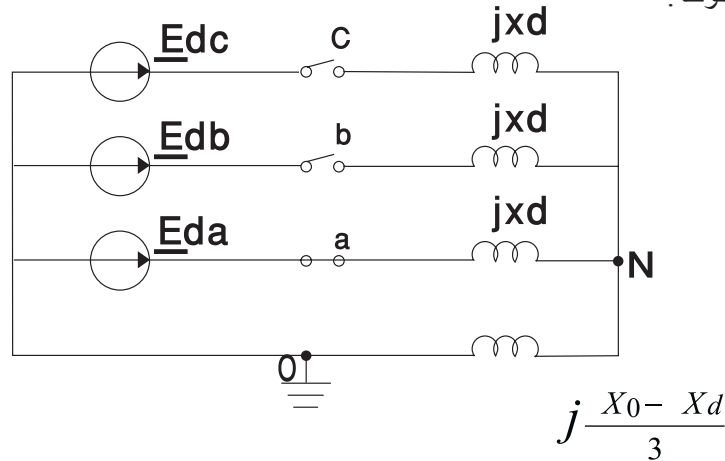
$$(66 - 6) \quad \frac{xd}{2} + \frac{x_0 - x_d}{3} = 0 \Rightarrow 3x_d + 2x_0 - 2x_d = 0$$

$$x_d + 2x_0 = 0 \Rightarrow \frac{x_0}{x_d} = -\frac{1}{2}$$

يتحقق هذا الشرط إذا كانت x_0 و x_d ذات طبيعة مختلفة، أي واحدة ذات طبيعة سعوية والأخرى ذات طبيعة تحريضية أو بالعكس.

6 - 5 - 2 الحالة العابرة الناتجة عن انقطاع طورين من أطوار الخط الكهربائي في شبكات التوتر العالي الكهربائية: [59], [15]

و يمكن أن تظهر هذه الحالة عملياً عندما يتم إغلاق أو فتح القاطع الآلي للخط الكهربائي، فإنه قد يغلق تماس أحد الأطوار فقط و يتأخر إغلاق تماسات الطورين الآخرين أو بالعكس عند الفتح قد يحدث أن تفتح تماسات طورين و يبقى الطور الثالث مغلقاً. وفي هذه الحالة يمكن أن تنتج الحالة العابرة و يظهر توتر عابر زائد على الطورين اللذين يبقيان مفتوحين. تمثل الشبكة في هذه الحالة كما في الشكل رقم (6 - 49) حيث تعتبر أيضاً أن نقطة عدم التناظر هي تماسات القاطع الآلي حيث يبقى التماس مغلقاً و التماسات b , c مفتوحة.

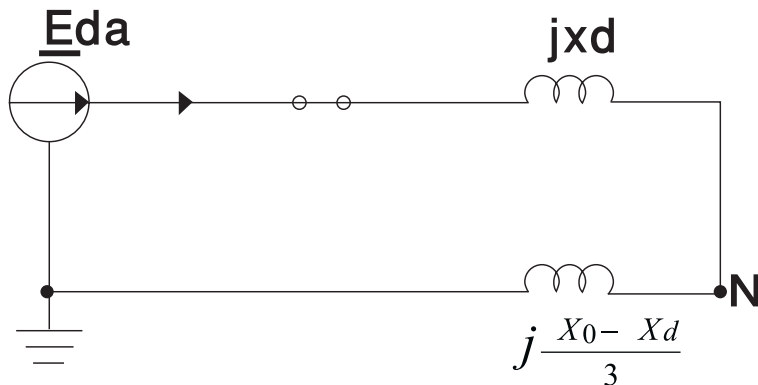


الشكل رقم (6 - 49) إغلاق قطب للقاطع الآلي وبقاء القطبين الآخرين مفتوحين

المهم في هذه الحالة هو تحديد التوتر على طرفي تماسات القاطع الآلي التي تبقى مفتوحة، أي على طرفي تماس الطور "b" و تماس الطور "c" حيث يمكن أن يظهر التوتر العابر الزائد. أما التوتر على الطور السليم "a" الذي أغلق تماسه فإنه يساوي:

$$U_a = E_{da} = E_a$$

يمكن وضع هذه الدارة المكافئة بشكل آخر كما في الشكل رقم (6 - 50)



الشكل رقم (6 - 50) الدارة المكافئة عند انقطاع طورين من أطوار الخط الكهربائي

في هذه الدارة المهم هو أيضا فرق الكمون بين النقطة المحايدة N و الأرض أي:

$$\underline{U}_N = j \frac{X_0 - X_d}{3} \cdot \underline{I} = \underline{U}_b = \underline{U}_c$$

$$(67-6) \quad \underline{I} = \frac{\underline{E}_{da}}{j X_d + j \frac{X_0 - X_d}{3}} = \frac{\underline{E}_a}{j(\frac{3 X_d + X_0 - X_d}{3})}$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{E}_a}{j(\frac{X_0 + 2 X_d}{3})}$$

يمكن الملاحظة أن قيمة التيار I المبينة في هذه العلاقة الأخيرة يمكن أن تصبح كبيرة جداً يمكن اعتبارها لا نهائية إذا تحقق الشرط التالي:

$$(68-6) \quad \frac{X_0 + 2 X_d}{3} = 0$$

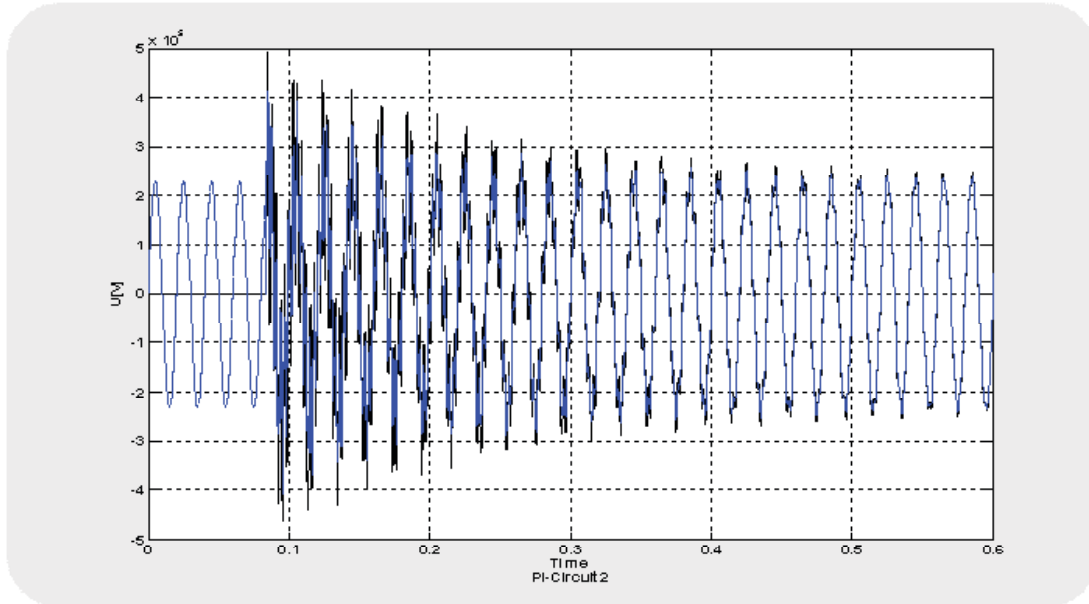
ويشبه هذا الشرط " شرط الطنين ". وكذلك الأمر بالنسبة للتوتر $\underline{U}_b$ و $\underline{U}_c$ التي يمكن أن تأخذ قيمة لا نهائية أيضاً. ويمكن كتابة شرط الطنين بالشكل التالي:

$$(69-6) \quad X_0 + 2 X_d = 0 \Rightarrow \frac{X_0}{X_d} = -2$$

ويمكن أن يتحقق هذا الشرط عندما تكون للمفاعلات المكافئة X_0 و X_d طبيعة مختلفة أي واحدة ذات طبيعة سعوية والأخرى ذات طبيعة تحريضية أو بالعكس.

6 - 5 - 3 دراسة حالة عند انقطاع أحد أطوار الخط الكهربائي باستخدام محاكاة العناصر الكهربائية الممثلة للنظام:

يبين الشكل (6 - 51) تغيرات التوتر في نهاية وبداية الخط الكهربائي U_1 و U_2 الذي تم الحصول عليها بعملية النمذجة في بيئة البرنامج التمثيلي وذلك عند انقطاع أحد أطوار الخط الكهربائي باستخدام رباعي أقطاب T.

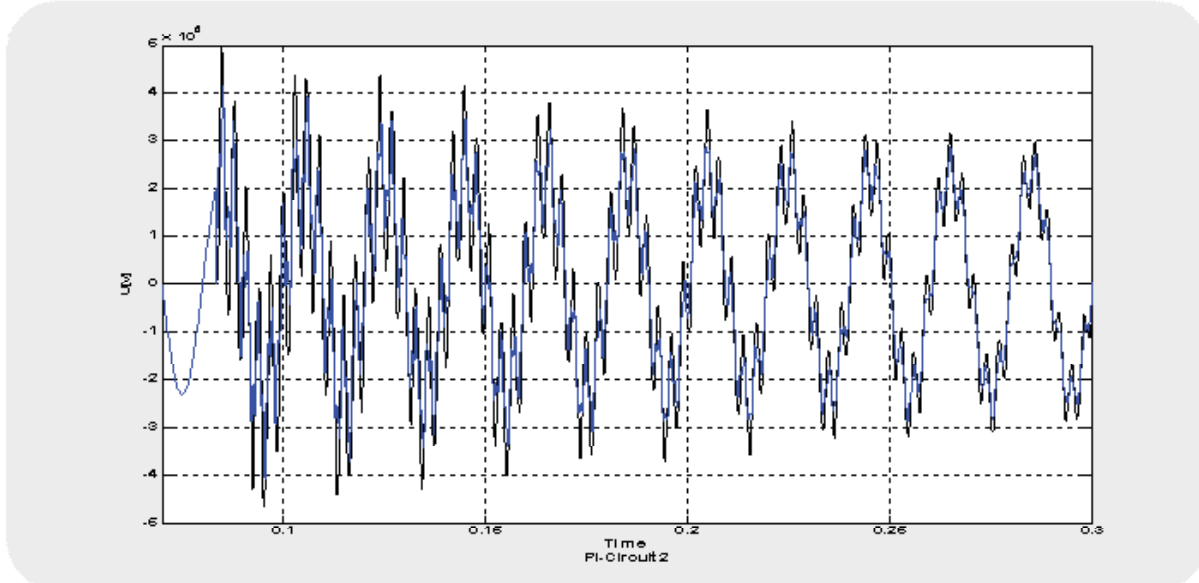


الشكل رقم (6 - 51) تغيرات التوتر في نهاية وبداية الخط الكهربائي U_1 و U_2 عند انقطاع أحد أطوار الخط الكهربائي باستخدام البرنامج التمثيلي

يمكن الملاحظة من منحنى التغيرات أن القيمة الأعظمية للتوتر الزائد الذي ينتج في هذه الحالة العابرة، عند الخط ذي التوتر 400 ك ف عند الاقتراب من شروط الطنين الكهرطيسي تساوي: $U2_{max} = KV 560$ أي أن زيادة التوتر تبلغ 2.40 من قيمة التوتر النظامي للخط وهي أقل من قيمة توتر الاختبار الذي توصي الهيئة العالمية للكهرباء IEC والذي يساوي $U_{test} = 2.5 U_n$

6 - 5 - 4 دراسة حالة عند انقطاع أحد أطوار الخط باستخدام النظام في بيئة MATLAB :

يبين الشكل (6 - 52) تغيرات التوتر في نهاية وبداية الخط الكهربائي $U1$ و $U2$ الذي تم الحصول عليها بعملية النمذجة في بيئة ماتلاب وذلك عند انقطاع أحد أطوار الخط الكهربائي عند استخدام رباعي أقطاب π .



الشكل رقم (6 - 52) تغيرات التوتر في نهاية وبداية الخط الكهربائي $U1$ و $U2$ عند انقطاع أحد أطوار الخط الكهربائي باستخدام بيئة ماتلاب

يمكن الملاحظة من منحنى التغيرات أن القيمة الأعظمية للتوتر الزائد الذي ينتج في هذه الحالة العابرة، عند الخط ذي التوتر 400 ك ف عند الاقتراب من شروط الطنين الكهرطيسي تساوي: $U2_{max} = KV 575$ أي أن زيادة التوتر تبلغ 2.45 من قيمة التوتر النظامي للخط وهي أقل من قيمة توتر الاختبار الذي توصي الهيئة العالمية للكهرباء IEC والذي يساوي $U_{test} = 2.5 U_n$

الفصل السابع

دراسة تطبيقية لبعض الظواهر العابرة في الشبكة الكهربائية السورية باستخدام
برنامج الظواهر العابرة الكهرمغناطيسية PTME

7 - دراسة تطبيقية لبعض الظواهر العابرة في الشبكة الكهربائية السورية باستخدام برنامج الظواهر العابرة الكهرمغناطيسية EMTP

1-7 نظرة عامة حول EMTP

يُعدّ البرنامج EMTP (اختصار ElectroMagnetic Transient Program) الأمريكي الأصل أعرق وأكثر النظم البرمجية استخداماً في مجال التمثيل الرقمي لنظم القدرة ودراسة الظواهر العابرة. يقدّم هذا البرنامج خياراً وحيداً لتمثيل الحالات العابرة للترددات كافة باستخدام القيم الآنية، ويستخدم قاعدة شبه المنحرف trapezoidal rule في التكامل العددي لنظم المعادلات التفاضلية العادية الخطية، بالرغم من أنها أقل دقة من كثير من الطرق الأخرى الذائعة الصيت مثل رونغي - كوتا بدرجاتها المتعددة و Predictor-corrector، ... الخ. السبب هو أنها مستقرة عددياً numerically stable، والاستقرار العددي أهم من الدقة في تحليل عواير نظم القدرة الكهربائية عادة. ولكن المشكلة الكبرى التي تواجه قاعدة شبه المنحرف هي القفزات (أو عدم الاستمرارية discontinuities) في منحنيات التوتر والتيار والتي تحصل نتيجة لعمليات فصل ووصل القواطع (بما فيها الديودات والثيристورات ...) للمحارسات والسعات على الترتيب. هذه المشكلة يعالجها البرنامج بلحظ مقاومة إخماد على التفرع مع المحارسة وأخرى على التسلسل مع السعة.

يمثل simulate البرنامج كلا من العناصر الخطية المجمعة lumped (أي R, L, C) المستقلة والمتشابكة coupled بمنبع تيار على التفرع مع ناقلية conductance تتضمن خطوة التكامل.

يتوفر في البرنامج نموذج للآلة التزامنية الديناميكية الذي يمثل الجزئين الكهربائي والميكانيكي لها مع أخذ الاشباع والاختلاف بالاعتبار. يُمثل الجزء الكهربائي بجملة معادلات تفاضلية خطية للتوترات (7 معادلات) وجملة معادلات جبرية تربط التيارات بالفويض (7 معادلات). وتُنسب كميات المتحرض (الثابت) كافة إلى نظام مركبات dq0 متوضع على المحرض (الدوار) وذلك لإلغاء تبعية محددات الآلة لوضعية الدوار وبالتالي للزمن. أما الجزء الميكانيكي فيُفترض أنه خطي وبالتالي يمكن تمثيله بمجموعة من الكتل الدوارة و نوابض الوصل فيما بينها ويحكم أداءها جملة من المعادلات التفاضلية المشتقة من القانون الثاني لنيوتون.

يستخدم البرنامج نظام المركبات القطرية $\alpha\beta \sim$ في دراسة الخطوط متعددة الأطوار المبدلة transposed وذلك لأن مصفوفة التحويل حقيقية فتتسجم مع الحساب بالقيم الآنية للعواير، على عكس المركبات المتناظرة حيث مصفوفة التحويل عقدية. وتتطلب نماذج الخط قيم محدّداته و خاصة المركبات الموجبة (∞) والصفرية للمقاومة والمحارسة والسعة لوحدة الطول. غير أن قيم بعض هذه المحدّدات تتغير بشكل ملحوظ مع التردد.

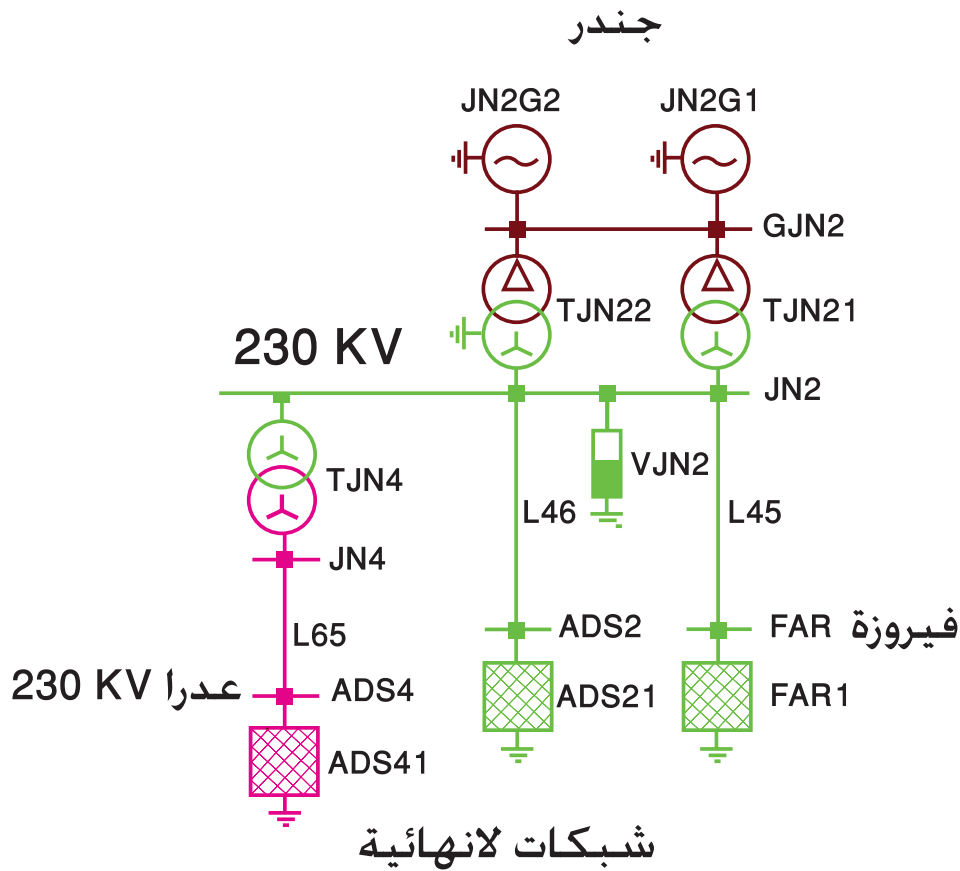
أما الخطوط غير المبدلة فيتم تحليلها بواسطة تقنية الأنماط modal technique التي تستخدم ضمناً تقنية القيم المميزة والأشعة المميزة eigenvalues - eigenvectors.

وحدة التحكم (Transient Analysis of Control Systems) TACS في EMTP مصممة أساساً لتمثيل التحكم التشبيهي analog، وقد تم تطوير لغة نمذجة MODELS للبرنامج قادرة على تمثيل التحكم الرقمي أيضاً. وعلاوة على ذلك، فهناك سلبية حسابية في البرنامج عند تمثيل أنظمة تحوي ثيристورات؛ إذ يحصل تأخير زمني بين حساب متحولات الشبكة وحساب المتحولات في نظام التحكم.

2-7 الشبكة الكهربائية المدروسة

الشبكة المدروسة هي جزء من الشبكة الكهربائية السورية (الشكل 1-7) المؤلف من العناصر التالية:

- محطة توليد جندر ذات الدارة المركبة حيث تعمل مجموعتا توليد منها هما JN2G1 و JN2G2 ويتألف كل منها من مجموعة بخارية ومجموعة غازية باستطاعة كهربائية ظاهرة إجمالية هي 375 MVA وتوتر خرج 15 kV.
- محطتا تحويل دلتا/نجمي بنسبة تحويل إسمية 15/230 kV موصولتان على التفرع بين باسبار المحطة GJN2 وباسبار التوتر العالي JN2.
- ثلاثة خطوط هوائية منها خطان 230 kV هما خط جندر - فيروزة بطول 30 km وخط جندر - عدرا بطول 110 km، والخط الثالث هو خط 400 kV طوله 120 km يصل جندر بعدرا عن طريق محطة تحويل 230/400 kV.
- ثلاث شبكات لانهاية تمثل قطع الشبكة السورية في باسبارات فيروزة وعدرا 230 وعدرا 400.



الشكل (1-7) الشبكة الكهربائية السورية المدروسة

تُمثّل الشبكة اللانهاية بمنبع توتره هو التوتر الاسمي وقيمة ممانعته تُعطى بالعلاقة:

$$Z = \frac{1.1 \times V_n^2}{FL}$$

حيث (FL (Fault Level) هو سوية العطل المتوازن للباسبار أو استطاعة القصر مقدرة بـ MVA. نلخص حسابات الممانعات بالجدول التالي:

الباسبار	سوية العطل MVA	التوتر الاسمي kV	ممانعة الشبكة اللانهاية Ω
فيروزة	4163.566	230	13.976
عدرا 230	3681.28	230	15.807
عدرا 400	2388.449	400	73.688

7 - 3 الظواهر العابرة التي تنتج عند حدوث عطل ثلاثي الطور على قضبان تجميع محطة تحويل فيروزة

تم افتراض حصول عطل متوازن على قضبان التجميع في محطة تحويل فيروزة في اللحظة الزمنية 50 ms ويتم فصله في اللحظة 150 ms أي أن العطل يدوم 100 ms. وتمت دراسة تأثيرات حصول العطل وفصل العطل على متحولات الشبكة بواسطة البرنامج EMTP في حالتين:

• دون تحكم

• مع تحكم.

وتم تصميم برنامج الدخل التالي الذي يتضمن إدخال بيانات الشبكة وصياغة الأوامر التي تنمذج العطل وكذلك برنامج إخراج النتائج.

```
BEGIN NEW DATA CASE
C
C
C
C A part of Syrian net
C Transient _ 3Fault on FAR, duration=50 ms
C +++++
POWER FREQUENCY, 50
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
.00003      2.0      50.      50.
      1      1      -1      1
      100      100      1000      2500
C ----- Infinite buses impedances
C FAR
FAR-AFARI-A      13.976
FAR-BFARI-B      13.976
FAR-CFARI-C      13.976
C ADS2
ADS2AAD2IA      15.807
ADS2BAD2IB      15.807
ADS2CAD2IC      15.807
C ADS4
ADS4AAD4IA      73.688
ADS4BAD4IB      73.688
ADS4CAD4IC      73.688
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C ++++++BRANCHES
C ----- Transmission lines
C L45
-1 FAR-A JN2-A      .212 1.288 1.5 30. 0 0 0
-2 FAR-B JN2-B      .077 .413 2.734 30. 0 0 0
-3 FAR-C JN2-C
C L46
-1 JN2-A ADS2A      .212 1.288 1.5 110. 0 0 0
```

-2 JN2-B ADS2B	.077	.413	2.734	110.0	0	0	0
-3 JN2-C ADS2C							
C L65							
-1 JN4-A ADS4A	.072	1.03	1.983	120.0	0	0	0
-2 JN4-B ADS4B	.026	.33	3.392	120.0	0	0	0
-3 JN4-C ADS4C							
C ++++++Transformers							
C ++++++TJN21							
TRANSFORMER				TRA1	A		
9999							
1GJN21AGJN21C	.0036	.099	15.				
2 JN2-A	.3072	8.448	138.56				
TRANSFORMER TRA1 A				TRA1	B		
1GJN21BGJN21A							
2 JN2-B							
TRANSFORMER TRA1 A				TRA1	C		
1GJN21CGJN21B							
2 JN2-C							
C ----- Connectivity capacitors							
GJN21A					1.		
GJN21B					1.		
GJN21C					1.		
C ++++++TJN22							
TRANSFORMER				TRA2	A		
9999							
1GJN22AGJN22C	.0036	.099	15.				
2 JN2-A	.3072	8.448	138.56				
TRANSFORMER TRA2 A				TRA2	B		
1GJN22BGJN22A							
2 JN2-B							
TRANSFORMER TRA2 A				TRA2	C		
1GJN22CGJN22B							
2 JN2-C							
C ----- Connectivity capacitors							
GJN22A					1.		
GJN22B					1.		
GJN22C					1.		
C ++++++TJN4							
TRANSFORMER				TRAN	A		
9999							
1 JN2-A	.1760	13.225	132.79				
2 JN4-A	.5330	40.023	0.94				
TRANSFORMER TRAN A				TRAN	B		
1 JN2-B							
2 JN4-B							

```

GJN21B
GJN21C
C ++++Generator JN2G1
TOLERANCES                                     50
PARAMETER FITTING                             3.0
C ----- Machine ratings
 1 1      2      1.0      1.0      375.0      15.0      280.0
BLANK CARD - NO SATURATION MODELLING
C
C ----- Electrical data- Manufacture`s data
      0.038      0.220      2.50      2.50      0.300      .3      0.250      0.25
      1.00      3.000      0.030      0.03      0.150
C ----- Mechanical system data
 1      1.0 0.9475577
BLANK CARD ENDING MASS CARDS
C ----- Output data request
51
10      4      8      14
31
21
BLANK card ending OUTPUT request
FINISH
C ++++++GJN22
59GJN22A      12247.45      50.      0.0
GJN22B
GJN22C
C ++++++Generator JN2G2
TOLERANCES

```

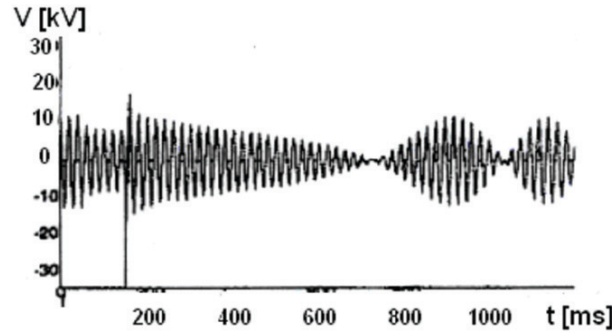
```

PARAMETER FITTING                             3.0
C ----- Machine ratings
 1 1      2      1.0      1.0      375.0      15.0      280.0
BLANK CARD - NO SATURATION MODELLING
C
C ----- Electrical data- Manufacture`s data
      0.038      0.220      2.50      2.50      0.300      .3      0.250      0.25
      1.00      3.000      0.030      0.03      0.150
C ----- Mechanical system data
 1      1.0 0.9475577
BLANK CARD ENDING MASS CARDS
C ----- Output data request
51
10      4      8      14
31
21
BLANK card ending OUTPUT request
FINISH
BLANK card ending SOURCE data
C ----- Node voltage output request
      JN2-A JN4-A FAR-A ADS2A ADS4AGJN21AGJN22A
BLANK card ending NODE VOLTAGE OUTPUT request
BLANK ENDING PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

يمكن تلخيص النتائج المتحصلة من تشغيل البرنامج لأجل حالتي التحكم في الأشكال البيانية التالية:

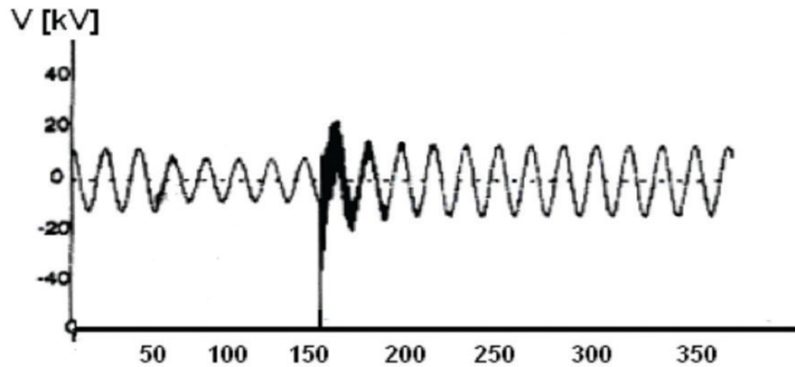
- 1- يبين الشكل 2-7 تغيرات توتر الطور A للمولد 1 لأجل الحالة دون استخدام التحكم. أن العطل المتناظر على قضبان جميع محطة تحويل فيروزة قد أثر تأثيراً بالغاً على توتر الطور A للمولد 1 إذ أدى إلى انحدار التوتر Voltage dip ثم يعود التوتر إلى الارتفاع بعد فصل العطل على شكل توتر فجائي voltage spike وعلى شكل انتفاخات توتر voltage swells وعليه يصبح التوتر غير مستقر.



Phase voltage at GJN21, fault at FAR, fault duration 100 ms
without control -----> voltage instable

الشكل رقم (2-7) تغيرات توتر الطور A للمولد 1 لأجل الحالة دون استخدام التحكم

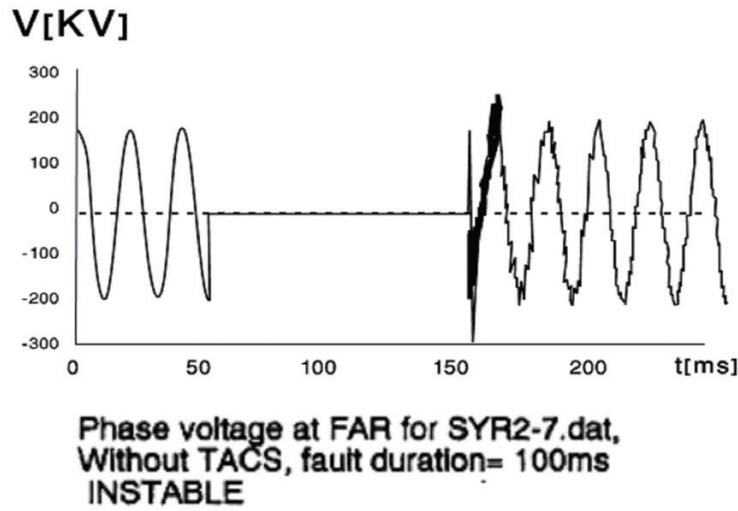
- 2- يبين رقم (3-7) تغيرات توتر الطور A للمولد 1 بوجود التحكم حيث يعاني التوتر من انحداراً فور حصول العطل كما في الحالة السابقة ولكن تأثير فصل العطل لا يؤدي إلى عدم استقرار التوتر الذي يتخمد بعد أقل من 50 ms.



Phase voltage at GJN21, fault at FAR, fault duration 100 ms
with control

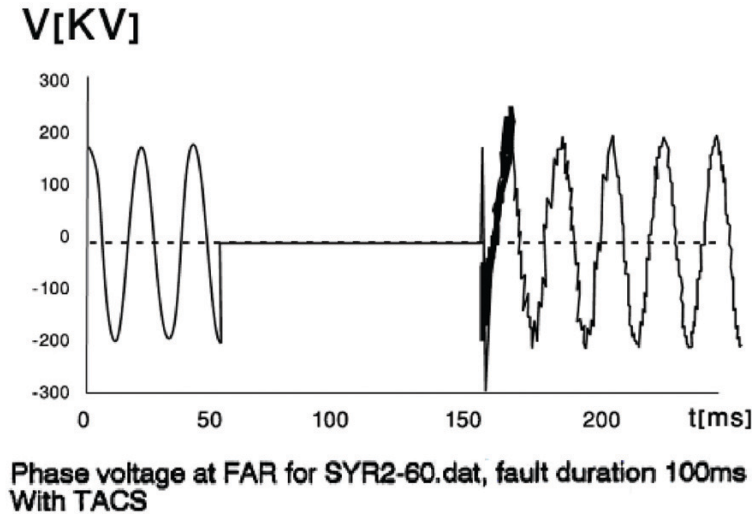
الشكل رقم (3-7) تغيرات توتر الطور A على خرج المولد GJN21 مع وجود تحكم

3- يبين الشكل رقم (4-7) تغيرات توتر الطور لقضبان تجميع محطة تحويل فيروزة حيث حصل العطل ثلاثي الطور. يلاحظ أن التوتر ينعدم أثناء العطل بالطبع ولكن بعد فصل العطل يرتفع توتر الطور إلى حوالي 300 kV أي بزيادة حوالي 1.46% بالإضافة إلى تشوه موجة التوتر مما يؤدي إلى عدم استقرار التوتر في حالة عدم تفعيل نظم التحكم.



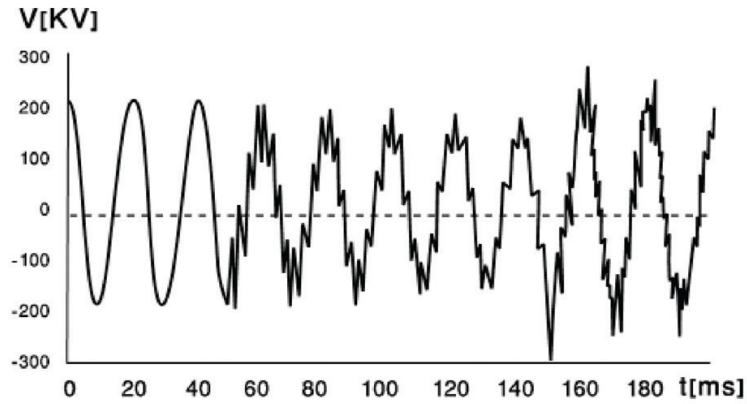
الشكل رقم (4-7) تغيرات توتر الطور لقضبان تجميع محطة تحويل فيروزة عند عدم وجود نظم التحكم

4- يبين الشكل رقم (5 – 7) تغيرات توتر الطور لقضبان تجميع محطة تحويل فيروزة حيث حصل العطل ثلاثي الطور وذلك بوجود التحكم حيث يلاحظ أن التوتر يعود إلى حالته الأصلية خلال حوالي 45 ms بعد فصل العطل.



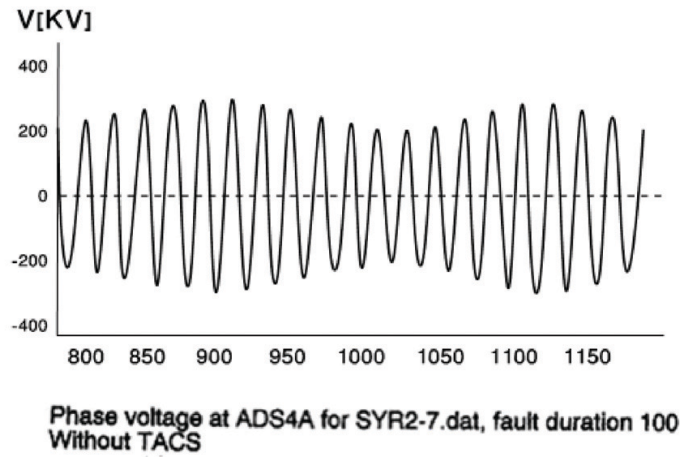
الشكل رقم (5-7) تغيرات توتر الطور على قضبان التجميع المعطلة في محطة تحويل فيروزة مع وجود نظام تحكم

5- يبين الشكل رقم (6-7) تغيرات توتر الطور لقضبان تجميع محطة تحويل عدرا 400 KV من جراء حصول عطل ثلاثي الطور على قضبان تجميع محطة تحويل فيروزة عندما يكون نظام التحكم غير مفعّل. نلاحظ أن موجة التوتر لها تشوّه كبير مما يؤدي إلى عدم استقرار التوتر كليا.



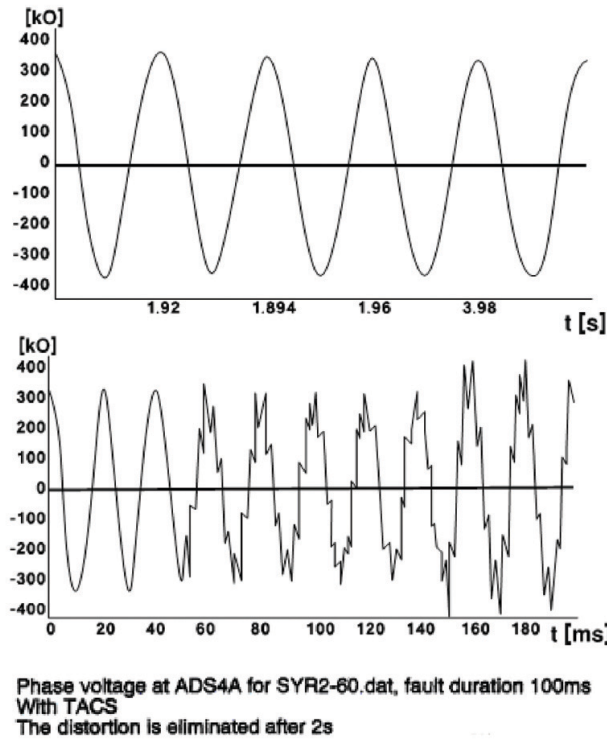
الشكل رقم (6-7) تغيرات توتر الطور لقضبان محطة عدرا 400 في حالة عدم تفعيل التحكم

كما ويلاحظ في الشكل رقم (7 - 7) أن موجة التوتر لها تشوّه كبير وتعاني من انتفاخات مما يؤدي إلى عدم استقرار التوتر كليا.



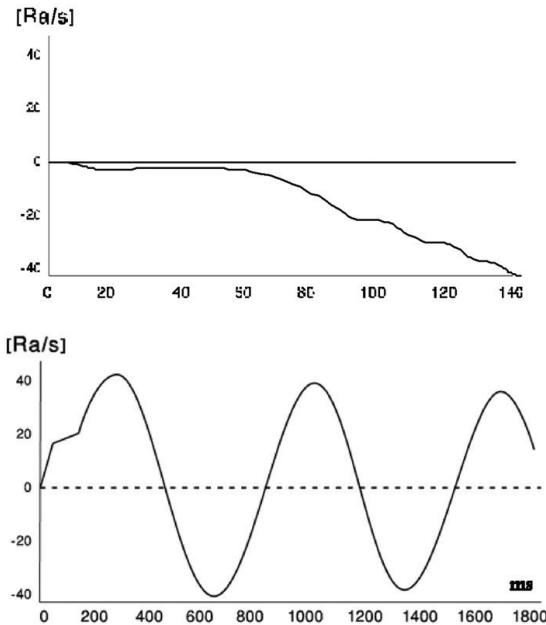
الشكل رقم (7 - 7) تشوّه موجة التوتر الطور لقضبان محطة عدرا 400 في حالة عدم تفعيل التحكم

6- أما في حالة تفعيل نظم التحكم فيحصل تشوه لتوتر الطور لقضبان تجميع محطة تحويل عدرا 400 ولكنه يخفئ بعد حوالي ثانيتين كما هو مبين في الشكل رقم (7 - 8).



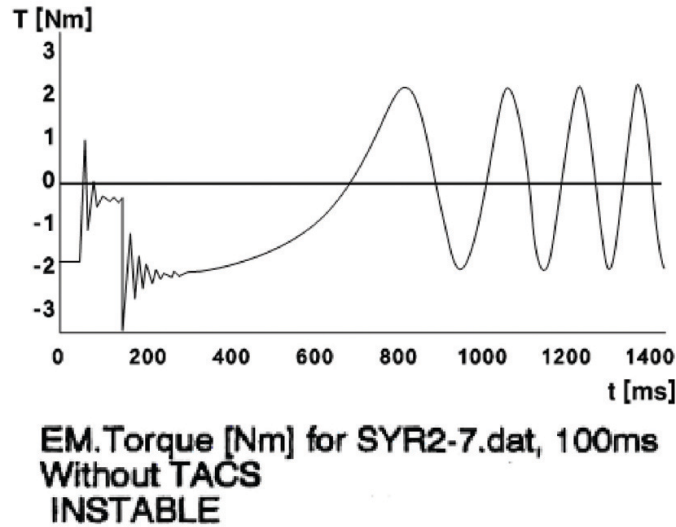
الشكل رقم (7 - 8) تغيرات توتر الطور لقضبان محطة تحويل عدرا 400 عند تفعيل التحكم

7- يبين الشكل رقم (7 - 9) تأثير العطل ثلاثي الطور على قضبان تجميع محطة تحويل فيروزة على انحراف سرعة المولد 1 عن السرعة التزامنية. نلاحظ من الشكل أن الانحراف يتزايد باستمرار في حال عدم تفعيل التحكم مما يشير إلى عدم استقرار المولد وضرورة إخرجه من الخدمة. أما في حال تفعيل التحكم فإن العطل يؤدي إلى اهتزازات متخامدة في موجة الانحراف ما يشير إلى مقدرة المولد للعودة إلى حالة العمل النظامي.



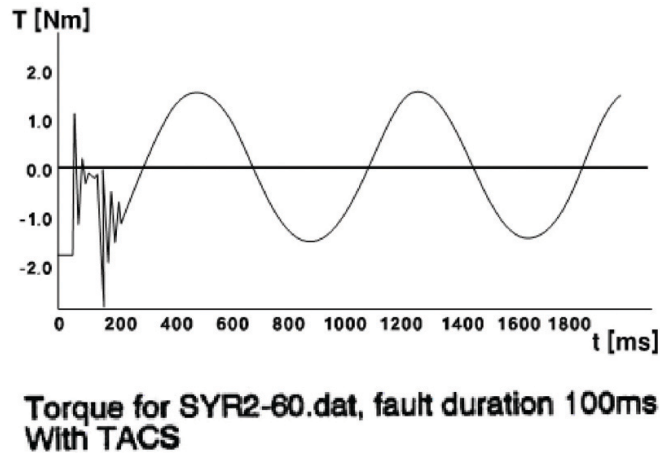
الشكل (7-9) تأثير عطل متوازن في باسبار فيروزة على الانحراف عن السرعة التزامنية للمولد 1 لأجل الحالتين:
دون تحكم (الموجة العليا)، ومع تحكم (الموجة السفلية)

8- يبين الشكل رقم (7 - 10) تأثير العطل المتناظر عند قضبان تجميع محطة تحويل فيروزة على العزم الكهرمغناطيسي للمولد 1 لأجل الحالة بدون تحكم. نلاحظ من الشكل أن العزم الكهرمغناطيسي يصبح غير مستقر عندما تكون نظم التحكم غير مفعلة.



الشكل رقم (7 - 10) تأثير العطل المتناظر عند قضبان تجميع محطة تحويل فيروزة على العزم الكهرمغناطيسي للمولد 1 لأجل الحالة بدون تحكم

9- يبين الشكل رقم (7 - 11) تأثير العطل المتناظر عند قضبان تجميع محطة تحويل فيروزة على العزم الكهرمغناطيسي للمولد 1 لأجل الحالة مع وجود التحكم. نلاحظ من الشكل أن العزم الكهرمغناطيسي يعاني من تذبذبات متخامدة من جراء تدخّل أجهزة التحكم.



الشكل رقم (7 - 11) تأثير العطل المتناظر عند قضبان تجميع محطة تحويل فيروزة على العزم الكهرمغناطيسي للمولد 1 لأجل الحالة مع وجود التحكم

الفصل الثامن

دراسة تطبيقية لبعض الظواهر العابرة في الشبكة الكهربائية السورية باستخدام
برنامج الظواهر العابرة الكهرمغناطيسية PTME

8 - النتائج والمقترحات

8 - 1 لقد تم في هذا البحث العلمي مراعاة ما توصلت إليه الأبحاث العالمية والبحوث المنجزة في مختلف دول العالم، وتمت مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها عند التطبيق على نظام القدرة الكهربائية في سورية مع النتائج المدرجة في الأبحاث العلمية العالمية حيث تبين صحة ودقة هذه النتائج.

8 - 2 لقد أجريت في هذا البحث العلمي دراسة الظواهر العابرة الكهرومغناطيسية التي يمكن أن تظهر في نظام القدرة الكهربائية السوري، وهذه هي المرة الأولى التي تجرى فيها مثل هذه الدراسات.

8 - 3 تم استخدام طريقة نمذجة نظم القدرة الكهربائية عن طريق تحديد النموذج الفيزيائي الذي يصف حالة تشغيل النظام ثم تم استعمال البرامج الحاسوبية المتطورة لتمثيل ومحاكاة الظواهر العابرة المختلفة مثل برنامج MATLAB وبيئة SIMULINK المرتبطة معه، وكذلك بيئة SIMPOWER ومثل برنامج EMTP ، وهذه البرامج الحاسوبية هي ذاتها التي تستخدم في مختلف دول العالم المتقدمة حالياً.

8 - 4 إن أكثر الحالات العابرة التي تظهر في نظم القدرة الكهربائية هي تلك التي تنتج عن عمليات الوصل والفصل ثم تلك التي تنتج عند الاقتراب من شروط الطنين الكهرومغناطيسي، فلا يمر يوم إلا وتتم فيه أكثر من عملية وصل الخطوط الكهربائية إلى الشبكة الكهربائية أو عملية فصلها عن الشبكة الكهربائية، لذلك فإن دراسة الظواهر العابرة التي تنتج عند وصل الخطوط الكهربائية إلى الشبكة أو تلك التي تنتج عند فصل الخطوط الكهربائية عن الشبكة تحتل المكانة الأولى في غالبية الأبحاث العالمية وكذلك في هذا البحث العلمي.

8 - 5 من أهم المعوقات التي تعترض دراسة الحالات العابرة في نظم القدرة الكهربائية هي عدم إمكانية متابعة هذه الظواهر في الزمن الحقيقي وعدم إمكانية إجراء القياسات والتجارب على الخطوط الكهربائية وعلى المحولات بشكل مباشر وذلك لأن لا أحد يمكن أن يجازف حيث قد ينتج عن هذه العمليات انقطاع بالطاقة الكهربائية عن المستهلكين أو قد تؤدي إلى عدم استقرار في عمل النظام الكهربائي. لذلك يتم اللجوء إلى النمذجة الرقمية للشبكات الكهربائية وإلى محاكاتها باستخدام البرامج الحاسوبية المتطورة.

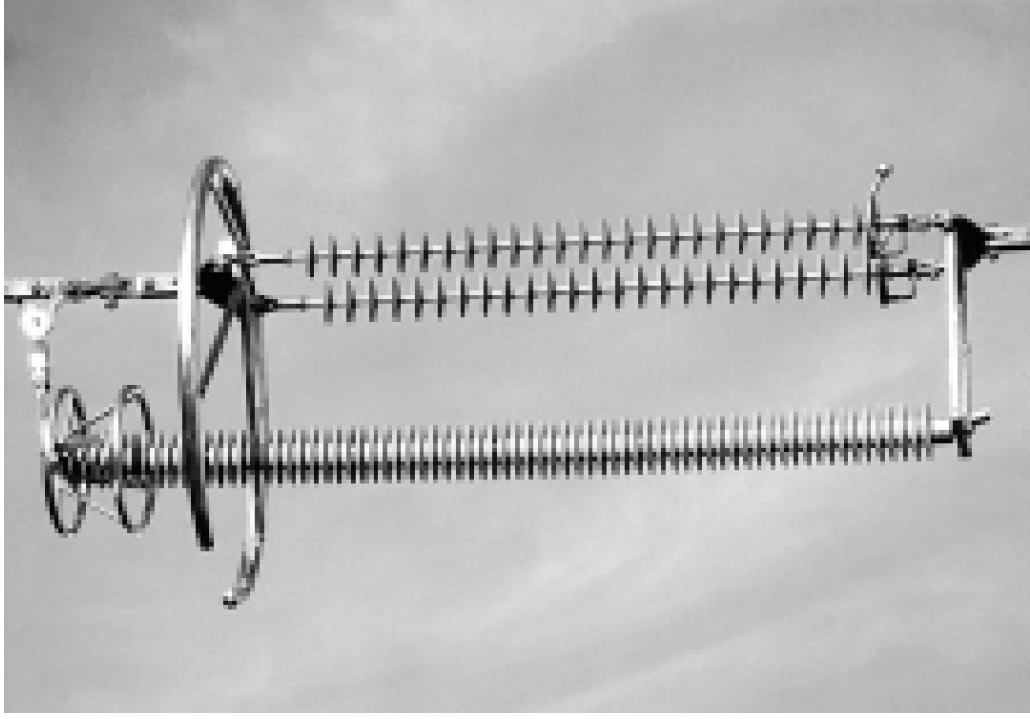
8 - 6 لقد تجاوزت قيمة التوتر الزائد الذي يظهر في نهاية الخط الكهربائي في الحالة العابرة عند وصل هذا الخط إلى الشبكة الكهربائية ضعفي قيمة التوتر النظامي للخط، الأمر الذي يسبب إجهادات كهربائية إضافية على عازلية التجهيزات الكهربائية في محطة التحويل في طرف الاستقبال مما يؤدي إلى انهيارها.

8 - 7 قد تصل قيمة التوتر الزائد في الحالة العابرة ذات المنشأ الداخلي التي تظهر على الخطوط الكهربائية في شبكات التوتر العالي 230 ك ف في سورية إلى قيمة تتجاوز 500 ك ف ، وقد تصل في شبكات التوتر العالي 400 ك ف إلى قيمة تتجاوز 850 ك ف، مما يشير إلى خطورة هذه التوترات الزائدة وضرورة اتخاذ الإجراءات اللازمة للحد من تأثيرها على الشبكة الكهربائية.

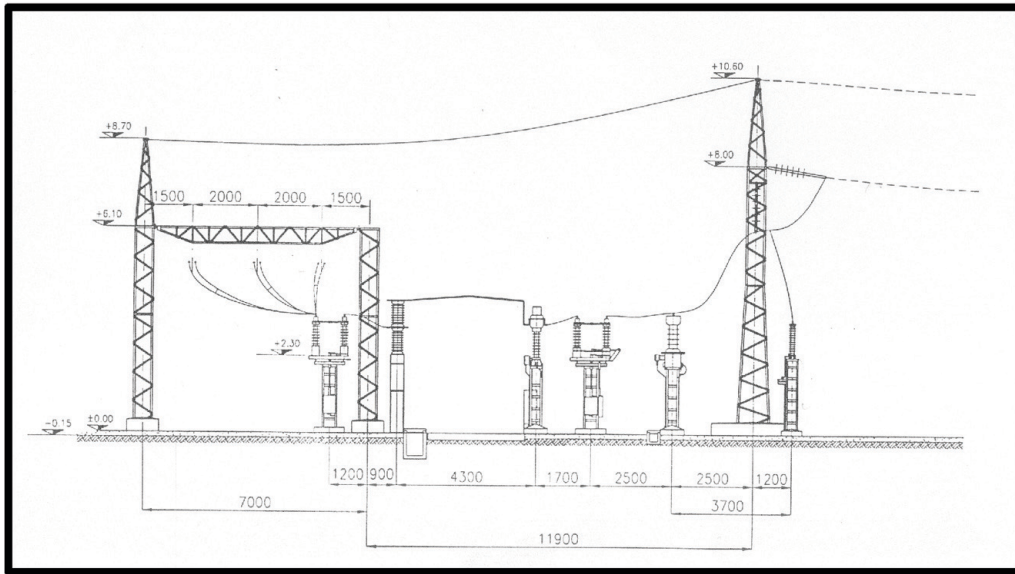
8 - 8 تستخدم للحد من قيمة التوترات الزائدة ذات المنشأ الداخلي والتي تنتج عن الظواهر العابرة في شبكات التوتر العالي في الدول ذات الشبكات الكهربائية المتطورة إحدى الطرق التالية:

أ - استعمال مفترقات الشحنات الكهربائية Surge Arrestors وربطها في نهاية الخطوط الكهربائية أو عند مرابط المحولات الكهربائية وذلك لمنع موجة التوتر الزائد من الدخول إلى محطات التحويل الكهربائية المربوطة إلى طرف الاستقبال. [24],[28],[32],[35]

وقد بدأت عدة شركات للكهرباء بربط مفترقات الشحنات مع عوازل الخطوط الكهربائية ذات التوتر العالي والعالي جداً وذلك لمنع انتقال موجة التوتر الزائد الناتجة عن الحالات العابرة إلى نهاية الخطوط الكهربائية وبالتالي للحد من آثارها على عوازل الخطوط والمحولات الكهربائية كما هو مبين في الأشكال التالية:



الشكل رقم (8 - 1) طريقة تركيب مفرغات الشحنات الكهربائية TLA
تحت عوازل الخط الكهربائي KV 420



الشكل رقم (8 - 2) استخدام مفرغات الشحنات في نهاية الخطوط الكهربائية
لحماية محطة التحويل من التوترات العابرة الزائدة

ب - استعمال ملفات التعويض Induction Shunt Reactors وربطها على التفرع مع الخطوط الكهربائية في نهاية وفي بداية الخطوط الكهربائية وذلك للحد من قيمة التوتر الزائد قبل الدخول إلى محطات التحويل الكهربائية المربوطة إلى طرفي الخط الكهربائي. كما هو مبين في الأشكال التالية: [7],[8],[11],[19],[35]



الشكل رقم (8 - 5) طريقة تركيب ملفات التعويض العرضاني على أطوار خط كهربائي KV 132



الشكل رقم (8 - 6) ملفات تعويض عرضاني أحادية الطور تبريد بالهواء مستخدمة في ألمانيا



الشكل رقم (8 - 7) ملفات تعويض عرضاني ثلاثية الطور تبريد بالزيت

ج - استعمال مقاومات كهربائية Pre-insertion Resistors تربط بين منبع التوتر وبداية الخط ولمدة تتراوح بين (0.3 - 1.5) مللي ثانية. ويمكن أن تكون هذه المقاومات ذات مرحلة واحدة أو عدة مراحل. تحد المقاومات الإضافية من التوترات العابرة حيث أن إدخال المقاومات تسبب هبوط توتر نتيجة مرور التيار فيها وهذا يقلل من التوتر العابر الذي يظهر في نهاية الخط الكهربائي ويخفض قمة التوتر الزائد الذي ينتج في الحالة العابرة والذي ينتشر على طول الخط. يساعد إدخال المقاومات الإضافية بعدة مراحل على تخفيض قيمة التوتر العابر في نهاية الخط ويساعد على استقرار التوتر بسرعة أكبر مما هي عليه عند إدخال مقاومة بمرحلة واحدة كما.

د - استعمال قواطع آلية سريعة ولا تسمح بإعادة اشتعال القوس الكهربائي. كما وأن المواصفات الكهربائية للقواطع الآلية دوراً رئيسياً في تحديد قيمة التوتر الزائد الذي يظهر في الحالة العابرة الناتجة عن عمليات الوصل والفصل. ويحدد فرق الكمون الذي يظهر بين تماسي قطبي القاطع الآلي قبل الإغلاق قيمة التوتر الزائد في نهاية الخط. [9],[44],[45]

جدول المصطلحات الأجنبية

A	
Active	نشط
Admittance	المسايرة
Alternative Current	تيار متناوب
Amplitude	مطال
Analog	تشبيهي
Arrangement	ترتيب أو تنظيم
Asymmetrical Fault	عطل غير متناظر
Attenuation	التخامد
B	
Black Out	تعطيم شامل
Box Diagram	المخطط الصندوقي
Bus Bar	قضبان التجميع
C	
Characteristic Impedance	الممانعة المميزة
Circuit Breaker	القاطع الآلي
Coil	ملف
Compensation Reactors	ملفات التعويض
Condenser	مكثف
Connecting	عملية الوصل
Control Circuit	دارة تحكم
Control System	نظام التحكم
Curve	المنحني
D	
Damping Coil	ملف التخامد
Deferential Equation	معادلة تفاضلية
Design	تصميم
Dialog Box	صندوق الحوار
Direct Axis	المحور المباشر
Direct Current	تيار مستمر
Direct Grounding	تأريض مباشر
Disconnecting	عملية الفصل
Distribution Transformers	محولات التوزيع
Dynamic	نظام ديناميكي
E	
Electric Charge	الشحنة الكهربائية
Electrical Cable	كبل كهربائي
Electrical Circuit	دارة كهربائية
Electrical Coil	وشيعة كهربائية
Electrical Distribution Network	شبكة التوزيع الكهربائية
Electrical Energy	طاقة كهربائية

Electrical Insulation	العازلية الكهربائية
Electrical Line	خط كهربائي
Electrical Load	الحمل الكهربائي
Electrical Losses	الضياعات الكهربائية
Electrical Network	الشبكة الكهربائية
Electrical Parameters	المميزات الكهربائية
Electrical Transport Network	شبكة النقل الكهربائية
Electro - mechanic	كهرو ميكانيكية
Electromagnetic	الكهرومغناطيسية
Electromagnetic Induction	التحريض الكهروطيسي
Electromagnetic Resonance	الطنين الكهروطيسي
Energy Demand	الطلب على الطاقة
Equivalent Circuit	الدائرة المكافئة
Excitation Coil	ملف التهييج
F	
Fast Transient	العواير السريعة
Fault	العطل
Fault Level	مستوى العطل
Frequency	التردد
G	
Generator	مولد
Grounding	تأريض
H	
Homogenous	متجانسة
I	
Impedance	المحارضة
Input Voltage	توتر الدخل
Integration Constant	ثابتة التكامل
Internal Over voltages	التوترات الزائدة الداخلية
L	
Lightning Wave	موجة البرق
linear	خطي
Load Flow	جريان الحمولة
M	
Magnetic Energy	طاقة مغناطيسية
Magnetic Flux	التدفق المغناطيسي
Mathematical Model	النموذج الرياضي
Metallic Towers	الأبراج الحديدية
Modeling	النمذجة
Mono Phase Recloser	معيد الوصل الأحادي
Moving Elements	عناصر دوارة
Mutual Induction	التحريض المتبادل
N	

Network Elements	عناصر الشبكة
Nominal Current	التيار النظامي
Nominal Voltage	التوتر النظامي
Nonlinear	غير خطي
Numerical Modeling	النمذجة الرقمية
O	
Optimal	أفضل
Oscillations	اهتزازات
Output Voltage	توتر الخرج
Over voltage	توتر زائد
P	
Parallel Compensation Condenser	مكثفات التعويض العرضاني
Parallel Connection	الربط التفرعي
Phase Angle	فرق الصفحة
Phase Interruption	انقطاع الأطوار
Phase Transposition	تبديل الأطوار
Planning	تخطيط
Power Electrical System	نظام القدرة الكهربائية
Power Generation Station	محطة توليد كهربائية
Power Supply	منبع التغذية
Power Transformers	محولات الاستطاعة
Primary Coil	الملف الأولي
Pulse Velocity	السرعة النبضية
Q	
Quadrate Axis	المحور العرضي
R	
Reactance	المفاعلة
Receiving Voltage	توتر الاستقبال
Resistance	مقاومة
S	
Secondary Coil	الملف الثانوي
Security Assessment	تقدير الأمان
Self Induction	التحريض الذاتي
Sending Voltage	توتر الإرسال
Series Connection	الربط التسلسلي
Shock Factor	عامل الصدمة
Short Circuit	قصر دائرة
Simulation	محاكاة وتمثيل
Single Line Diagram	الشبكة وحيدة الخط
Sinusoidal Current	تيار جيبى
Sinusoidal Voltage	توتر جيبى
Slow Transient	العوابر البطيئة
Star	نجمي

Star - Delta	نجمي - مثلثي
State Estimation	تقدير الحالة
Steady State	الحالة المستقرة
Surge Arrestor	مفركات لشحنات
Symmetrical	متناظرة
Symmetrical Fault	عطل متناظر
Synchronous Relays	حواكم الوصل المتزامن
System	نظام
T	
Tangent	المماس
Thermal Effect	الأثر الحراري
Three phase	ثلاثي الطور
Three Phase Recloser	معيد الوصل الثلاثي
Time Constant	الثابتة الزمنية
Torque	العزم
Transformer	محولة
Transformer Substation	محطة تحويل كهربائية
Transformer Terminals	مرابط المحولة
Transient	الظاهرة العابرة
Traveling Wave	موجة مسافرة
V	
Voltage Level	سوية التوتر

جدول الرموز

Q	الاستطاعة الردية
S	الاستطاعة الظاهرية
P	الاستطاعة الفعلية
U , u	التوتر
UR	التوتر الأومي
UL	التوتر التحريضي
UC	التوتر السعوي
UPH	توتر الطور
I , i	التيار
τ	الثابة الزمنية للدائرة
β	ثابتة ازاحة الطور
α	ثابتة التخامد
θ	ثابتة انتشار الأمواج على الخط
φ	زاوية فرق الصفحة
T , t	الزمن
v	سرعة الضوء
ω	السرعة النبضية
C_λ	السعة المكافئة للخط
C	السعة كهربائية
Q , q	الشحنة الكهربائية
WE	الطاقة الكهربائية
Wm	الطاقة المغناطيسية
L_μ	عامل التحريض المكافئ للخط
KSH	عامل الصدمة
L	عامل التحريض الذاتي
KOV	عامل زيادة التوتر
Ψ_f	فيض التهييج المغناطيسي
Ψ_Q	الفيض المغناطيسي التخامدي العمودي
Ψ_D	الفيض المغناطيسي التخامدي المباشر
Ψ_l	الفيض المغناطيسي الذاتي
Ψ_q	الفيض المغناطيسي العمودي

Ψ_m	الفيض المغناطيسي المتبادل
Ψ_d	الفيض المغناطيسي المباشر
K	قاطع
ef	القوة الحركية الكهربائية لملف التهييج
el	القوة المحركة الكهربائية التحريضية الذاتية
em	القوة المحركة الكهربائية التحريضية المتبادلة
E , e	قوة محركة كهربائية
KV	كيلو فولط
il	المركبة الحرة للتيار
ip	المركبة القسرية للتيار
Y	المسايرة
X	المفاعلة
XL	المفاعلة التحريضية
Xl	المفاعلة الذاتية
XC	المفاعلة السعوية
Xm	المفاعلة المتبادلة
X_σ	المفاعلة المكافئة للشبكة الكهربائية
R	المقاومة
R_λ	المقاومة المكافئة للخط
rf	مقاومة ملف التهييج
ra	مقاومة ملف الطور
Z	الممانعة
ZC	الممانعة المميزة
SYS	النظام الكهربائي

المراجع العلمية: References:

- 1- بيسينوف، ل.، «الأسس النظرية للهندسة الكهربائية». الجزء 1 و 2 و 3. وزارة التعليم العالي، مطبوعات جامعة حلب 1981.
- 2- سميح الجابي، محمد علي عثمان، «أسس الهندسة الكهربائية». الجزء 1 و 2. وزارة التعليم العالي، مطبوعات جامعة دمشق، 1982.
- 3- سميح الجابي، عصام الزو، «أسس الهندسة الكهربائية». منشورات جامعة دمشق، 2007.
- 4- محمد قرضاب، «الدارات الكهربائية»، مديرية الكتب والمطبوعات بجامعة دمشق، 1989.
- 5- سميح الجابي، محمد علي عثمان، «تطبيقات عملية في أسس الهندسة الكهربائية»، منشورات جامعة دمشق، 1991.
- 6- Debevec P. T., "Transients and Oscillations in RLC circuits",
- 7- Stenström L. and Mobedjina M., "Limitation of Switching Overvoltages by Use of Transmission Line Surge Arresters". CIGRE, Zagreb, Croatia, 1998.
- 8- Camm E. H., "Shunt Capacitor Overvoltages and a Reduction Technique". IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, New Orleans, 1999.
- 9- Sanaye-Pasand M., Dadashzadeh M., R., Khodayar M., "Limitation of Transmission Line Switching Overvoltages using Switch sync Relays". International Conference on Power Systems Transients (IPST'05). Canada, 2005.
- 10- Skuletic S., D. and Mijajlovic P., "Experimental Investigations of Switching Overvoltages in 110 kV Network of Power System of Montenegro". IEEE Power Tech, Bologna, 2003.
- 11- Kizilcay M., "Switching Overvoltages in a 400-KV Cable System". 16th PSCC, Glasgow, Scotland, 2008.
- 12- Lopez-Roldan J., et al., "Fast Transients Overvoltages Produced by Switching Distribution Transformers with a Vacuum Circuit Breaker: Simulation and Testing".
- 13- Durbak D., "Temporary Overvolages Following Transformer Energizing". Power Technology, Siemens PTI. 2006.
- 14- Coury D., V., et al., "Transient Analysis Resulting from Shunt Capacitor Switching on an Actual Electrical Distribution System". IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power ICHPQ, Athens Greece, 1998.
- 15- Bui-Van Q., et al., "Transient Simulation Study for the 1500 KM North -south 500 kV Interconnection in Vietnam". IEEE Power Tech, Italy, Bologna, 2003.
- 16- Cheng C. P. Cheng C., P., Shihe C., "Simulation of Resonance Over-voltage during Energization of High Voltage Power Network". IPST, New Orleans, USA, 2003.
- 17- Hammad A., "Tracing ground path resonances in a Sub-transmission network with cables". Swiss Power System, CEDRAT NEWS No. 58 2009. www.cedrat.com
- 18- Canadian/American EMTP User Group, "ATP Rule Book", Portland, Oregon/USA, 2006.
- 19- Ramli M., S., "Investigation of Circuit Breaker Switching Transients for Shunt Reactors and Shunt Capacitors". Master Degree Dissertation, Queensland University of Technology, 2008.
- 20- Capitaneanu S., De Fornel B., Fadel M., Jadot F., Malrait F. "Modelling and Identification for Reducing of Overvoltage Transients". IEEE Proceeding Power Electric Applications, Vol. 150, No/Réf. 2, pp 175 – 184, 1999
- 21- Diesendorf W. "Insulation Co-ordination in High Voltage Electric Power Systems". London, England: Butterworth & Co Ltd. Copyright 1974.
- 22- Lewis W., "The Protection of Transmission Systems Against Lightning". New York, NY, John Wiley

& Sons, Inc. 1950.

- 23- Rüdénberg R.” Transient Performance of Electric Power Systems”. Cambridge, Massachusetts: McGraw-Hill. Copyright 1950.
- 24- Sadović S.Čaršimamović S., Heleta M., Bajramović Z., Vučinić N. «Restricting value of switching over voltages onto long high voltage transmission lines by means MO surge arresters building into transmission lines», XVIII Symp. of El. Eng. Yug., Budva 1987
- 25- 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, 2007
- 26- Mestas P. & Tavares M. C.” Comparative Analysis of Control Switching Transient Techniques in Transmission Lines Energization Maneuver”, IPST – 07, Lyon, France, 2007
- 27- Sadovic S. & Sadovic T.” Overhead Line Switching Surge Simulator”, IPST – 07, Lyon, France, June, 2007
- 28- 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.
- 29- Čaršimamović S., Bajramović Z., Marković O., «An analysis of the switching overvoltages on the 110 kV overhead-cable line», 11-th CEPST Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, 1996
- 30- 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, 2006.
- 31- Ibrahim A., Dommel H., W.,” A Knowledge Base for Switching Surge Transients”, IPST – 05, Montreal, Canada, 2005.
- 32- Seyedi H., Sanaye H.,” Application of Transmission Line Surge Arrestors to Reduce Switching Overvoltages ”, IPST – 05, Montreal, Canada, 2005.
- 33- 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, 1999.
- 34- Oprea L. and Velicescu C. “Switching Overvoltages on 400 and 750 kV Romanian Transmission Lines”, IPST – 99, Budapest, Hungary, 1999.
- 35- Cipcigan L., Smith L. K., Hiley, J. “Overvoltages Limitation in the 400 kV Nord Transylvania Network”, IPST – 99, Budapest, Hungary, 1999
- 36- Anderson P., et al,»Subsynchronous Resonance in Power System>. IEEE Press, New York.1990
- 37- Greenwood A.»Electrical Transients in Power Systems». John Wiley & Sons, 1991.
- 38- Sadeghkhan I. et al,»Investigation of Transmission Line Overvoltages and their Deduction Approach». World Academy of Science, Engineering and Technology, London, 2009
- 39- Bak C. L., et al,» Analysis and Simulation of Switching Surge Generation when Disconnecting a Combined 400 kV Cable/Overhead Line with Shunt Reactor». IPST- 07, Lyon, France. 2007
- 40- Charalambous C., et al,» Validation of a Power Transformer Model for Ferroresonance with System Tests on a 400 kV Circuit». IPST- 07, Lyon, France. 2007
- 41- Cogo J. R. & Dommel H. W.,» Overvoltage Problems of Small-Scale Generators Connected to Large Systems». IPST- 07, Lyon, France. 2007
- 42- Fulczyk M., et al,» ATP-EMTP Investigation of a New Fault Location Method for Multi-Terminal

- Power Lines». IPST- 07, Lyon, France. 2007
- 43- Pack S., et al,»Transient Voltage Stress of 400 kV Urban System Evaluated by Numerical Calculations». IPST- 07, Lyon, France. 2007
- 44- CIGRE WG 33.10 «Temporary Overvoltages - System Aspects» Electra N° 185, 1999
- 45- CIGRE WG 33.10 «Temporary Overvoltages Test Case Results» Electra N° 188, 2000
- 46- Dommel H., W., «EMTP Theory Book». New York, 1986.
- 47- Colla L., et al,»Design and operation of EHV transmission lines including long insulated cable and overhead sections,». International Power Engineering Conference, paper TM-3.6J. Proc. IEEE 2005
- 48- Colla L., et al,»Temporary Overvoltages due to Harmonic Resonance in Long EHV Cables». IPST- 07, Lyon, France. 2007
- 49- Matlab Manual ver. 7,»Dynamic System Simulation». Mathworks inc., 2001
- 50- Matlab- the language of Technical computing, getting started, 1997
- 51- Canadian/American EMTP User Group, “ATP Rule Book”, Portland, Oregon/USA, revised and distributed by the EEUG Association, 2006
- 52- Bonneville Power Administration, “EMTP Theory Book”, Branch of System Engineering, Oregon, USA, 1987.
- 53- Al-Hasawi W. and Abbasy N., «Evaluation of transient switching over-voltages in Kuwait EHV network using EMTP». EPST-99, Budapest, Hungary, 1999.
- 54- 54 - علي الجازي،»البرمجة 3 «. مديرية الكتب والمطبوعات، جامعة دمشق. 2006
- 55- 55 - أحمد كلثوم،»التوترات العابرة الناتجة عن الطنين الكهرومغناطيسي في الشبكة الكهربائية في سوريا». المؤتمر العلمي الأول لقسم هندسة الطاقة الكهربائية، جامعة دمشق. 1979
- 56- 56 - سميح الجابي،»التوترات العابرة واختيار مستويات العازلية في الشبكات عالية التوتر». المؤتمر العلمي الأول لقسم هندسة الطاقة الكهربائية، جامعة دمشق. 1979
- 57- 57 - علي حمزة،»التوليد الكهربائي الموزع». مديرية الكتب والمطبوعات، جامعة دمشق. 2010
- 58- 58 - محمد نضال الرئيس،»هندسة التوتر العالي». مديرية الكتب والمطبوعات، جامعة دمشق. 1982
- 59- 59 - سميح الجابي، «التوترات العابرة ذات المنشأ الداخلي في شبكات التوتر العالي». مجموعة محاضرات في السنة الأولى ماجستير هندسة نظم القدرة الكهربائية، جامعة دمشق. 2008/2007.
- 60- 60 - هاكوب بوغوص وهاشم ورقوزق،»المحولات الكهربائية». مديرية الكتب والمطبوعات، جامعة دمشق. 2005.
- 61- 61 - الياس جبور وعلي الجازي،»الالات الكهربائية التزمانية». مديرية الكتب والمطبوعات، جامعة دمشق. 2008.
- 62- 62 - علي الجازي، «نمذجة ومحاكاة الشبكات الكهربائية». مجموعة محاضرات في السنة الأولى ماجستير هندسة نظم القدرة الكهربائية، جامعة دمشق. 2009/2008.
- 63- 63 - سميح الجابي، «التمثيل العددي لبعض حالات التشغيل الخاصة للمولدات الكهربائية». مجلة المهد العلي للتقانة، بخارست. 1979.

6. Investigation of some transient phenomena in the Syrian power system, and proposing proper measures for enhancing the dynamic performance of the grid.

A part of the Syrian 230400/kV has been modeled using EMTP. With the inputted data file one can simulate any disturbance on the system. Only one needs to change the disturbance data cards. A number of simulations have been done. A number of faults at different locations and duration have been simulated with and without controls where the output results are: waves of bus voltages, current waves, machine excitation currents, torque waves and machine rotor angles and velocities. The results showed that some of the generator output voltages had voltage spikes with 10 times the rated voltage without control and even about 4 times with controls.

It is worth mentioning that such studies of electromagnetic transients in the Syrian power system have not yet been performed or at least not published by electricity authority. Some of the major difficulties faced in conducting this work have been the lack of network data, and unavailability of updated software. The main outcome of this research work is at least raising some of the problems of the Syrian power system, which should be studied in detail in case the required parameters of the power system components are available.

Summary of PhD thesis

Thesis title:

“Digital simulation of electromagnetic transients in electric power systems”.

1- Introduction

Transients in electric power systems due to disturbances (e.g. faults, line or load switching) may be subdivided, for reasons of its dominating frequencies and time constants, into characteristic time/frequency ranges. They range from extremely fast traveling wave phenomena on overhead lines to the control phenomena of steam turbines.

Characteristic for the electromagnetic transients (i.e. fast transients) are mutual charging processes occurring between the inductive and capacitive energy storage of the network, including the leakage inductances of the electrical machines. Examples for electromagnetic transients are: Lightning surges (in μs), switching surges (in ms) ...etc. These transients affect the system components near the fault without influencing the generators performance.

During the electromechanical transients (slow transients) the charging processes take place between the mechanical energy storage-elements, and a wide area of the system may be affected. The transient stability is an example of these transients, where the main concern is the oscillatory behavior of the generators with respect to each other following transmission faults and switching operations.

For the digital simulation of transients in power systems many programs are presently being used worldwide, such as EMTP, NETOMAC, PSS/E, and Simpower and to some extent Matlab. The programs Matlab/Simulink, Simpower and EMTP have been used in his research work.

2- Simulation and modeling of basic circuits in transient operation mode using Matlab/Simulink and Simpower for a variety of configurations.

3. Building mathematical models of power system components and its application to typical networks and to high voltage lines (230 kV and 400 kV) from the Syrian transmission network. The studies on these lines have shown that the switching on of the line has resulted in about 200% of the rated voltage with a distortion of receiving end voltage wave. The distortion is eliminated in about 200300- ms. The switching off of the line has caused more severe voltage values and distortion which is eliminated in about 600 ms.

4. Simulation of selected transients in typical networks resulting from resonance and large disturbances.

5. Case studies: a number of case studies have been performed.

«Numerical Simulation of Electromagnetic Transients in Electrical Networks»

Syrian Arab Republic
University of Damascus
Faculty of Mechanical and Electrical Engineering
Power Systems Engineering Department

«Numerical Simulation of Electromagnetic Transients in Electrical Networks»

**PHD Dissertation Prepared by
Eng. Mohamad Ammar Saati**

Scientific Coordinator
Prof. Dr. Eng. Samih Al Jabi
Damascus University

Scientific C0 – Coordinatar
Prof. Dr. Eng. Gerhard Herold
Erlangen University

Damascus - 2010

