



جامعة 7 أكتوبر - مصراته  
كلية الهندسة / قسم الهندسة الكهربائية  
شعبة نظم القوى الكهربائية



# دراسة التوافقيات الناجمة عن أفران الصهر بالقوس الكهربائي

"مشروع مقدم للاستكمال الجزئي لنيل درجة البكالوريوس في الهندسة الكهربائية"

إعداد الطالبين

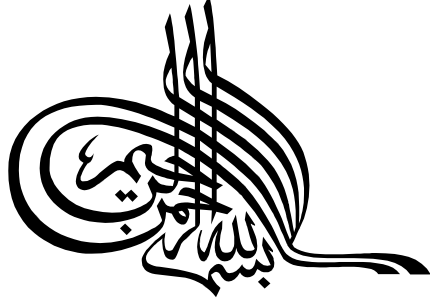
عيسى عبد القادر التونسي

علي عمر أبو دبوس

إشراف

د. جمال صلاح عبد الملك

ربيع 2006 - 2007 م



﴿ وَقُلْ رَبِّ زِدْنِي عِلْمًا ﴾

من سورة طه الآية (114)

# الإهداء

إلى من كانوا عوناً وسنداً لنا منذ طفولتنا

إلى سر وجودنا ونبض قلوبنا

آبائنا وأمهاتنا

وإلى زهور عمرنا..... وبسمات حياتنا

إخوتنا وأخواتنا

وإلى أصدقاء العمر ..... ورفقاء الدرب

إلى الشموع التي أنارت لنا دروب العلم والمعرفة

الأساتذة الكرام

نهدي ثمرة جهدنا ، راجين من الله أن يوفق الجميع

# الشكر والتقدير

نحمد الله ونشكره على توفيقه لنا لإتمام هذا المشروع, ثم نتقدم بجزيل الشكر وفائق الاحترام إلى كلاً من الدكتور المشرف " جمال صلاح عبد الملك " والمهندسين " عبد الله الغويل " و "محمد جنات" على كل ما قدموه لنا من نصح وإرشاد لإظهار هذا المشروع في أفضل صورة بإذن الله . كما نتقدم بجزيل الشكر والامتنان إلى الإخوة المهندسين والعاملين بمحطة استقبال وتوزيع الكهرباء بمجمع الحديد والصلب على حسن تعاونهم معنا. وكما نتقدم بجزيل الشكر والتقدير إلى أعضاء هيئة التدريس والمعيدين والموظفين بالكلية والى جميع الطلبة والأصدقاء.

# الملخص

نظراً لما تسببه التشوهات الحادثة في الأشكال الموجية للجهد والتيار والتي تعرف بالتوافقيات من حدوث اتلافات وعمليات تشغيل غير طبيعية للمعدات والشبكات الكهربائية، وتقليل عمرها الافتراضي، فإن عملية دراسة التوافقيات والتي تهدف إلى علاج هذه المشكلة تأخذ أهمية كبيرة جداً في وقتنا الحاضر، وذلك هدفاً للحصول على منظومات كهربائية أكثر إستقراراً وأكثر كفاءة.

وعلى هذا تم في الفصل الأول دراسة مفهوم التوافقيات وأنواعها وأسباب ظهورها بشكل كبير وخاصة في السنوات الأخيرة، وكذلك تم التعرض لأهم المشاكل التي تسببها التوافقيات في الشبكة وتأثيرها على المعدات والأجهزة الكهربائية المختلفة. ولعلاج المشاكل التي تسببها التوافقيات يجب أولاً معرفة طرق تحليلها وحسابها ولذلك يهتم الفصل الثاني في هذا البحث بالطرق المستخدمة في تحليل التوافقيات وحسابها رياضياً والأجهزة المستخدمة لقياسها ونظرية عمل كلاً منها.

وباعتبار أفران الصهر بالقوس الكهربائي من أهم مصادر توليد التوافقيات في نظم القوى الكهربائية فقد تم في الفصل الثالث التعرض إلى هذا النوع من الأحمال بشكل مفصل من حيث نظرية عملها وسلوكها كأحمال غير خطية والأجهزة الكهربائية المستخدمة معها، والمشاكل الناجمة عنها وأنواع التوافقيات التي تسببها، وكيفية الحد منها وترشيحها. أما الفصل الرابع فهو يدرس طرق ترشيح التوافقيات باستخدام المرشحات وأنواع المرشحات المستخدمة في ترشيح التوافقيات وخصائص كل نوع منها وفكرة عمله.

وفي الفصل الخامس فقد تم القيام بدراسة ميدانية لأفران الصهر بالقوس الكهربائي الموجودة بمجمع الحديد والصلب "بمصراته" والتعرف على أنواع التوافقيات الناتجة عنها بقياسها وأخذ قراءات من القضبان المختلفة التي بالمجمع وتحليل هذه القراءات، كما تم التعرف في هذا الفصل على محطة التعويض للقدرة الغير فعالة المربوطة مع قضبان الأفران بالمجمع، وكيفية استخدام هذه المحطة في تعويض القدرة الغير الفعالة وفي نفس الوقت ترشيح التوافقيات الناتجة عن الأفران، وكذلك تم التعرف على أهم المشاكل التي تعاني منها المحطة وأسبابها. أما الفصل السادس فقد تم فيه وضع نموذج لفرن قوس كهربائي ثم توصيله بشبكة مشابهة للشبكة الكهربائية الموجودة بالمجمع، وهذه المحاكاة تمت باستخدام برنامج (MATLAB SIMULINK)، بعد ذلك تم تحليل التوافقيات الناتجة عن هذا الفرن قبل وبعد عملية الترشيح وكذلك تحليل معاوقة الشبكة في حالتها وجود قصر وعدم وجوده بين مرشحي التوافقيتين الثانية والثالثة، واحتوى الفصل السابع على أهم الاستنتاجات والتوصيات التي تم التوصل إليها من خلال هذه الدراسة.

## فهرس المحتويات

الصفحة	الموضوع	ر.م
أ.....	الآية	
ب.....	الإهداء	
ج.....	الشكر والتقدير	
د.....	الملخص	
ه.....	فهرس المحتويات	
ط.....	فهرس الأشكال	
ك.....	فهرس الجداول	
1.....	المقدمة	
<b>الفصل الأول: التعريف بالتوافقيات</b>		
3.....	مقدمة	1-1
3.....	تعريف التوافقيات	2-1
5.....	أنواع التوافقيات	3-1
5.....	توافقيات زوجية	1-3-1
5.....	توافقيات فردية	2-3-1
5.....	توافقيات وسطية	3-3-1
7.....	أسباب ظهور التوافقيات	4-1
8.....	أفران القوس الكهربائي	1-4-1
10.....	المبدلات الكهربائية	2-4-1
11.....	الآلات الكهرومغناطيسية	3-4-1
12.....	مصاييح الفلوريسنت	4-4-1
12.....	المشاكل الناجمة عن التوافقيات	5-1
<b>الفصل الثاني : تحليل وحساب التوافقيات</b>		
15.....	مقدمة	1-2
15.....	متسلسلة فورير الجيبية	2-2
17.....	الطريقة العددية لحساب معاملات فورير	3-2
18.....	معامل التشوه الكلي	4-2

الصفحة	الموضوع	ر.م
18	معامل التوافقيات	5-2
18	مثال على حساب معامل التوافقيات و معامل التشوه الكلي	6-2
21	أجهزة قياس التوافقيات	7-2
21	المحلل الرئيسي	1-7-2
21	المحلل الرئيسي الآلي	2-7-2
22	المحلات المعتمدة على المبدأ الرقمي	3-7-2
22	القياس عن طريق جهة التدفق	4-7-2
23	نموذج للحساب	8-2
<b>الفصل الثالث: أفران القوس الكهربائي</b>		
25	مقدمة	1-3
25	نظرية عمل أفران القوس الكهربائي	2-3
25	الإشعال بالجهد العالي	1-2-3
25	الإشعال بالجهد المنخفض	2-2-3
25	أنواع أفران القوس الكهربائي	3-3
26	تغذية الأفران بالطاقة الكهربائية	4-3
28	الأجهزة الكهربائية المستخدمة مع أفران القوس الكهربائي	5-3
28	محول بعدد لفات متغيرة	1-5-3
28	محاثات على التوالي	2-5-3
28	منظم تلافائي للتيار	3-5-3
28	محركي الالكتروود و ميل الفرن	4-5-3
28	قاطع الدائرة	5-5-3
29	أفران القوس الكهربائي كحمل غير خطي	6-3
31	المشاكل الناجمة عن هذه الأفران	7-3
31	تغيير تردد الشبكة	1-7-3
31	هبوط في جهد الشبكة	2-7-3
32	توليد التوافقيات	3-7-3
32	تحليل التوافقيات وأنواعها بأفران القوس الكهربائي	8-3
33	الحد من التوافقيات الناتجة عن أفران القوس الكهربائي	9-3
35	ترشيح التوافقيات الناتجة عن أفران القوس الكهربائي	10-3

## الفصل الرابع : المرشحات

37.....	مقدمة.....	1-4
37.....	المرشحات الغير فعالة.....	2-4
39.....	مرشح إمرار نطاقي.....	1-2-4
42.....	مرشح إمرار الترددات العالية.....	2-2-4
45.....	ترشيح التوافقيات باستخدام المرشحات الغير فعالة.....	3-4
46.....	مثال على استخدام المرشحات الغير فعالة.....	4-4
50.....	المرشحات الفعالة.....	5-4
50.....	المرشحات الفعالة المتوازية.....	1-5-4
52.....	المرشحات الفعالة المتوالية.....	2-5-4
52.....	المرشحات الفعالة الهجينة.....	3-5-4

## الفصل الخامس : تطبيق عملي على أفران الصهر بمصنع الحديد والصلب

56.....	مقدمة.....	1-5
56.....	أفران الصهر بالقوس الكهربائي بالمجمع.....	2-5
58.....	محطة التعويض بالمجمع.....	3-5
59.....	طرق تشغيل محطة التعويض.....	1-3-5
62.....	مرشحات التوافقيات بالمحطة.....	2-3-5
69.....	مقاومة الإخماد بالمحطة.....	3-3-5
70.....	المعلومات التصميمية للمحطة.....	4-3-5
71.....	المشاكل المتعلقة بمحطة التعويض.....	5-3-5
71.....	قياس التوافقيات بالمجمع.....	4-5
73.....	بعض عينات القياس للتوافقيات بالمجمع.....	5-5

## الفصل السادس: المحاكاة والنتائج

77.....	مقدمة.....	1-6
77.....	المحاكاة.....	2-6
77.....	عمل نموذج لفرن قوس كهربائي.....	1-2-6
79.....	توصيل النموذج بشبكة كهربائية.....	2-2-6
81.....	النتائج.....	3-6
81.....	تحليل معاوقة الشبكة.....	1-3-6
83.....	تحليل التوافقيات الناجمة عن الفرن.....	2-3-6



الصفحة	الموضوع	ر.م
84.....	تحليل التوافقيات الناجمة عن الفرن في مرحلة الصهر الأولي.....	3-3-6
88.....	تحليل التوافقيات الناجمة عن الفرن في مرحلة التنقية.....	4-3-6
<b>الفصل السابع: الاستنتاجات والتوصيات</b>		
95.....	الاستنتاجات.....	1-7
96.....	التوصيات.....	2-7
97.....	المراجع.....	
98.....	الملاحق.....	

## فهرس الأشكال

رقم الشكل	عنوان الشكل	الصفحة
1-1	التشوه الناتج في الشكل الموجي بسبب التوافقيات	4
2-1	شكل موجي يحتوي على توافقيات وسطية	6
3-1	الفرق بين الأحمال الخطية و اللاخطية	8
4-1	طيف توافقيات التيار في أفران القوس الكهربائي بالتيار المتردد	9
5-1	أنواع الأفران بالقوس الكهربائي على حسب مصدر التغذية	10
1-2	الطيف الخطي المفرد لمتسلسلة فورير الجيبية	16
2-2	قنطرة مقوم موجة كاملة غير محكوم ثلاثي الطور	18
3-2	الشكل الموجي لجهد و تيار الطور (A)	19
4-2	الطيف و الشكل الموجي للتوافقيات في التيار $I_A$	20
5-2	نموذج لحمل لاخطي	23
1-3	مخطط P.V.I لفرن قوس كهربائي ذو ستة الكترودات	27
2-3	منحنيات القدرة النموذجية لفرن القوس الكهربائي	27
3-3	مخطط يبين التركيب الأساسي لأفران القوس الكهربائي	29
4-3	مخطط لفرن قوس كهربائي مثالي	30
5-3	تمثيل فرن القوس الكهربائي كدائرة كهربائية	30
6-3	كيفية ربط الثايروستورات مع المحول لتقليل التوافقيات	33
7-3	موجة التيار المار في الملفات	34
8-3	مخطط توضيحي لمحطة تعويض (SVC)	35
1-4	مخطط مبسط يوضح المرشح الغير فعال	39
2-4	مرشح إمرار نطاقي	40
3-4	خواص مرشح إمرار نطاقي	42
4-4	تركيب وخواص مرشح إمرار نطاقين	43
5-4	مرشح إمرار ترددات عالية	44
6-4	خواص مرشح إمرار الترددات العالية	45
7-4	تركيب وخواص مرشح نوع C	46
8-4	الطيف التوافقي لتيار حمل لاخطي	48
9-4	مخطط أحادي الطور يوضح توصيل الحمل اللاخطي بالشبكة	48
10-4	توصيل المرشحات غير الفعالة على التوازي	50
11-4	الشكل الموجي والطيف التوافقي للتيار بعد عملية الترشيح	50
12-4	العلاقة بين مقدار المعاوقة المكافئة للشبكة و التردد	51

رقم الشكل	عنوان الشكل	الصفحة
13-4	توضيح خاصة تعويض التيار لمرشح فعال متوازي	52
14-4	دائرة لمرشح فعال متوازي باستخدام PWM-VSI	52
15-4	دائرة لمرشح فعال متوالي باستخدام PWM-VSI	53
16-4	دائرة لمرشح فعال هجين باستخدام PWM-VSI	54
17-4	ترشيح توافقيات التيار باستخدام مرشح فعال هجين	54
18-4	العلاقة بين التشوه الكلي للتوافقيات و كسب المرشح الفعال	55
1-5	نظام التوليد والتوزيع بمجمع الحديد والصلب	57
2-5	طريقة توصيل الأفران الستة بالشبكة الكهربائية داخل المجمع	58
3-5	محطة التعويض للقدر غير فعالة بمجمع الحديد والصلب (SVC)	60
4-5	قياسات عملية لتيارات و جهود مختلفة من مجمع الحديد و الصلب	61
5-5	توصيل مكثفات كل طور لمرشح التوافقية الثانية	62
6-5	تغير مقدار معاوقة مرشح التوافقية الثانية مع التردد	63
7-5	توصيل مكثفات كل طور لمرشح التوافقية الثالثة	64
8-5	تغير مقدار معاوقة مرشح التوافقية الثالثة مع التردد	65
9-5	توصيل مكثفات كل طور لمرشح التوافقية الخامسة	66
10-5	تغير مقدار معاوقة مرشح التوافقية الخامسة مع التردد	67
11-5	توصيل مكثفات كل طور لمرشح التوافقية السابعة	68
12-5	تغير مقدار معاوقة مرشح التوافقية السابعة مع التردد	69
13-5	طريقة توصيل جهاز القياس على قضبان التوصيل المختلفة	72
14-5	قراءات عينة القياس (1)	73
15-5	قراءات عينة القياس (2)	74
16-5	قراءات عينة القياس (3)	75
1-6	العلاقة بين الجهد والتيار للقوس الكهربائي	77
2-6	الدائرة المكافئة لفرن صهر بالقوس الكهربائي	78
3-6	الدائرة الكهربائية المستخدمة لإجراء الدراسة	79
2-6	القدرة المستهلكة في الفرن	80
3-6	القيمة الفعالة للتيار والجهد على الملف الثانوي لمحول الفرن	80
4-6	الشكل الموجي للتيار المار في الكترودات الفرن	81
5-6	قياس معاوقة الشبكة في حالة عدم وجود قصر بين مرشحي التوافقيتين الثانية والثالثة	82
6-6	قياس معاوقة الشبكة في حالة وجود قصر بين مرشحي التوافقيتين الثانية والثالثة	83
7-6	توافقيات التيار قبل محول الفرن وفي مرحلة الصهر الأولي	84
8-6	توافقيات التيار بعد محول الفرن وفي مرحلة الصهر الأولي	85
9-6	توافقيات التيار بعد الترشيح وفي مرحلة الصهر الأولي	85

رقم الشكل	عنوان الشكل	الصفحة
10-6	توافقيات الجهد على قضيب الأفران في حالة عدم الترشيح وفي مرحلة الصهر الأولي.....	86
11-6	توافقيات الجهد على قضيب الأفران في حالة الترشيح وفي مرحلة الصهر الأولي.....	87
12-6	توافقيات الجهد على قضيب KV220 في حالة عدم الترشيح وفي مرحلة الصهر الأولي.....	87
13-6	توافقيات الجهد على قضيب جهد KV220 في حالة الترشيح وفي مرحلة الصهر الأولي.....	88
14-6	توافقيات التيار قبل محول الفرن وفي مرحلة التنقية.....	89
15-6	توافقيات التيار بعد محول الفرن وفي مرحلة التنقية.....	89
16-6	توافقيات التيار بعد الترشيح وفي مرحلة التنقية.....	90
17-6	توافقيات الجهد على قضيب الأفران في حالة عدم الترشيح وفي مرحلة التنقية.....	91
18-6	توافقيات الجهد على قضيب الأفران في حالة الترشيح وفي مرحلة التنقية.....	91
19-6	توافقيات الجهد على قضيب جهد KV220 في حالة عدم الترشيح وفي مرحلة التنقية.....	92
20-6	توافقيات الجهد على قضيب جهد KV220 في حالة الترشيح وفي مرحلة التنقية.....	93

## فهرس الجداول

رقم الجدول	عنوان الجدول	الصفحة
1-1	ترددات ومقادير لموجات جيبيية.....	6
2-1	رتبة و تتابع التوافقيات.....	7
3-1	رتب التوافقيات المتولدة من عدة مبدلات مختلفة.....	11
4-1	عينة لقيم مركبات توافقية ناتجة من مصباح فلوريسنت.....	12
1-2	ملخص شروط التناظر للموجات الدورية.....	17
1-3	نسب توافقيات التيار المتولدة من أفران القوس الكهربائي لمرحلي التشغيل.....	32
1-5	توافقيات التيار المتوقعة بسبب فرن صهر بالقوس الكهربائي.....	70
2-5	توافقيات التيار المتوقعة بسبب محولات الأفران.....	70
3-5	توافقيات التيار المتوقعة بسبب مثبتات الجهد.....	71
4-5	توافقيات التيار المشتركة التي اعتبرت في تصميم المرشحات.....	71
1-6	ترددات الرنين في حالة عدم وجود قصر بين مرشحي التوافقيتين الثانية والثالثة.....	82
2-6	ترددات الرنين في حالة وجود قصر بين مرشحي التوافقيتين الثانية والثالثة.....	83

## المقدمة

فيما مضى كان الاستعمال السائد للكهرباء هو في تشغيل المحركات الحثية واستخدامها في الصناعة, أو في الإضاءة والتدفئة وغيرها من الاستعمالات التي ليس لها تأثير على الشكل الموجي للجهد أي أنها تسحب تيار جيبي من الشبكة وتعرف هذه الأحمال بالأحمال الخطية, كما أستعملت الكهرباء في بعض الصناعات لتغذية أحمال كان لها أثر على الشكل الموجي للجهد متمثلاً في بعض التشوهات التي ظهرت على الشكل الموجي للجهد, ولكن كانت هذه الاستعمالات محدودة الانتشار , ويعرف مثل هذا النوع من الأحمال والتي تقوم بسحب تيار غير جيبي من الشبكة بالأحمال اللاخطية وهي المسئولة عن تشوه الشكل الموجي للجهد.

ولكن في السنوات الثلاثين الأخيرة انتشرت الأحمال اللاخطية بشكل كبير في الشبكات الكهربائية, وذلك بسبب الثورة الكبيرة التي حصلت في صناعة الالكترونيات, فظهر المعالج الدقيق والكثير من الأجهزة مثل المبدلات الكهربائية وأجهزة التصوير بالرنين المغناطيسي والمصابيح الغازية وأنظمة تشغيل القطارات الكهربائية وغيرها من الأحمال اللاخطية , التي تسبب في تشوه الشكل الموجي للجهد بالشبكة مما يسبب في الكثير من المشاكل وخاصة للأجهزة الحساسة والمعتمدة في عملها على التردد, كما تسبب في تسخين زائد عن المعدل الطبيعي للأجهزة الكهربائية و الموصلات والعديد من المشاكل الأخرى.

وكان سبب هذه التشوهات التي حدثت في الشكل الموجي للجهد أو التيار هو ظهور موجات جيبيّة أخرى بترددات مختلفة مركبة على المركبة الأساسية للجهد أو التيار والتي تعرف بالتوافقيات.

ومن أهم الأحمال اللاخطية المسببة في توليد التوافقيات هي أفران الصهر بالقوس الكهربائي وخاصة التي تعمل بالتيار المتردد, حيث انتشر هذا النوع من الأفران بشكل واسع في الصناعات الحديدية وإنتاج سبائك الحديد المختلفة, كما تستخدم في تنقية بعض المعادن الأخرى من المواد الخام, وتعتبر هذه الأفران كمصدر لجميع أنواع التوافقيات تقريباً, وذلك بسبب القوس الكهربائي الذي يعتبر كحمل غير خطي وغير مستقر وغير متزن ويسحب تيار عالي جداً.

ومن هنا جاءت فكرة هذا المشروع بدراسة هذه الظاهرة والتركيز على أفران الصهر بالقوس الكهربائي ودراسة التوافقيات الناتجة عنها والطرق المستخدمة للحد منها.

الفصل الأول

**التعريف بالتوافقيات**

**1-1 مقدمة:-**

إن هدف المولدات الكهربائية بمحطات الكهرباء هو توليد جهود متزنة ذات موجة جيبيية ثابتة المقدار والتردد ، ولكن هذا الهدف في الحقيقة صعب الوصول إليه في كافة أجزاء نظم القوى الكهربائية، لأن المولدات التزامنية تولد جهود لها موجات غير نقية و ذلك بسبب طبيعة اللف بهذه المولدات ، كما أن الأحمال في نظم القوى الكهربائية و خصوصا الصناعية لها طبيعة غير خطية يكون لها تأثير على الشكل الجيبي لموجات الجهد و التيار .

ويكون الشكل الموجي للجهد والتيار عبارة عن موجة محصلة لعدد من الموجات الجيبيية التي لها مقادير و ترددات مختلفة ، أو ما يعرف بالتوافقيات.

إن عدد الأحمال المنتجة للتوافقيات يزداد علي مر السنين حيث تشير إحدى الدراسات التي أجريت في الولايات المتحدة أن نسبة الأحمال المنتجة للتوافقيات حاليا ما بين 15% إلى 20% ولكن من المتوقع بعد عشرة سنوات قادمة أنها سوف تصبح ما بين 70% إلى 85% من التحميل الكلي على الشبكة.

لذلك أصبحت دراسة هذه الظاهرة ضرورية جدا لما لها من نتائج سلبية ، وكيفية معالجتها وذلك بإحداث بعض الإضافات أو التغييرات في تركيب هذه الأحمال.

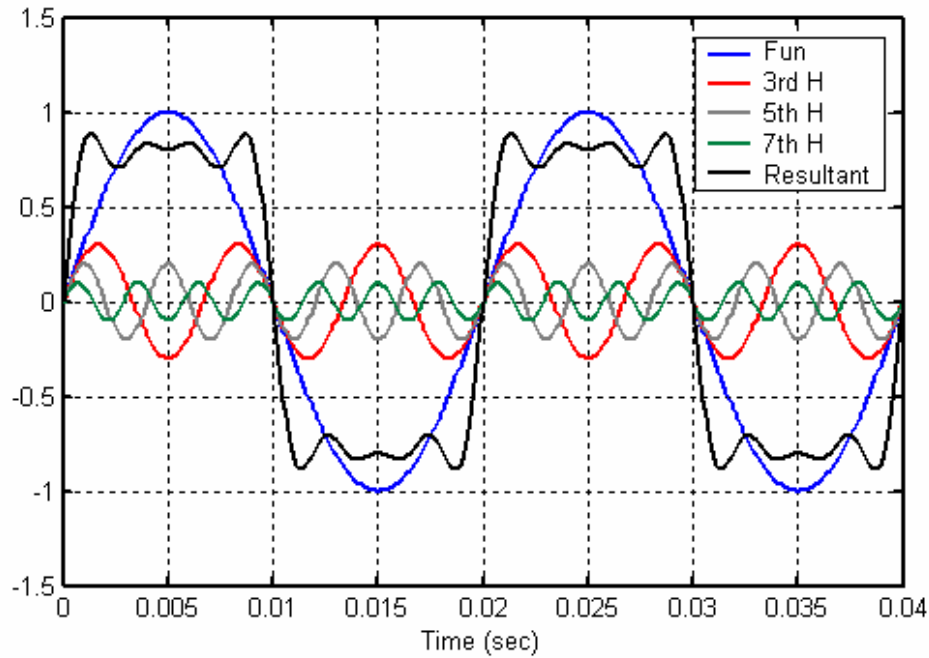
لدراسة تأثير هذه الظاهرة بالكامل هناك مفهومان مهمان يجب أخذهما في الاعتبار و هما يتعلقان بالتوافقيات في نظم القوى، المفهوم الأول هو طبيعة الأحمال المنتجة لهذه التوافقيات، و المفهوم الثاني هو طريقة إنتاج هذه التوافقيات و تدفقها.

**2-1 تعريف التوافقيات [4] :-**

التوافقيات في نظم القوى الكهربائية تعرف بأنها موجات جيبيية تظهر مركبة على الموجة الأساسية للجهد أو التيار و ترددها عبارة عن مضاعفات التردد الأساسي وتسبب في تشوه شكل موجة التيار أو موجة الجهد أو الاثنين معا.

حيث موجة الجهد أو التيار الدورية المشوهة أو الغير جيبيية يمكن تحليلها رياضيا باستخدام متسلسلة فوريير إلى حاصل جمع عدد لانتهائي من الموجات الجيبيية ذات ترددات مضاعفة للتردد الأساسي والذي قيمته 60 HZ في كندا و الولايات المتحدة ، وقيمته 50HZ في باقي دول العالم .

الموجة الجيبية التي لها نفس تردد الموجة الأصلية تسمى المركبة الأساسية (Fundamental Component), أما باقي الموجات الجيبية فتسمى بالتوافقيات (Harmonics). والشكل (1-1) يوضح المركبة الأساسية والتوافقيات الثالثة و التوافقية الخامسة و التوافقية السابعة حيث نلاحظ أن مقدار التوافقيات تكون عادة صغير بالمقارنة مع المركبة الأساسية. وعند جمع هذه الموجات الثلاثة نحصل على موجة دورية غير جيبية كما هو موضح.



شكل (1-1): التشوه الناتج في الشكل الموجي بسبب التوافقيات

بما أن التردد الأساسي في الشبكة العامة في الجماهيرية هو 50Hz فإننا سوف نعتمد هذه القيمة في دراستنا هذه.

يتم تسمية كل توافقية حسب ترددها وليس حسب مقدارها فمثلا إذا قلنا التوافقية الثالثة فهذا يعني أن ترددها هو  $3 \times 50 = 150 \text{ Hz}$  ، وإذا قلنا التوافقية الخامسة فهذا يعني أن لها تردد قيمته  $5 \times 50 = 250 \text{ Hz}$ ، وهكذا لبقية التوافقيات.



**3-1 أنواع التوافقيات [6,5]:-**

يمكن تقسيم التوافقيات حسب ترددها إلى ثلاث أنواع رئيسية هي :-

**1-3-1 توافقيات زوجية :- Even Harmonics**

وهي موجات ترددها عبارة عن عدد زوجي مضروب في التردد الأساسي ( $F_0$ ) أي يتبع العلاقة التالية:

$$F=2nF_0 \quad , (n=1,2,3,\dots) \quad \dots\dots\dots(1-1)$$

**2-3-1 توافقيات فردية :- Odd Harmonics**

وهي موجات ترددها عبارة عن عدد فردي مضروب في التردد الأساسي ( $F_0$ ) أي يتبع العلاقة التالية:

$$F=(2n+1)F_0 \quad , (n=1,2,3, \dots) \quad \dots\dots\dots(2-1)$$

**3-3-1 توافقيات وسطية (الكسرية) :- Interharmonics**

وهي تلك الموجات الجيبية للجهد أو التيار التي لها تردد عبارة عن عدد كسري مضروب في التردد الأساسي ( $F_0$ ) وهي يمكن أن تظهر كترددات منفصلة أو كطيف عريض النطاق.

وبذلك فإن ترددها سوف يكون في النطاق التالي:

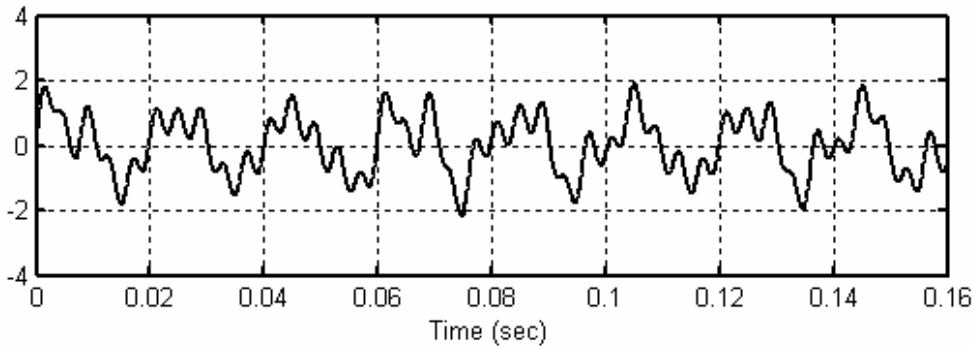
$$(n-1)F_0 < F < nF_0 \quad , (n=1,2,3,\dots) \quad \dots\dots\dots(3-1)$$

عندما  $n=1$  فإن التوافقيات تسمى في هذه الحالة بالتوافقيات التحتية (Subharmonics) وهي حالة خاصة من التوافقيات الوسطية.

والشكل رقم (2-1) يوضح تأثير التوافقيات الوسطية على الشكل الموجي لمحصلة الموجات الجيبية التي لها الترددات و المقادير الموضحة في الجدول (1-1)، حيث يتضح أن شكل الموجة غير دوري وغير متمائل.

جدول (1-1) : ترددات ومقادير لموجات جيبية [5]

التردد	المقدار
50	1.0
104	0.3
117	0.4
134	0.2
147	0.2
250	0.5



شكل (2-1) : شكل موجي يحتوي على توافقيات وسطية

وتقوم التوافقيات بفرض نفسها على الشكل الموجي الأساسي للشبكة مما يؤدي إلى تشويه وتغيير مقداره ، ولكن تكون في الغالب التوافقيات ذات الرتبة الفردية أكثر تأثراً من التوافقيات ذات الرتبة الزوجية.

إن توافقيات التيار ثلاثية الطور في النظام المتزن يمكن التعبير عنها وفقاً للمعادلة الآتية :

$$I_n = I_R \sin(n\omega t) + I_Y \sin[n(\omega t - 120^\circ)] + I_B \sin[n(\omega t + 120^\circ)] \dots\dots\dots(4-1)$$

حيث أن :

$I_n$  : تيار الخط المتعادل.

$I_R$  : تيار الطور الأحمر.

$I_Y$  : تيار الطور الأصفر.

$I_B$  : تيار الطور الأزرق.

$n$  : رتبة التوافقية .

من المعادلة (1-4) يلاحظ أن التوافقية الثالثة و مضاعفاتها تكون ذات تتابع طوري صفري، ويلاحظ أيضاً أن التوافقيات الثانية والخامسة والثامنة و... الخ تكون ذات تتابع طوري سالب، أما التوافقيات الرابعة والسابعة و... الخ، تكون ذات تتابع طوري موجب . والجدول (1-2) يوضح رتبة وتتابع كل توافقية .

جدول (1-2) : رتبة و تتابع التوافقيات [4]

رتبة التوافقية	1	2	3	4	5	6	7	8	9	ETC
تتابع التوافقية	+	-	0	+	-	0	+	-	0	.....

وفي حالة الأنظمة غير المتزنة فان معادلة توافقيات التيار تكون وفقاً للمعادلة الآتية :

$$I_n = I_R \sin(n\omega t) + I_y \sin[n(\omega t + \phi_y)] + I_B \sin[n(\omega t + \phi_B)] \dots\dots\dots(5-1)$$

حيث أن :

$$I_R \neq I_y \neq I_B$$

$$\phi_B \neq 120^\circ$$

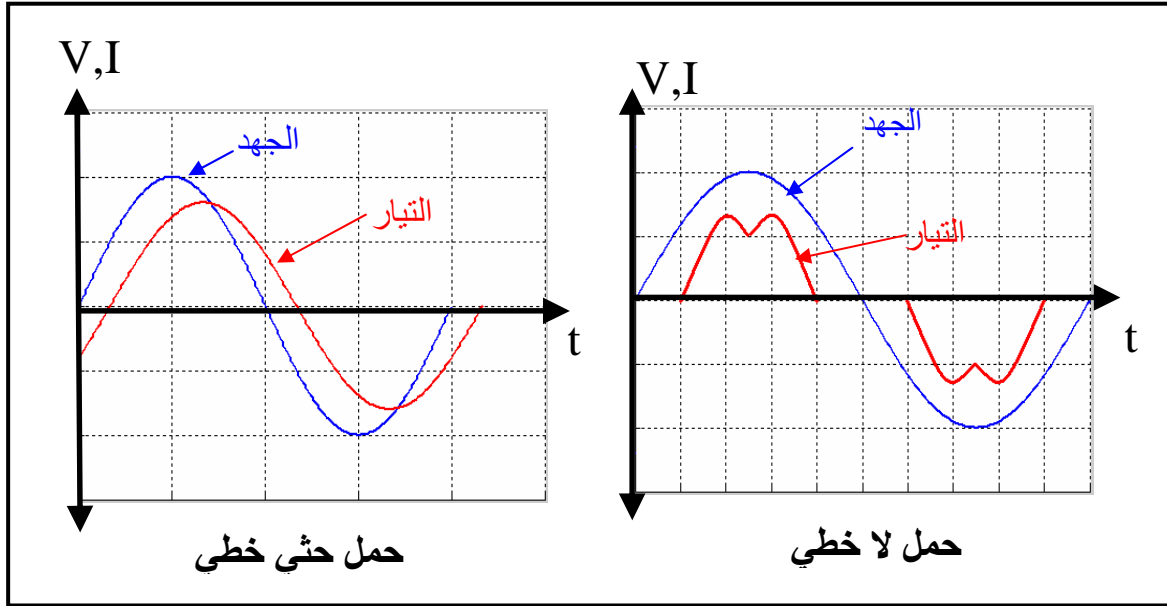
$$\phi_y \neq -120^\circ$$

في هذه الحالة تكون كل التوافقيات ذات تتابع طوري موجب أو سالب أو صفري . وفي حالة التتابع الصفري فان التيار سوف يتدفق في الخط المتعادل.

#### 4-1 أسباب ظهور التوافقيات [7,6,4] :-

تظهر التوافقيات في نظم القوى الكهربائية عادة بسبب وجود أحمال لا خطية ( Nonlinear loads ) ، وهذه الأحمال تختلف تماماً عن الأحمال الخطية ( Linear Loads ) من حيث أن التيار المار بها لن يكون علي علاقة خطية مع الجهد عند هذا الحمل ، ولكن العلاقة بينهما تأخذ شكل منحنى لا خطي ، وبذلك سوف يكون شكل موجة التيار لا يشبه شكل موجة الجهد بل يختلف عنه .

والشكل (1-3) يوضح الشكل الموجي للتيار عند مروره في حمل خطي و آخر لا خطي ، حيث نلاحظ أن شكل موجة التيار في الحمل الخطي مشابهة لشكل موجة الجهد مع وجود إزاحة في الطور بينما شكل موجة التيار في الحمل اللاخطي يكون عبارة عن نبضات هذه النبضات تختلف من حمل لآخر ، وعند تحليلها باستخدام متسلسلة فوريير فإننا نحصل على مركبات توافقية .



شكل (1-3) : الفرق بين الأحمال الخطية و اللاخطية

ومن أمثلة الأحمال اللاخطية أفران القوس الكهربائي والمبدلات الكهربائية (Electrical Converter) والمحولات المستخدمة في أنظمة القطارات و المصابيح الغازية و أجهزة الحاسوب و غيرها .  
وفيما يلي شرح مفصل لأهم مصادر توليد التوافقيات :-

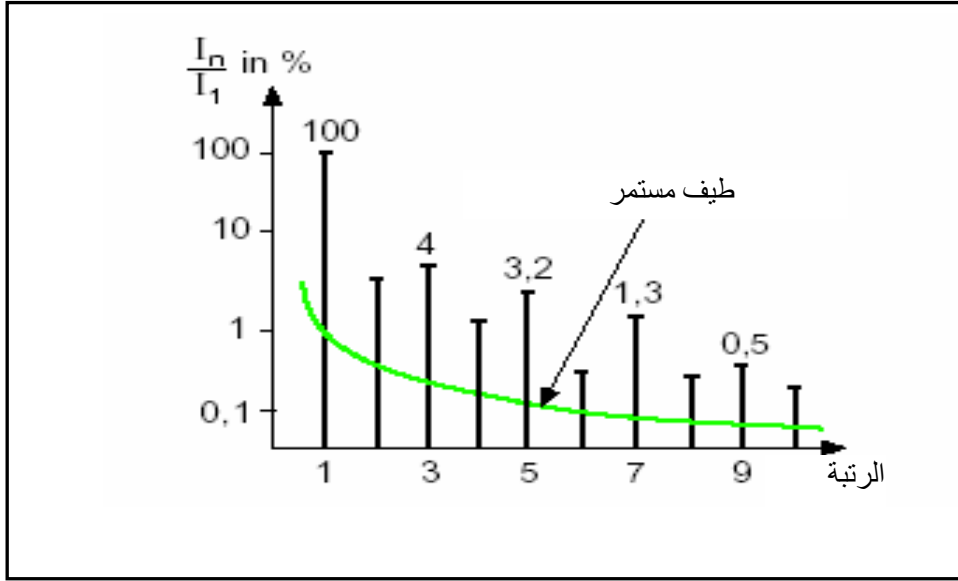
#### 1-4-1 أفران القوس الكهربائي [7] :- Electric Arc Furnaces

تعتبر أفران القوس الكهربائي من أهم مصادر توليد التوافقيات حيث تنتشر هذه الأفران في صناعة الصلب، وهي عبارة عن نوعان :-

- أفران التيار المتردد ( AC ) .
- أفران التيار المستمر ( DC ) .

#### أ- أفران القوس الكهربائي بالتيار المتردد :-

القوس الكهربائي عبارة عن حملي لا خطي وغير متماثل و غير مستقر، حيث يتولد من هذه الأفران طيف من التوافقيات الفردية و الزوجية و الوسطية. وبذلك فان الطيف التوافقي سوف يكون مستمراً لكل التوافقيات كما هو موضح بالشكل (1-4).



شكل (1-4): طيف توافقيات التيار في أفران القوس الكهربائي بالتيار المتردد

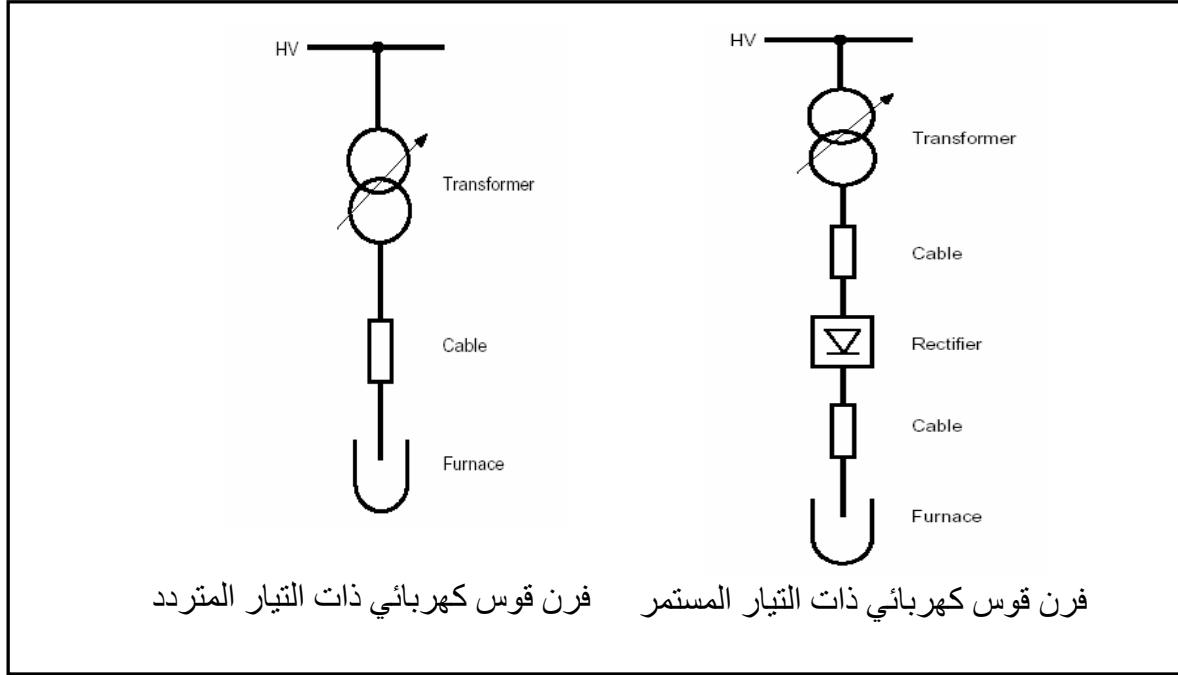
الطيف التوافقي يعتمد على نوع الفرن و مقننات القدرة له و مراحل التشغيل (صهر أو تنقية)، هذه المقاييس تكون مطلوبة لتحديد الطيف الدقيق للفرن .

#### ب- أفران القوس الكهربائي بالتيار المستمر :-

القوس الكهربائي في هذه الحالة يكون مجهز بمقوم و يكون أكثر استقرارا من أفران القوس الكهربائي بالتيار المتردد.

والطيف التوافقي للتيار المسحوب يمكن تقسيمه إلى :

- طيف مشابه لطيف المقوم المستخدم .
  - طيف مستمر قيمته أقل من قيمة الطيف التوافقي الناتج عن القوس الكهربائي ذات التيار المتردد.
- والشكل (1-5) يوضح مخطط مبسط لتركيب أفران القوس الكهربائي .



شكل (1-5) : أنواع الأفران بالقوس الكهربائي على حسب مصدر التغذية

### 2-4-1- المبدلات الكهربائية [4,7] : Electrical Converters

إن مصطلح مبدل يشير إلى الأداة الكهربائية القادرة على تبديل الطاقة الكهربائية من صورة إلى أخرى أي من الصورة المترددة إلى الصورة المستمرة أو العكس. هناك مبدلات ثلاثية الطور وأخرى أحادية الطور، ومنها الساكنة و الدوارة ، جميع هذه المبدلات تنتج تيار به مركبات توافقية وتختلف رتب هذه التوافقيات من مبدل لآخر ، حيث تعطى رتب التوافقيات المتولدة بالعلاقة التالية :

$$n = pk \pm 1 \dots\dots\dots(6-1)$$

حيث :-

k : عدد صحيح موجب اكبر من الصفر .

P : عدد نبضات التيار في الدورة الواحدة.

من العلاقة السابقة نجد أن التوافقية الثالثة تظهر مع المبدلات أحادية الطور فقط، ولا تظهر مع

المبدلات الثلاثية الطور.

والجدول (1-3) يوضح رتب التوافقيات المتولدة من بعض أنواع المبدلات الكهربائية.

جدول (3-1) : رتب التوافقيات المتولدة من عدة مبدلات مختلفة [4]

رتب التوافقيات	عدد النبضات	نوع المبدل
2,3,4,5,6,7....	1	مقوم نصف موجة
3,5,7,9....	2	مقوم موجة كاملة
5,7,11,13,17,19....	6	مقوم ثلاثي الطور لموجة كاملة
11,13,23,25,35,37....	12	مقوم ثلاثي الطور لموجة كاملة (2)

و ينتشر استعمال المبدلات بكثرة اليوم بسبب التطور الكبير الحادث في مجال صناعة الالكترونيات ، حيث تدخل المبدلات في صناعة الحواسيب الشخصية و كذلك في اغلب الأجهزة الالكترونية الأخرى ، كما تستخدم المبدلات في أنظمة (UPS<sub>s</sub>) للحماية من انقطاع الكهرباء، وفي التحكم في سرعة المحركات.

### 3-4-1 الآلات الكهرومغناطيسية [6] :- Electromagnetic Machines

الآلات الكهرومغناطيسية تعمل كحمل لا خطي و ذلك عند حدوث تشبع مغناطيسي داخلها ، حيث أن العلاقة بين الجهد و التيار تصبح غير خطية .  
ومن أمثلة هذه الآلات المحولات الكهربائية و الآلات الدوارة الحثية و المترامنة .

عند حدوث تشبع مغناطيسي بالآلة فهذا يعني أن الفيض المغناطيسي المتولد سوف يبدأ بالثبات وبالتالي فإن الجهد المتولد بملفات الآلة نتيجة الفيض المغناطيسي سوف يقترب من الثبات مع زيادة تيار الإثارة ، هذا التيار يأخذ شكل موجي يشبه حلقة التخلف المغناطيسي للآلة أي أنه غير جيبى و بالتالي فإنه يسبب في ظهور التوافقيات و قد تصل قيمته إلى 65% من قيمة التيار الأساسي للآلة .

إن أكثر المركبات التوافقية تأثيراً في هذه الحالة هي التي تحمل الرتب الثالثة والخامسة والسابعة، والمعادلة التالية هي مثال عملي يوضح النسبة المئوية للمركبات التوافقية المتكونة في تيار ثلاثي الطور لمحول كهربى ذو قلب حديدي.

$$I_{mmg} = I_{m1}\sin(\omega t - 78^\circ) - I_{m3}\sin(3\omega t - 83^\circ) + I_{m5}\sin(5\omega t - 81^\circ) - I_{m7}\sin(7\omega t - 80^\circ) \dots\dots\dots(7-1)$$

### 1-4-4 مصابيح الفلوريسنت [4,7] :- Fluorescent Lamps

يمكن أن تكون مصابيح الفلوريسنت مصدر للتوافقيات وذلك لأنها تعتبر من الأحمال اللاخطية الحثية، التوافقية الثالثة تكون أكبر المركبات التوافقية مقداراً حيث تصل قيمتها إلى 30% من قيمة المركبة الأساسية، والجدول (1-4) يوضح قيم متوسطة للتوافقيات الناتجة عن مصابيح الفلوريسنت .

جدول (1-4) : عينة لقيم مركبات توافقية ناتجة من مصباح فلوريسنت [4]

رتبة التوافقية	النسبة من المركبة الأساسية
2	4%
3	20%
4	1%
5	10%
6	1%
7	5%
9	6%

### 1-5 المشاكل الناتجة عن التوافقيات [8] :-

هناك عدة مشاكل تسببها توافقيات الجهد و التيار منها :

- 1- حدوث رنين بين المحاثات والمكثفات الموجودة بالشبكة مما يؤدي إلى مرور تيار عالي قد يسبب في عمل مرحلات و قواطع الحماية وفصل أجزاء من الشبكة دون وجود أي خطأ.
- 2- التقليل من كفاءة الأجهزة الكهربائية كالمحولات و الآلات الدوارة وذلك بسبب زيادة المفايد الحديدية لأنها تتناسب طردياً مع مربع التردد ، و زيادة المفايد النحاسية بسبب زيادة مقاومتها نتيجة لظاهرة القشرة التي تزداد بزيادة التردد ، هذه المفايد تخرج على هيئة طاقة حرارية و بالتالي تسبب في ارتفاع درجة حرارة الجهاز مما قد يؤدي إلى تلفه .
- 3- مرور تيار عالي في سلك التعادل بسبب التوافقيات ذات التتابع الصفري، لان المجموع الاتجاهي للتيارات ذات التتابع الصفري لايساوي صفر، ولكن يساوي ثلاث أضعاف تيار الطور الواحد، مما قد يؤدي إلى عمل مرحلات التسرب الأرضي وبالتالي فصل أجزاء من الشبكة.



- 4- نقصان مفاعلة المكثفات بزيادة التردد و بالتالي زيادة التيار المار بها مما قد يؤدي إلى تلفها.
- 5- حدوث اهتزازات و ضوضاء حيث أن التيار الذي به توافقيات يؤدي إلى إنتاج قوى ديناميكية تسبب في ضوضاء سمعية و اهتزازات ، و خصوصا في الأجهزة الكهرومغناطيسية كالمحولات و المفاعلات، كما تسبب توافقيات التيار في إنتاج عزم ميكانيكي نبضي والذي يسبب في اهتزازات بالآلات الدوارة .
- 6- توافقيات التيار ذات التتابع السالب تؤثر على عمل المولدات و المحركات لأنها تولد فيض مغناطيسي يدور في اتجاه معاكس للحركة، مما يسبب في زيادة سرعة المولدات و نقصان سرعة المحركات.
- 7- التوافقيات التحتية التي في مدى (1Hz – 30Hz) تؤثر على الإضاءة بمصابيح التفرغ الغازي حيث تسبب في ما يسمى (رجفة الضوء) أو (Light Flicker)، وهذا يكون أكثر وضوحاً عند تردد 8.8Hz ، لأن عين الإنسان تكون حساسة جداً عند هذا التردد.
- 8- معامل قدرة منخفض بسبب فشل مكثفات تصحيح معامل القدرة .
- 9- تعطيل في عمل نظم التحكم و أجهزة القياس و المرحلات التي تعتمد في عملها على التردد الأساسي.
- 10- ارتفاع درجة حرارة الموصلات بسبب ظاهرة القشرة التي تسبب في زيادة المقاومة للموصلات.
- 11- زيادة محاثة خطوط النقل وبالتالي تقليل مقدار أقصى قدرة التي يستطيع الخط نقلها، مما يؤثر سلباً على استقرارية الشبكة.
- 12- تعطيل الأجهزة التي تعمل مع المعالج الدقيق.
- 13- تشويه في موجات نظم التحكم.
- 14- حدوث تداخل في الاتصالات والحاسبات.

الفصل الثاني  
تحليل وحساب التوافقيات

## 2-1 مقدمة :-

بعد التعرف على كيفية ظهور التوافقيات يجب معرفة طرق تحليلها وذلك للتعرف على خصائصها من حيث التردد والمقدار ، فهناك طريقة رياضية مهمة تستخدم لهذا الغرض وهي متسلسلة فوريير حيث عن طريقها يمكن تحليل الموجة الدورية الغير جيبية إلى عدة موجات دورية جيبية ، الموجة الجيبية التي لها نفس تردد الموجة الأصلية تسمى المركبة الأساسية أما باقي الموجات الجيبية فتسمى بالتوافقيات.

يقصد من تحليل التوافقيات هو إيجاد مقدار و تردد كل توافقية وتمثيل ذلك بيانيا برسم يسمى الطيف الخطي، وكذلك إيجاد نسبة كل توافقية بالنسبة للمركبة الأساسية، وإيجاد التشوه الكلي الذي تسببه التوافقيات.

## 2-2 متسلسلة فوريير الجيبية [3] :- Sinusoidal Fourier Series

وهي من أهم الطرق المستخدمة لإيجاد تردد و مقدار توافقيات الجهد و التيار بالشبكة . وهي تنص علي: " إن أي إشارة دورية  $f(\omega t)$  يمكن تحليلها إلى عدد غير متناه من الحدود الجيبية والجيب تمامية التي ترتبط مع بعضها توافقيا" . و يشترط في الدالة لكي يمكن تطبيق نظرية فوريير عليها أن تفي بالموصفات الآتية:

- 1- تكون الدالة ذات قيمة واحدة فقط عند أي نقطة من الفترة الزمنية على امتداد دورة واحدة.
- 2- يجب أن تحتوي الدالة على عدد محدود من نقاط القطع خلال الدورة الواحدة.
- 3- يجب أن تحتوي الدالة على عدد محدود من نقاط النهايات العظمى و الصغرى ضمن الدورة الواحدة.

4- أن تكون قيمة تكامل الدالة محدود خلال دورة واحدة .

وتسمى هذه الشروط بشروط درشلت (Dirichlet Conditions) .

وتعطي متسلسلة فوريير الجيبية للدالة الحقيقية  $f(\omega t)$  والتي تمثل دالة دورية بزم من دوري  $T_0$  لها عدد لانتهائي من الدوال الجيبية كالتالي :

$$f(\omega t) = a_0 + a_1 \cos \omega t + b_1 \sin \omega t + a_2 \cos 2\omega t + b_2 \sin 2\omega t + a_3 \cos 3\omega t + b_3 \sin 3\omega t + \dots \quad (1-2)$$

حيث يمكن وضع المعادلة السابقة في صورة مفكوك كالآتي :

$$f(\omega t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n \omega t + b_n \sin n \omega t) \quad \dots \dots \dots (2-2)$$

حيث أن :

$$\omega = 2\pi/T \quad (\text{التردد الأساسي للدالة})$$

(  $a_0$  ,  $a_n$  ,  $b_n$  ) هي ثوابت تعتمد على قيمة كلا من  $f(\omega t)$  ,  $n$  . وتسمى معاملات فوريير، وتعطى

بالعلاقات التالية :

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d\omega t \quad \dots\dots\dots(3-2)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos n \omega t d\omega t \quad \dots\dots\dots(4-2)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin n \omega t d\omega t \quad \dots\dots\dots(5-2)$$

كما يمكن كتابة المعادلة (2-2) بالصيغة التالية :

$$f(\omega t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad \dots\dots\dots(6-2)$$

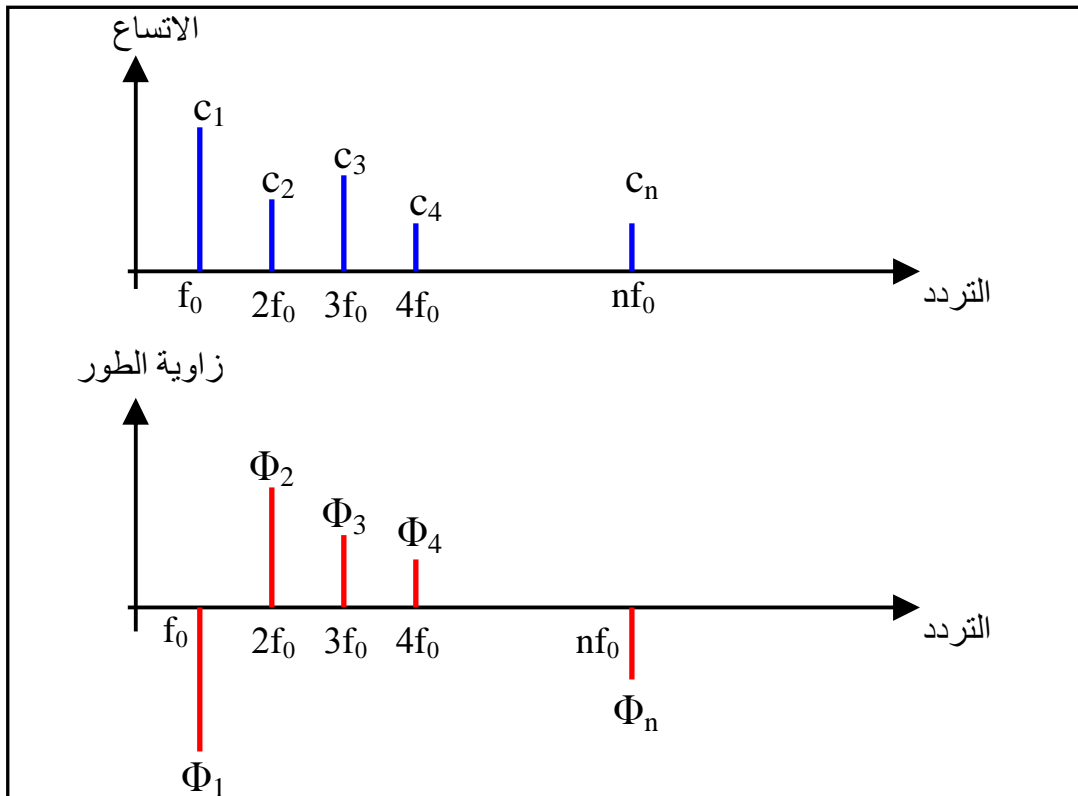
حيث أن  $c_0, c_n, \varphi_n$  ترتبط بالمعاملات  $a_0, a_n, b_n$  كما يلي :

$$c_0 = a_0 \quad \dots\dots\dots(7-2)$$

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \dots\dots\dots(8-2)$$

$$\varphi_n = \tan^{-1} \frac{a_n}{b_n} \quad \dots\dots\dots(9-2)$$

وتسمى المعاملات  $c_n$  بالاتساع الطيفي أي أنها هي اتساع الخط الطيفي عند التردد  $(nf_0)$  , كما أن  $\varphi_n$  هي زاوية الطور للخط الطيفي ، و بمعنى آخر فان تمثيل الإشارة بمتسلسلة فورير الجيبية هو تمثيلها بعدد من الخطوط الطيفية المفردة الاتجاه ذو اتساعات تساوي قيمة المعاملات  $(c_n)$  و زوايا الطور تساوي  $(\varphi_n)$  كما هو موضح بالشكل (1-2).



شكل (1-2) : الطيف الخطي المفرد لمتسلسلة فورير الجيبية

يمكن تبسيط تحويل فوريير للدوال باستخدام بعض الخواص للدوال الدورية ، والجدول (1-2) يوضح قيم معاملات فوريير  $a_0, a_n, b_n$  لحالات مختلفة من التناظر .

جدول (1-2) : ملخص شروط التناظر للموجات الدورية [3]

معاملات فوريير			الخاصية	الشرط	نوع التناظر
$b_n$	$a_n$	$a_0$			
0	$\frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(\omega t) \cos n \omega t d \omega t$	$\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} f(\omega t) d \omega t$	مركبات جيب الأمام فقط	$f(\omega t) = f(-\omega t)$	زوجي
$\frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(\omega t) \sin n \omega t d \omega t$	0	0	مركبات الجيب فقط	$f(\omega t) = -f(-\omega t)$	فردى
$\frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(\omega t) \sin n \omega t d \omega t$	$\frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(\omega t) \cos n \omega t d \omega t$	0	المركبات العرديّة فقط	$f(\omega t) = -f(\omega t \pm \pi)$	نصف موجي

### 2-3 الطريقة العددية لحساب معاملات فوريير [3]:-

يمكن تقريب قيمة معاملات فوريير عددياً باستخدام إحدى لغات الحاسوب وهذه الطريقة تصبح مفيدة خاصة عندما يكون صيغة الإشارة  $f(t)$  غير معروفة رياضياً أو أنها معروفة كبيانات أو معطيات عددية عند نقط معينة أو عند صعوبة إجراء التكامل .

بفرض أن  $f(t)$  متوفرة لدينا أو معروفة من خلال  $M$  من نقاط البيانات عند مسافات متساوية خلال الفترة الزمنية  $(T : 0)$  و بالتالي فان معاملات فوريير سوف تعطى بالعلاقات التالية :

$$a_0 = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M f_m \quad \dots\dots\dots(10-2)$$

$$a_n = \frac{2}{M} \sum_{m=1}^M f_m \cos\left(\frac{2\pi n}{M} \times m\right) \quad \dots\dots\dots(11-2)$$

$$b_n = \frac{2}{M} \sum_{m=1}^M f_m \sin\left(\frac{2\pi n}{M} \times m\right) \quad \dots\dots\dots(12-2)$$

حيث أن :

$f_m$  : قيمة الدالة  $f(t)$  عند النقطة  $m$  .

$M$  : عدد نقاط البيانات خلال دورة واحدة.

**4-2 معامل التشوه الكلي [7] :- Total Harmonic Distortion (THD)**

تعتمد طرق قياس التوافقيات بشكل كبير على الغرض المطلوب من إجراء عمليات القياس، ولكي تكون عملية القياس أكثر فاعلية يجب أخذ العينات الأكثر أهمية ، ويجب أن تتميز المقاييس بالسرعة و سهولة الاستعمال لضمان أخذ القياسات في فترات منتظمة و متكررة . ومن هذه المقاييس معامل التشوه الكلي (THD) والذي يبين مدى انطباق الشكل المقاس مع مركبة الموجة الأساسية والذي يعطى نظريا بالمعادلة الآتية :-

$$\% \text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} C_n^2}}{C_1} \times 100 \% \quad \dots\dots\dots(13-2)$$

حيث :

$C_n$  : اتساع الموجة لرتبة n من التوافقيات.

$C_1$  : اتساع الموجة الأساسية.

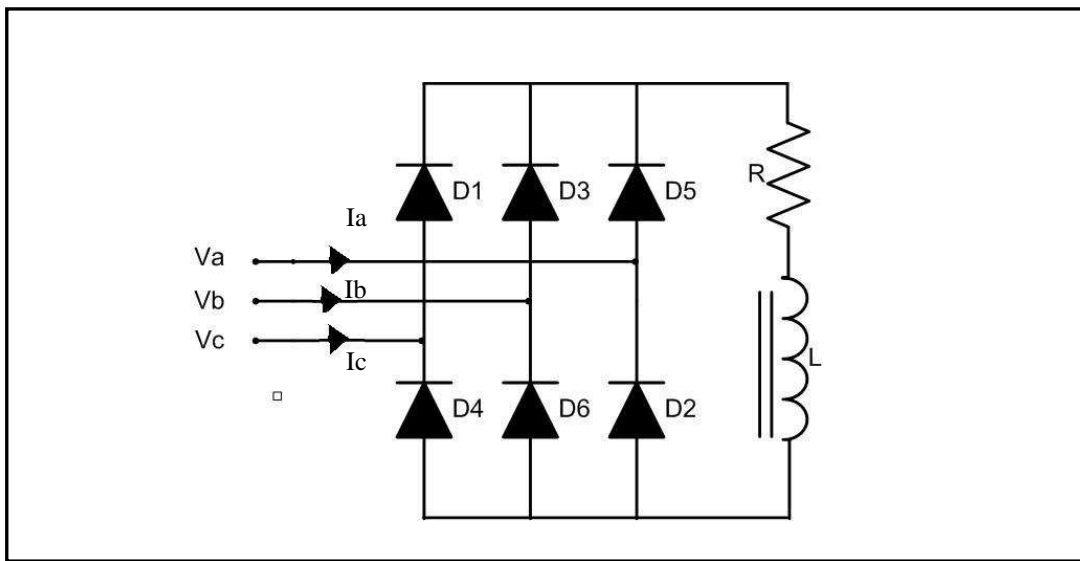
**5-2 معامل التوافقيات [7] :- Harmonics Factor (D<sub>n</sub>)**

ومن هذه المقاييس أيضا معامل التوافقيات ( $D_n$ ) والذي يعبر عن نسبة التوافقية من الرتبة n بالنسبة للمركبة الأساسية و يعطى نظريا بالمعادلة الآتية :-

$$\% D_n = \frac{|C_n|}{|C_1|} \times 100 \% \quad \dots\dots\dots(14-2)$$

**6-2 مثال على حساب معامل التوافقيات ومعامل التشوه الكلي :-**

وكمثال عملي لحساب THD ,  $D_n$  للتيار المسحوب من الطور a في الدائرة الموضحة بالشكل (2-2) .



شكل (2-2) : قنطرة مقوم موجة كاملة غير محكوم ثلاثي الطور

وهي عبارة عن قنطرة مقوم موجة كاملة غير محكوم ثلاثي الطور متصلة بحمل عبارة عن مقاومة مع محاطة على التوالي بحيث أن قيمة المحاطة كبيرة كفاية لجعل تيار الحمل ذو قيمة ثابتة  $(I_{da})$ ، وبفرض أن الجهود الثلاثية الطور متزنة وتعطى بالعلاقات التالية :

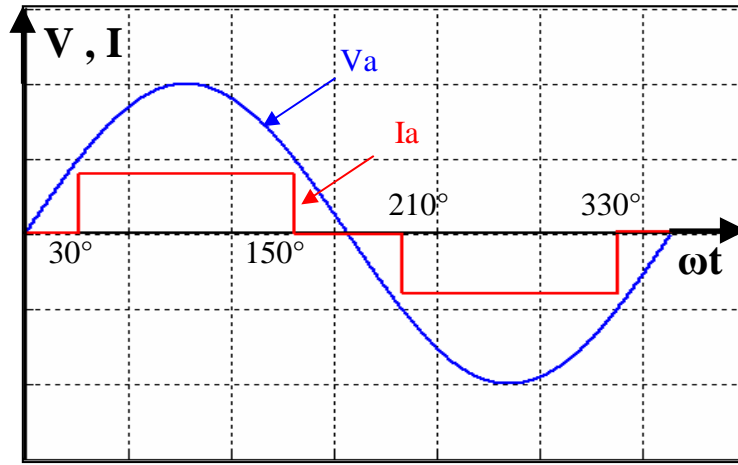
$$V_a = 310 \sin(\omega t)$$

$$V_b = 310 \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$V_c = 310 \sin(\omega t + 120^\circ)$$

وان قيمة المقاومة  $R=100\Omega$ ، وبالتالي فإن التيار المار في الطور a سوف يكون كما بالشكل (3-2) ، حيث أن قيمة  $I_{da}$  تعطى بالعلاقة التالية :

$$I_{da} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi R} V_m$$



شكل (3-2) : الشكل الموجي لجهود و تيار الطور (a)

من الشكل السابق نلاحظ أن الشكل الموجي للتيار ذات تناظر فردي ونصف موجي ، و بالتالي فإنه حسب اعتبارات التناظر نجد أن :-

$$a_0 = 0$$

$$a_n = 0$$

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_{30^\circ}^{150^\circ} I_{da} \sin n \omega t d \omega t \quad \text{حيث أن } n \text{ عدد فردي.}$$

$$b_n = \frac{18 \times V_m}{\pi^2 \times R \times n} \quad \text{at } n=1,11,13,23,35\dots$$

$$b_n = \frac{-18 \times V_m}{\pi^2 \times R \times n} \quad \text{at } n=5,7,17,19,29\dots$$

$$b_n = 0 \quad \text{at} \quad n=3,9,15,21,27\dots$$

و بالتعويض بقيم  $R, V_m$  نجد أن :

$$c_n = 0 \leftarrow \text{عندما } n \text{ عدد زوجي}$$

$$c_n = 0 \leftarrow n=3,9,15,21 \dots \text{عندما}$$

$$c_n = \frac{558}{\pi^2 \times 10 \times n} \quad \& \quad \varphi_n = 90^\circ \leftarrow n=5,7,17,19 \dots \text{عندما}$$

$$c_n = \frac{558}{\pi^2 \times 10 \times n} \quad \& \quad \varphi_n = -90^\circ \leftarrow n=1,11,13,23 \dots \text{عندما}$$

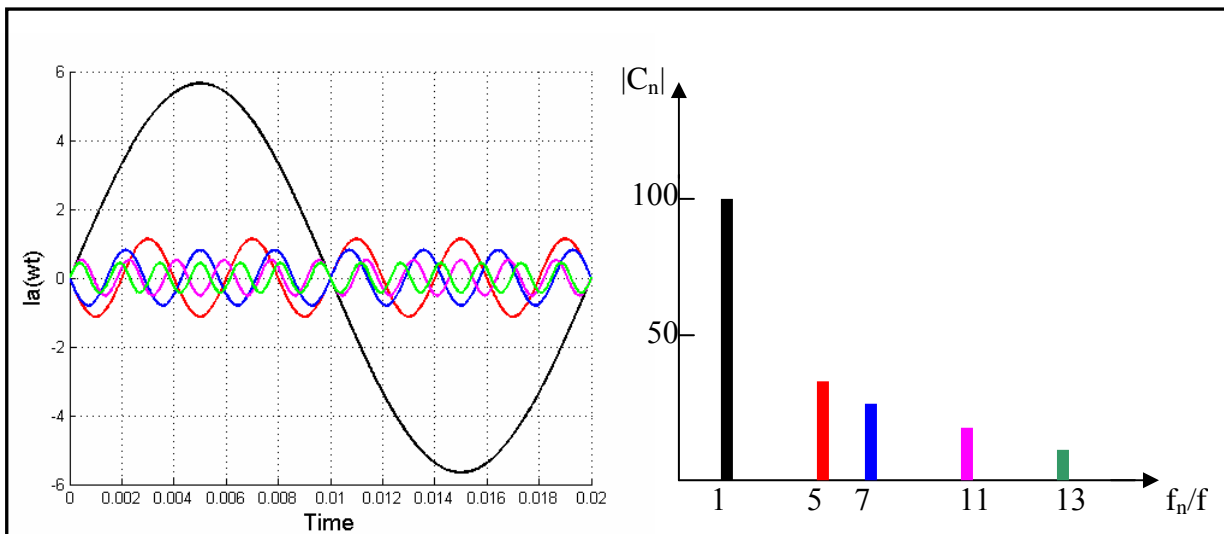
وتكون متسلسلة فوريير الجيبية لموجة التيار  $I_a, I_b, I_c$  كالتالي :

$$I_a(\omega t) = 5.654 \cos(\omega t - 90^\circ) + 1.1307 \cos(5\omega t + 90^\circ) + 0.8077 \cos(7\omega t + 90^\circ) \\ + 0.514 \cos(11\omega t - 90^\circ) + 0.435 \cos(13\omega t - 90^\circ) + \dots$$

$$I_b(\omega t) = 5.654 \cos(\omega t - 210^\circ) + 1.1307 \cos(5\omega t + 210^\circ) + 0.8077 \cos(7\omega t - 30^\circ) \\ + 0.514 \cos(11\omega t + 30^\circ) + 0.435 \cos(13\omega t - 210^\circ) + \dots$$

$$I_c(\omega t) = 5.654 \cos(\omega t + 30^\circ) + 1.1307 \cos(5\omega t - 30^\circ) + 0.8077 \cos(7\omega t + 210^\circ) \\ + 0.514 \cos(11\omega t - 210^\circ) + 0.435 \cos(13\omega t + 30^\circ) + \dots$$

والشكل (4-2) يوضح الطيف و الشكل الموجي للتوافقيات في التيار  $I_a$ .



شكل (4-2): الطيف و الشكل الموجي للتوافقيات في التيار  $I_a$



وبعد إيجاد متسلسلة فوريير نوجد THD ،  $D_n$  كالتالي :

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{(c_5^2 + c_7^2 + c_{11}^2 + c_{13}^2 + \dots)}}{c_1} \times 100 \% \\ = 27.31\%$$

$$D_5 = \frac{|c_5|}{|c_1|} \times 100\% = 20\%$$

$$D_7 = \frac{|c_7|}{|c_1|} \times 100\% = 14.3\%$$

$$D_{11} = \frac{|c_{11}|}{|c_1|} \times 100\% = 9.1\%$$

$$D_{13} = \frac{|c_{13}|}{|c_1|} \times 100\% = 7.7\%$$

## 7-2 أجهزة قياس التوافقيات [9] :- Harmonics Measuring Devices

للحصول على المعاملات السابقة يجب أولاً إيجاد متسلسلة فوريير الجيبية للموجة المقاسة، و توجد بعض أجهزة القياس المتطورة التي يمكن أن تعمل على تحليل الموجة الداخلة و رسمها على شاشة الجهاز المستخدم في قياس التوافقيات مع النطاق الترددي وتعطي كافة المعلومات عن أي توافقية مكونة لهذه الموجة ، و من هذه الأجهزة :

### 1-7-2 المحلل الرئيسي [9] . Main Analyzer

إن الأجهزة المتوفرة لقياس التوافقيات تعطي قراءات متصلة، وهذه الأجهزة تدمج قراءة الفولتميتر والسيطرة الآلية لتردد الدائرة المطلوب قياس إشارتها ، و تعطي تأثير كل توافقية لهذه الإشارة كنسبة مئوية منسوبة للأساس.

### 2-7-2 المحلل الرئيسي الآلي [9]. Automatic Main Analyzer

هذا الجهاز يقيس كل توافقية لفترات زمنية قدرها 5 أو 10 أو 20 ثانية، و الجهاز يستطيع القياس ابتداءً من التوافقية الثانية إلى التوافقية الرابعة و الستين ، و ذلك حسب مجموع التوافقيات المختارة، حيث

يمكن قياس التوافقيات بشكل مستمر أو على فترات منقطعة . كما يحتوي الجهاز على طابعة أو على ثاقب شريط ورقي ، ويمكن عن طريقهما استخراج المعلومات المطلوبة من عملية القياس.

يقوم الجهاز بإعطاء التوافقية الأساسية و التوافقيات الأخرى كنسبة مئوية للأساس، فعند إدخال أي شكل موجي يتم تعميمه بواسطة قنطرة وين أولاً، و التي تعمل على الموازنة بين التوافقيات و الموجة الأساسية، حيث تغادر التوافقيات فقط من الذراع الكاشف للقنطرة. تطرح التوافقيات من الإشارة الأساسية المدخلة التي تم تصحيحها أو تعميمها، و تقارن بجهد قياسي مباشرة .

الإشارة المدخلة يتم تحليلها تماثلها على حسب مبدأ نظرية فورير، وكل توافقية تعطى كنسبة مئوية بالنسبة للأساس. و لقياس زاوية الطور ( $\phi$ ) تولد إشارة بزمن دوري والتي تمثل تردد الأساس ثم تقارن مع ترددات التوافقية الأخرى، وأي زيادة في التردد عن التردد الأساسي يتم قياس زاوية الطور بالجهاز، وبالتالي تكون كل زاوية طور في التوافقيات قد قيست بشكل مباشر. ويتميز هذا الجهاز بالميزات الآتية :-

- يقوم بعزل التوافقيات عن بعضها حتى لا يحدث تداخل .
- يتميز بحساسية عالية لتغيرات الإشارة الداخلة .
- رخيص الثمن و ذو دقة عالية .
- خفيف الوزن، بحيث يسهل قياس التوافقيات في أي موقع.

### 3-7-2 المحللات المعتمدة على المبدأ الرقمي [9] . Digital Methods

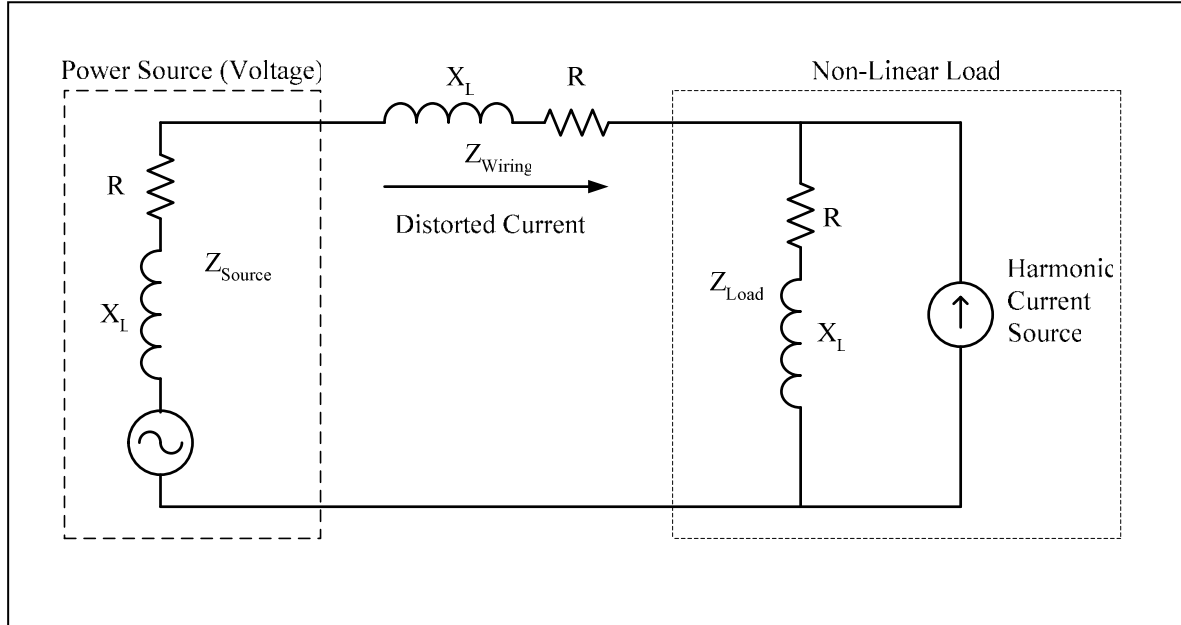
و من ابرز هذه الأجهزة هو المسجل الرقمي ، حيث يعمل هذا الجهاز على تسجيل و إعطاء الشكل الموجي على شريط مغناطيسي ليتم تخزينه و تحليله فيما بعد . و يتم تحليل البيانات المأخوذة عن طريق نظرية فورير باستخدام الحاسوب، و تكون هذه الأجهزة جيدة الاستعمال في حالة الشكل الموجي الثابت لفترات طويلة .

### 4-7-2 القياس عن طريق جهة التدفق [9] . Direction Of Flow

عند تتبع مصادر التوافقيات، من الممكن أن يفيد ذلك في التعرف على جهة تدفق القدرة ، ويتم ذلك بتعديل جهاز الواطميتر وضبطه على الصفر، ثم توصيله مع دوائر التيار أو الجهد المراد قياسها. ويتم أخذ قراءة الترددات المتولدة و مقارنتها مع المراجع و الوثائق، و بالتالي يمكن التعرف منها على جهة تدفق توافقيات القدرة.

### 8-2 نموذج للحساب [4] -: Calculation Model

يمكن تمثيل الحمل الذي ينتج التوافقيات في نظم القوي بمعاوقة مع مصدر تيار على التوازي ، حيث تمثل المعاوقة التي على التوازي قيمة الحمل اللاخطي باللاوم ، أما مصدر التيار فيمثل مصدر لتوافقيات التيار ، والشكل (4-2) يوضح دائرة أحادية الطور بها حمل لاخطي تم اخذ نموذج له .



شكل (5-2): نموذج لحمل لاخطي

الفصل الثالث  
أفران القوس الكهربائي

**3-1 مقدمة :-**

تستعمل أفران القوس الكهربائي في صهر الصلب و بعض المعادن الأخرى، وهي تمتاز عن أفران الصهر الأخرى بأن الشحنة(المادة المراد صهرها) تستقبل الحرارة ليس بالإشعاع فقط، ولكن هناك حرارة تتولد أيضا من سريان التيار خلال مقاومة الشحنة ولهذا نحصل على درجة حرارة عالية تصل إلى  $3500^{\circ}\text{C}$  ، و كذلك تمتاز هذه الأفران بخاصية الخلط و التقليب الذاتي في الشحنة بسبب الحث الكهرومغناطيسي بين أجزاء الشحنة.

**3-2 نظرية عمل أفران القوس الكهربائي :-**

عند زيادة فرق الجهد بين الكترودين (قطبين) منفصلين عن بعضهما بثغرة هوائية ، يبدأ الهواء في التأين ومع زيادة فرق الجهد بين الالكترودين يزداد الهواء في التأين إلى أن تحدث شرارة كهربائية بينهما ، هناك يكون الهواء العازل أصبح موصلًا، شدة المجال الكهربائي اللازمة لانهيـار الهـواء كعازل هي  $30\text{ kv/cm}$  ، ولكن لإبقاء القوس يمكن الاكتفاء بجهد صغير.

درجة حرارة القوس تصل ما بين  $3500-4000\text{ }^{\circ}\text{C}$  ، وتنتقل الحرارة إلى الشحنة المراد صهرها إما بالحمل أو بالإشعاع .

وهناك طريقتان لإشعال القوس الكهربائي هما :

**3-2-1 الإشعال بالجهد العالي :-**

وفيها تكون المسافة بين الالكترودين ثابتة ويرفع الجهد تدريجيا من ناحية الجهد المنخفض فيزداد الجهد العالي حتى يحدث الانهيار في الهواء و يشتعل القوس مما يجعل فرق الجهد بين الالكترودين صغيراً لأن مقاومة القوس صغيرة و للحفاظ على التيار يتم إنقاص الجهد إلى القيم الكافية لاستمرار إشعال القوس.

**3-2-2 الإشعال بالجهد المنخفض :-**

في البداية يتلامس الالكترودان ثم يتم فصلهما لحظياً ، فتكون المسافة بينهما صغيرة جدا وكافية لإشعال القوس ، و عند استمرار الانفصال يمتد القوس مع الالكترودين ، وهذه الطريقة هي الأكثر انتشاراً.

**3-3 أنواع أفران القوس الكهربائي :-**

يمكن تقسيم أفران القوس الكهربائي حسب نظرية عملها إلى :

**أ- أفران القوس الكهربائي المباشر :-**

وفيها ينشأ القوس بين الالكترودات و الشحنة ، و يمكن الحصول على درجات حرارة مرتفعة بهذه الطريقة ، لذلك هي من الطرق المنتشرة في صناعة الحديد و الصلب وفي عمليات التنقية و عمل السبائك ، وهذه الأفران تمتاز بخاصية التقليب الذاتي ، وفي الأفران الكبيرة تستخدم آلية ميكانيكية للتقليب لضمان جودة المنتج.

**ب- أفران القوس الكهربائي غير المباشر:-**

وفيها ينشأ القوس بين الكترودين في منتصف الفرن وتنقل الحرارة للشحنة بالحمل أو الإشعاع ، وتنتشر هذه الأفران في صهر المواد غير الحديدية مثل النحاس و البرونز و النيكل ، ولا توجد بها خاصية الانقلاب الذاتي لذلك يجب توفير آلية ميكانيكية لهذا الغرض .

أما حسب نوعية التغذية بالتيار الكهربائي يمكن تقسيم أفران القوس الكهربائي إلى :-

**أ- أفران القوس الكهربائي ذات التيار المتردد :-**

وفيها يتغذى الفرن من مصدر قدرة متردد، وغالبا يكون التردد هو نفس تردد الشبكة 50HZ،

وهي تتميز عن أفران القوس الكهربائي بالتيار المستمر في بساطة التركيب و قلة التكلفة العامة.

**ب- أفران القوس الكهربائي ذات التيار المستمر:-**

يكون الفرن في هذه الحالة مجهز بدائرة تقويم موجي كامل وذلك لتحويل الجهد المتردد إلى مستمر، وهي تمتاز بان القوس الكهربائي يكون أكثر استقراراً من أفران القوس الكهربائي ذات التيار المتردد، وكذلك الكفاءة العالية لها ، وسهولة التحكم في درجة الحرارة، ولكن من عيوبها هو ارتفاع تكلفتها وضرورة الصيانة المستمرة لها.

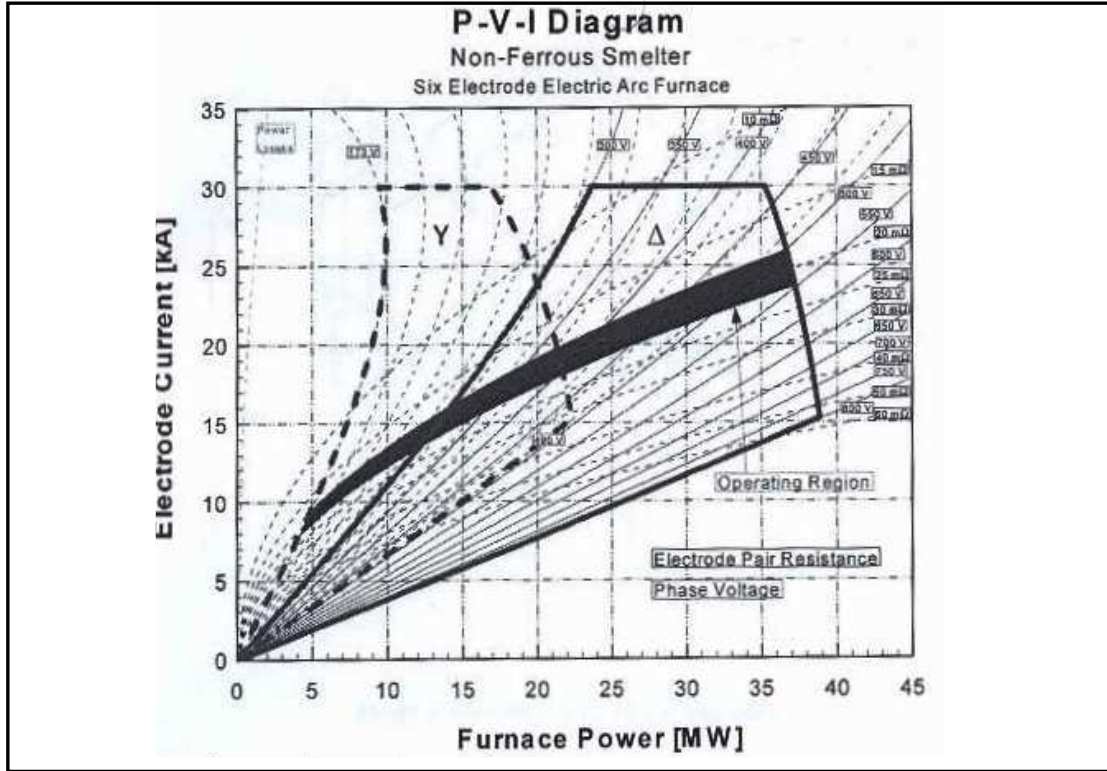
**3-4 تغذية الأفران بالطاقة الكهربائية [1] :-**

تتغذى الأفران الكهربائية بالطاقة الكهربائية من مصدر ثلاثي الطور منخفض الجهد وعالي التيار

وهذا يرجع للأسباب التالية :-

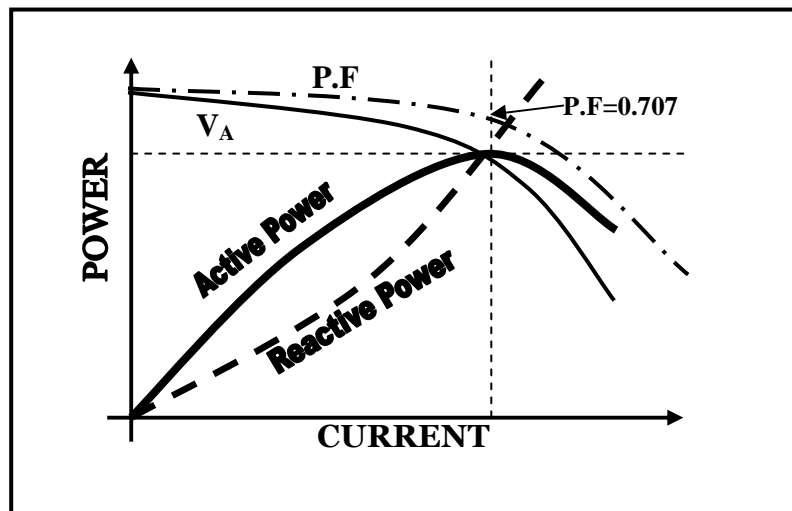
- التأثير الحراري يتناسب مع مربع التيار ولذلك نحتاج إلى تيارات عالية.
- الجهد العالي بين الالكترود و الشحنة يؤدي إلى إنتاج شدة مجال كهربائي عالي بينهما قد يؤدي إلى تأين جو الفرن و يمتص من خلال الشحنة.
- التيارات العالية و الجهود المنخفضة تحفظ الالكترودات قريبة جدا من الشحنة ، ويكون القوس صغير الطول ، وهكذا يكون القوس بعيد عن السقف ، ولذلك يزداد عمر السقف الغير قابل للانصهار .

ونحصل على الجهد المنخفض و التيار العالي باستخدام محول خافض للجهد ذو مواصفات خاصة، قادر على تحمل الاجهادات الميكانيكية العالية ، والملف الثانوي للمحول يصمم لتحمل تيارات القصر التي قد تصل إلى 60kA عند بداية إشعال القوس، وهذا المحول إما أن يكون ثلاثي الطور أو ثلاثة محولات أحادية الطور. والشكل (3-1) يوضح العلاقة بين القدرة المستهلكة في فرن ذو ستة الكترودات و التيار المار لكل طور وذلك عند جهود مختلفة ، وعند توصيل الملف الابتدائي للفرن دلتا و نجمة، حيث نلاحظ أن القيمة الفعالة للتيار تتراوح ما بين 10-25 KA وذلك بسبب التغير في طول القوس الكهربائي مما يسبب في عدم استقرار نقطة التشغيل عند وضع معين ، بل تكون متغيرة داخل النطاق الموضح باللون الأسود .



شكل (1-3): مخطط P.V.I لفرن قوس كهربائي ذو ستة الكترودات

والشكل (2-3) يوضح العلاقة بين التيار المار خلال القوس وبين كلا من مقدار القدرة الفعالة وغير الفعالة والجهود على القوس ومعامل القدرة، حيث يلاحظ أنه بزيادة التيار المار خلال القوس تزداد القدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة حتى يصبح معامل القدرة  $0.707$  عندها تتساوى القدرة الفعالة مع القدرة غير الفعالة وبعد هذه النقطة تقل القدرة الفعالة بينما تستمر القدرة غير الفعالة في الزيادة، أي أنه نحصل على أقصى قدرة فعالة عندما تتساوى مقاومة القوس مع المفاعلة الحثية للفرن. كما يلاحظ أنه بزيادة التيار المار خلال القوس يقل الجهد عليه ويقل معامل القدرة ويقل طول القوس.



شكل (2-3): منحنيات القدرة النموذجية لفرن القوس الكهربائي

### 3-5 الأجهزة والمعدات الكهربائية المستخدمة مع أفران القوس الكهربائي :-

تستخدم مع أفران القوس الكهربائي الأجهزة الكهربائية التالية :-

#### 3-5-1 محول بعدد لفات متغيرة :-

الجهد المطلوب لاستمرار القوس الكهربائي يتراوح ما بين 50-200 فولت حيث يعمل المحول على خفض الجهد إلى القيم المطلوبة بعد تكون القوس، ويصمم لعدد من الخطوات اللف المتغيرة تتراوح ما بين 6-12، ووظيفتها تنظيم القدرة المستهلكة في القوس لأنه كلما دخلنا في عملية الصهر كلما قلت القدرة المطلوبة، وعند الوصول إلى الصهر التام تكون القدرة الكهربائية المطلوبة قليلة ومساوية للمفايد فقط.

#### 3-5-2 محاثات على التوالي :-

وهذه المحاثات مطلوبة لاستقرار القوس ، ولها الفوائد التالية :

- تساعد على توليد جهد عالي لإشعال القوس، وعند إشعاله يقل الجهد على القوس بسبب ازدياد فرق الجهد على المحاثات.
- تحد من التغير المفاجئ في تيار القوس، فإذا كان التيار في اتجاه الزيادة يزداد فرق الجهد عليها أكثر مما يقلل فرق الجهد على القوس، ويحدث العكس مع نقصان التيار.

ومن الأنظمة المستخدمة لهذا الغرض هو نظام (SPLC) Smart Predictive Line Controller وفيه يتم استخدام الثايرستور لتوصيل وفصل المحاثات، كما تستخدم محاثات ذات قيم صغيرة على التوالي مع الثايرستور وذلك لحمايته من التيارات العالية.

#### 3-5-3 منظم تلقائي للتيار :-

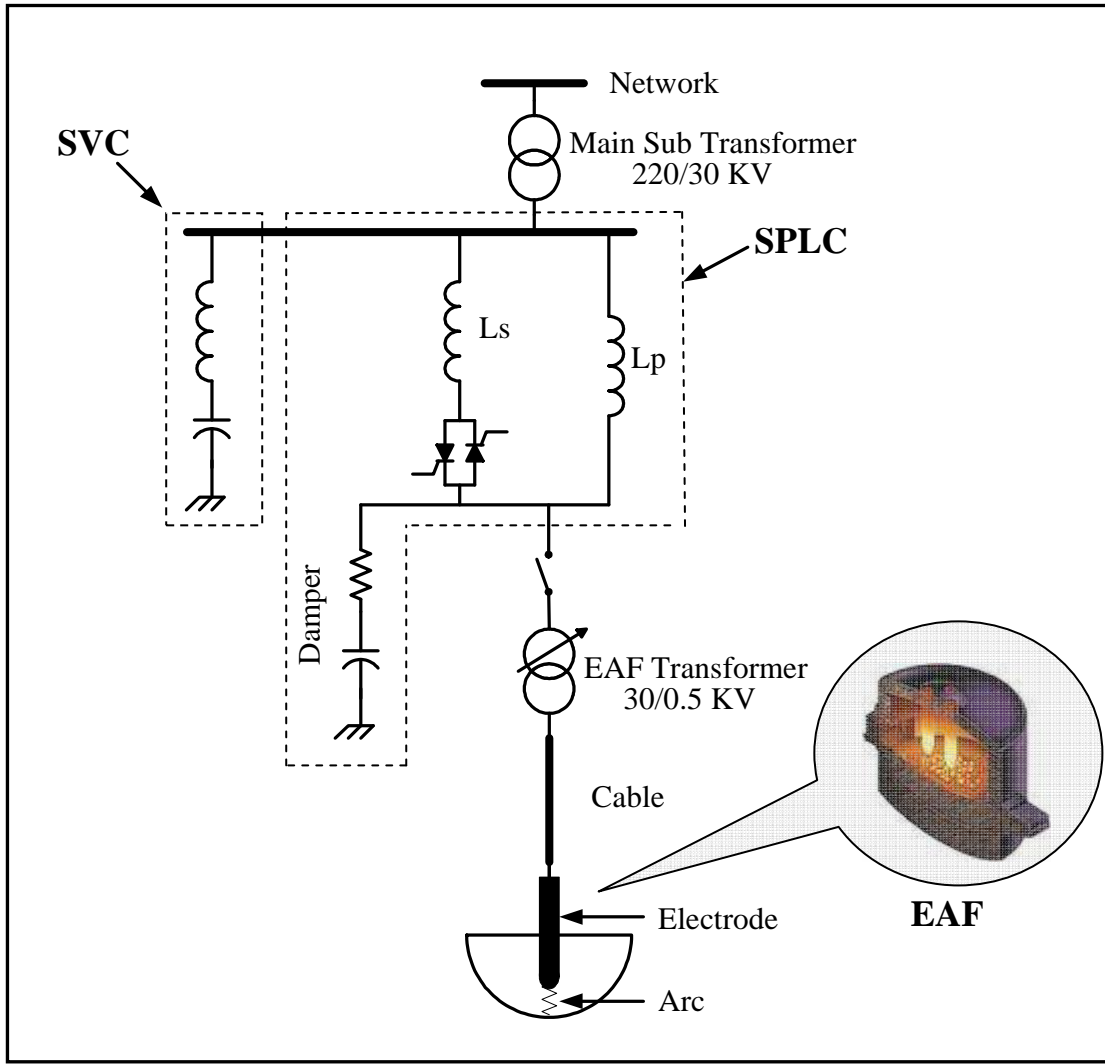
ووظيفته التحكم في المسافة بين الألكترودين عن طريق المحرك المتصل مع احدهما، وذلك للتحكم في تيار القوس، فمع التقدم في عملية الصهر يجب تقليل التيار، لان الطاقة الحرارية المطلوبة تكون أقل، وعند الوصول إلى حالة الصهر التام يجب تثبيت قيمة التيار.

#### 3-5-4 محركي الألكترود وميل الفرن.

#### 3-5-5 قاطع الدائرة:-

يستخدم قاطع دائرة هوائي أو زيتي للحماية من أي أخطاء، وكذلك للفصل والتوصيل. والشكل (3-3) يوضح تركيب فرن القوس الكهربائي والأجهزة المكمل له.

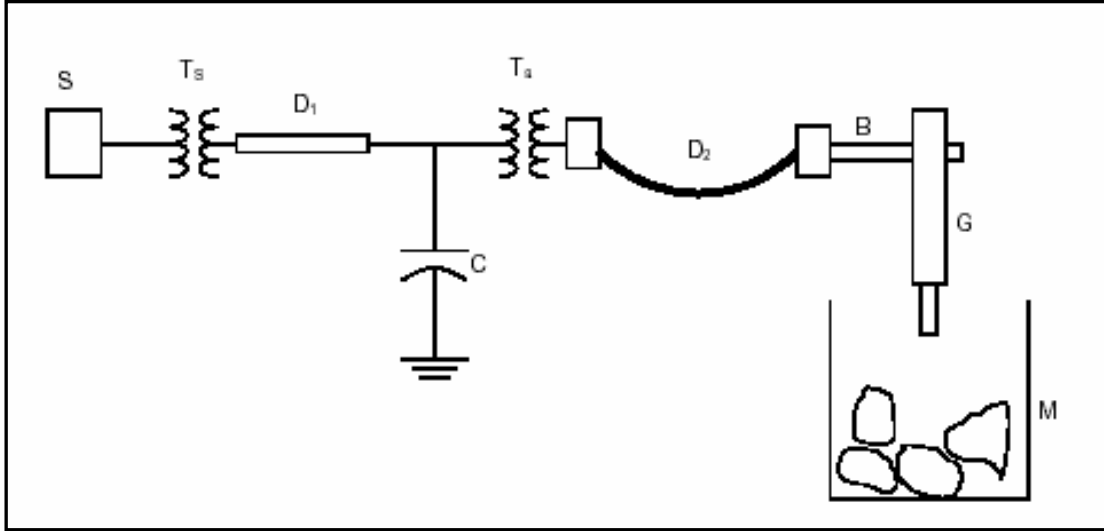




شكل (3-3): مخطط يبين التركيب الأساسي لأفران القوس الكهربائي

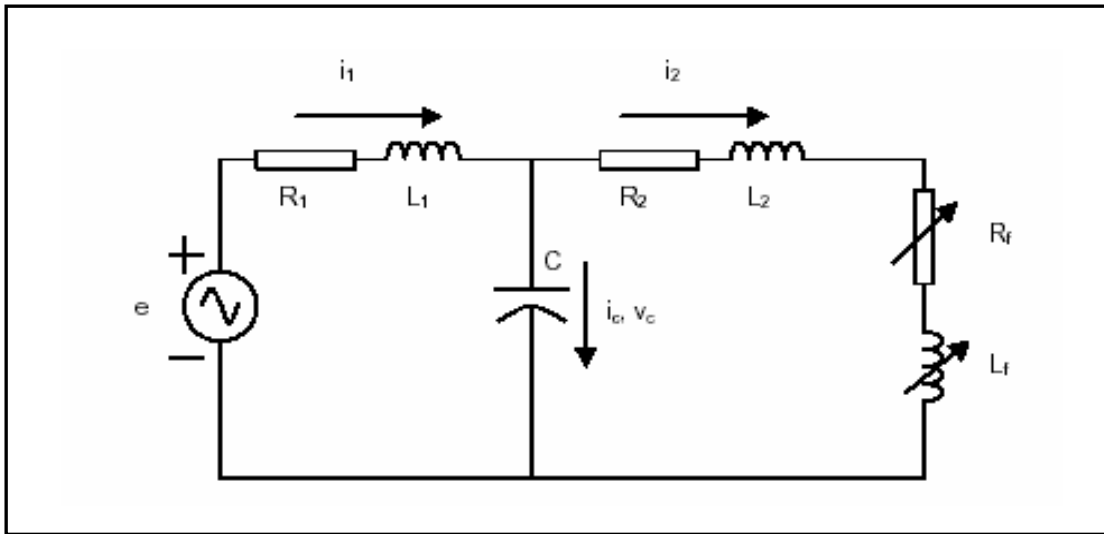
### 3-6 أفران القوس الكهربائي كحمل غير خطي :-

إن التركيب المثالي لفرن القوس الكهربائي كما هو موضح بالشكل (3-4) ، والذي يتكون من مكافئ المحطة أو الشبكة  $S$  ، و محول المحطة  $T_s$  ، و كابل يصل بين محول الفرن و محول المحطة  $D_1$  ، وأجهزة تصحيح معامل القدرة  $C$  ، و محول خاص بالفرن  $T_a$  ، وكابل يصل بين الالكترودات و محول الفرن  $D_2$  ، و المغذي  $B$  ، و الكترودات الجرافيت  $G$  ، ووعاء الصهر  $M$ .



شكل (3-4) : مخطط لفرن قوس كهربائي مثالي

لكي يتم تحليل عملية القوس الكهربائي والتفاعل بين الفرن والشبكة العامة ، تم تمثيل الفرن المثالي بدائرة كهربائية بسيطة كما هو موضح بالشكل (3-5)، وهذا التبسيط معقول لان العمليات الميكانيكية تكون دائما أبطأ من العمليات الكهربائية .



شكل (3-5) : تمثيل فرن القوس الكهربائي كدائرة كهربائية

حيث تمثل  $L_1, R_1$  المقاومة و المفاعلة المكافئة للمحطة S والمحول  $T_s$  و الكابل  $D_1$  ، أما C فتمثل مفاعلة أجهزة تصحيح معامل القدرة، و  $L_2, R_2$  فيمثلان المقاومة و المفاعلة المكافئة للالكترودات G و محول الفرن  $T_a$  و كابل الفرن  $D_2$  والمغذي B. المقاومة  $R_f$  تمثل مقاومة القوس الكهربائي وهي متغيرة على حسب مراحل التشغيل، أما المفاعلة  $L_f$  فتمثل المحاثة الناتجة بسبب مرور التيار في الشحنة.

## 3-7 المشاكل الناجمة عن هذه الأفران :-

يعتبر التردد و الجهد في منظومة القدرة من أهم عناصر خرج المنظومة التي لها تأثير كبير سواء كان على استقرارية المحطة أو الشبكة المربوطة إليها أو على مستوى الأحمال (المستهلكين) ، حيث إن أي تغيير قد يطرأ على تردد أو جهد المنظومة يؤدي إلى انعكاسات سلبية كبيرة على هذه الأطراف الثلاثة ( المولد ، الشبكة ، المستهلك ).

إن الأفران الكهربائية تعتبر من أهم الأحمال المفاجئة و الخطيرة على منظومة القوى خاصة وهي ذات تأثير فعال و مباشر على المنظومة، والتي تسبب تأثيراً مباشراً على تردد و جهد منظومة القوى. ومن المشاكل التي تسببها أفران القوس الكهربائي الآتي :-

## 3-7-1 تغيير تردد الشبكة :-

ينحرف تردد الشبكة عن القيمة 50HZ، وذلك بسبب تغيير في القدرة الفعالة المطلوبة من الشبكة لحظياً ، وحيث إن تغيير القدرة الفعالة يؤثر مباشرة على التردد و ذلك حسب العلاقة التالية :

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_s}{2H} (P_m - P_e) \dots\dots\dots(1-3)$$

حيث :

$\omega_r$  : الفرق بين سرعة العضو الدوار في المولد و سرعة التزامن .

$\delta$  : زاوية الحمل.

$\omega_s$  : سرعة التزامن .

H : ثابت القصور الذاتي .

$P_m$  : القدرة الميكانيكية الداخلة للمولد بنظام الوحدة.

$P_e$  : القدرة الكهربائية الخارجة من المولد بنظام الوحدة .

وبما أن التردد دالة في السرعة الزاوية، فنجد أن التردد يعتمد فقط على القدرة الفعالة في الآلات المتزامنة. وعند زيادة طلب القدرة الفعالة ( $P_e$ ) عن القدرة الميكانيكية الداخلة للمولد ( $P_m$ ) ، فإن ذلك يؤدي إلى تقليل سرعة المولدات بسبب العجلة السالبة ، وبالتالي نقصان التردد ، ويحدث العكس عند فصل الفرن عن الشبكة، فإن ذلك يسبب في نقصان القدرة الفعالة ( $P_e$ ) عن القدرة الميكانيكية الداخلة للمولد ( $P_m$ ) ، و ذلك يؤدي إلى زيادة سرعة المولدات بسبب العجلة الموجبة ، وبالتالي زيادة في التردد .

## 3-7-2 هبوط في جهد الشبكة :-

وذلك بسبب الزيادة في الطلب على القدرة الغير فعالة، وحيث إن التغيير في الجهد يعتمد مباشرة على القدرة الغير فعالة للحمل، وذلك حسب العلاقة التالية :-

$$\Delta V = \frac{XQ}{V} \dots\dots\dots(2-3)$$

حيث :-

$\Delta v$  : مقدار التغير في الجهد .

X : الفاعلة الحثية للحمل .

Q : القدرة الغير فعالة للحمل .

V : الجهد على الحمل .

**3-7-3 توليد التوافقيات :-**

تسبب هذه الأفران توافقيات في الجهد و التيار ، والتي بدورها تسبب العديد من المشاكل الأخرى في الشبكة و الأجهزة الكهربائية .

### 3-8 تحليل التوافقيات وأنواعها بأفران القوس الكهربائي :-

تعتبر أفران القوس الكهربائي من أهم الأحمال اللاخطية التي تتسبب في إنتاج العديد من توافقيات التيار بترددات مختلفة، والذي ينعكس على موجة الجهد مسببا في تشوهها وظهور توافقيات بها، ومن أنواع التوافقيات التي تنتجها أفران القوس الكهربائي بالتيار المتردد هي توافقيات زوجية وخاصة التوافقية الثانية ، وتظهر هذه التوافقية في بداية عملية الصهر بنسبة عالية نتيجة لعدم استقرار القوس في هذه المرحلة ، كما ينتج عن هذا النوع من الأفران توافقيات فردية وخاصة التوافقيات الثالثة والخامسة والسابعة والتي تكون بنسب عالية في بداية عملية الصهر.

والجدول (3-1) يوضح مقادير قياسية للتوافقيات التي تولدها أفران القوس الكهربائي لمراحل التشغيل المختلفة ( صهر، تنقية )، حيث يلاحظ أن التوافقيات تكون أكبر تأثيراً في مرحلة الصهر و التي يكون فيها القوس الكهربائي غير مستقر.

جدول (3-1) : نسب توافقيات التيار المتولدة من أفران القوس الكهربائي لمرحلي التشغيل [4]

حالة الفرن	رتبة التوافقية	نسبة توافقية التيار من المركبة الأساسية %				
		2	3	4	5	7
صهر أولي		7.7	5.8	2.5	4.2	3.1
تنقية		-	2.0	-	3.1	-

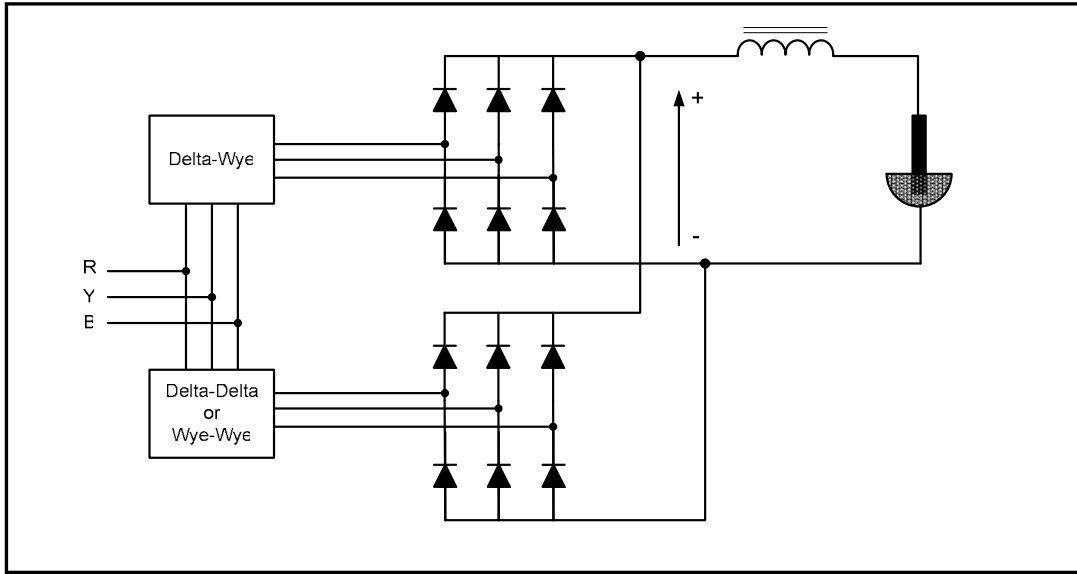
وتعتبر أفران القوس الكهربائي ذات التيار المتردد من أهم مصادر التوافقيات الوسطية وخاصة التوافقيات التحتية حيث يكون الطيف التوافقي مستمر ولجميع الترددات ويزداد قيمته عند الترددات المنخفضة مما يتسبب في رجفة الضوء.

أما في حالة أفران القوس الكهربائي ذات التيار المستمر فإن التوافقيات الوسطية تكون بقيم أقل أما التوافقيات الزوجية والفردية فتعتمد قيمتها على نوع المقوم المستخدم.

### 3-9 الحد من التوافقيات الناتجة عن أفران القوس الكهربائي :-

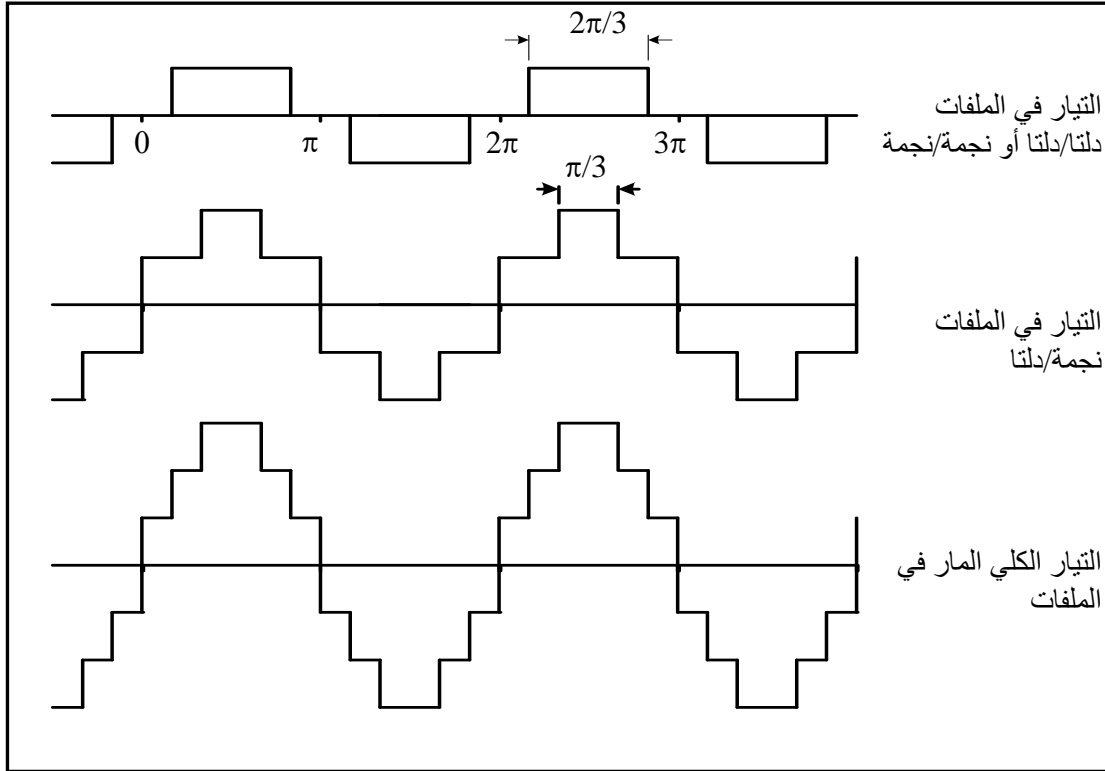
يمكن الحد من التوافقيات الناتجة عن هذه أفران القوس الكهربائي ذات التيار المتردد بتوصيل محول الفرن على شكل دلتا أو نجمة غير مؤرضة في إحدى جوانبه الثانوي أو الابتدائي، وذلك للتخلص من التوافقيات ذات التتابع الصفري، وتجنب حدوث التشبع في محول الفرن باختيار محول ذات قدرة عالية على التحميل الزائد، كما يمكن استخدام المرشحات في الحد من التوافقيات ولكنها تكون أعلى تكلفة وعدم استعمالها بشكل مناسب يسبب في زيادة التوافقيات.

أما في حالة أفران القوس الكهربائي ذات التيار المستمر فيمكن الحد من التوافقيات الناتجة عنها باستخدام دائرة مقوم ذي (12) نبضة والتي تقسم إلى مجموعتين على التوالي ، كل مجموعة تغذى ب (6) نبضات ، ويتم ربط كل مجموعة من دائرة المقوم بملفات محول ذي توصيلة (نجمة/دلتا) و (نجمة/نجمة) أو (دلتا/دلتا)، كما هو موضح بالشكل ( 3-6).



شكل(3-6):كيفية ربط الثايروستورات مع المحول لتقليل التوافقيات

حيث يكون شكل موجة التيار المار في الملفات الموصلة بالثنائيات مستطيلة الشكل تقريبا . وتتضمن جميع التوافقيات الفردية ماعدا التوافقية الثالثة ومضاعفاتها ، وهذه الموجة المستطيلة تعمل على إعادة توليد التيار في الملفات الموصلة على شكل نجمة ، حيث يكون تيار الملفات الموصلة بشكل دلتا يحوي على تداخلين للمكونات المستطيلة و الذي يعمل على إزاحة موجة التيار . وتكون محصلة موجة التيار للخط الواصل بالشبكة كما هي موضحة بالشكل (3-7).



شكل (7-3) : موجة التيار المار في الملفات

وتكون التوافقيات الخامسة و السابعة و السابعة عشر و التاسعة عشر و التوافقيات الأكبر من  $(6n \pm 1)$  حيث  $(n)$  عدد فردي ,والمتكونة في الملفات الموصلة توصيلة دلتا مخالفة في الطور مع التوافقيات المتولدة في الملفات الموصلة بشكل نجمة ، و بالتالي تبقى هذه التوافقيات تدور بين الملفات ولا تظهر على الشبكة.

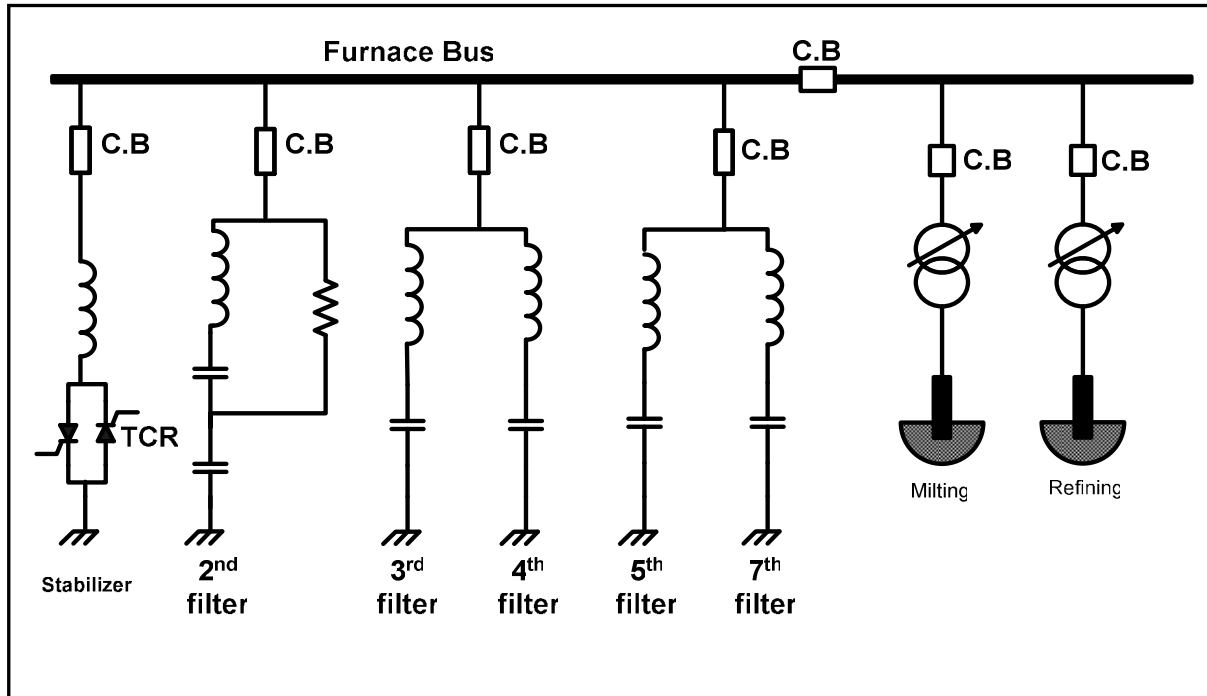
ويكون التأثير نفسه في حالة توصيل الملفات (نجمة/نجمة) أو (دلتا/دلتا) في جهة الملف الابتدائي، والملفات الموصلة توصيلة (نجمة/دلتا) في جهة الملف الثانوي. حيث يمكن زيادة عدد الثنائيات المربوطة مع المحول إلى 24 للحصول على إزالة أكثر فاعلية للتوافقيات. وتستخدم محولات محتوية على 48 ثنائي أو أكثر في التجهيزات الصناعية الكبيرة ، حيث يؤدي زيادة عدد الثنائيات إلى الحصول على موجة مستمرة أكثر نعومة و زيادة في فاعلية إزالة التوافقيات .

## 3-10 ترشيح التوافقيات الناتجة عن أفران القوس الكهربائي:-

يتم ترشيح التوافقيات المتولدة من أفران القوس الكهربائي باستخدام دوائر رنين متصلة على التوازي مع الفرن، هذه الدوائر تعمل كمرشحات للتوافقيات الثانية و الثالثة و الرابعة و الخامسة و السابعة، وتوجد هذه المرشحات في محطات خاصة تسمى محطات التعويض الساكنة للقدرة الغير فعالة Static VAR Compensator (SVC) ، حيث يتم استغلال المكثفات لتعويض القدرة الغير فعالة و في نفس الوقت تستخدم في دوائر الرنين كمرشحات .

وللتخلص من التوافقيات الوسطية يستخدم مرشح نوع (C) أو مرشح إمرار للترددات العالية لترشيح التوافقية الثانية، حيث يعمل في نفس الوقت على ترشيح التوافقيات الوسطية والتي يكون لها مقدار عالي بين التوافقيتين الثانية و الثالثة.

والشكل (8-3) يوضح مخطط لمحطة التعويض (SVC) حيث يتم التحكم في القدرة الغير فعالة المعوضة عن طريق مثبت الجهد ( Stabilizer ) والذي يقوم بامتصاص القدرة الغير فعالة الزائدة من المرشحات والتي لا يحتاجها الفرن، ويتم التحكم في القدرة الممتصة عن طريق التحكم في التيار المار في المثبت بواسطة ثايروستورات يتم التحكم في زاوية إشعالها .



شكل (8-3) : مخطط توضيحي لمحطة تعويض (SVC)

## الفصل الرابع المرشحات



## 4-1 مقدمة :-

بعد فهم خواص التوافقيات الموجودة في الشبكة و مصادرها يبقى علينا شيء مهم وهو معرفة طرق التخلص منها أو على الأقل التقليل منها وذلك للحصول على أفضل شكل جيبي غير مشوه لموجة الجهد التي في الشبكة.

تستخدم المرشحات في نظم القوى الكهربائية في كثير من التطبيقات مثل أجهزة التحكم و حماية خطوط النقل بالإشارة الدليلية المحمولة عن طريق خط النقل، كما تستخدم في إخماد توافقيات الجهد والتيار المتولدة في الشبكة بسبب الأحمال اللاخطية، و المرشح هو عبارة عن دائرة كهربائية تتكون من عناصر خطية (R,L,C) أو عناصر غير خطية مثل الترانزستورات أو الثايرستورات ، وهذه الدائرة لها القدرة على انتقاء أو حذف ترددات معينة لموجات جيبيية، وتستخدم المرشحات فقط عند عدم نجاح الطرق الأخرى في حصر و تقليل التوافقيات الموجودة في المنظومة، وذلك بسبب ارتفاع تكلفتها و قد تتداخل مرشحات التوافقيات مع المنظومة أو مع مرشحات أخرى لإحداث حالات رنين غير متوقعة، لذلك غالباً ما يتم دراسة التوافقيات لتحديد وتصميم نوع منظومة الترشيح.

في هذا الفصل سوف ندرس أنواع المرشحات المستخدمة في ترشيح التوافقيات وخصائص كل مرشح وفكرة عمله في ترشيح التوافقيات.

هناك نوعان رئيسيان من المرشحات يستخدمان في ترشيح التوافقيات في نظم القوى الكهربائية هما:

- مرشحات غير الفعالة.
- مرشحات فعالة.

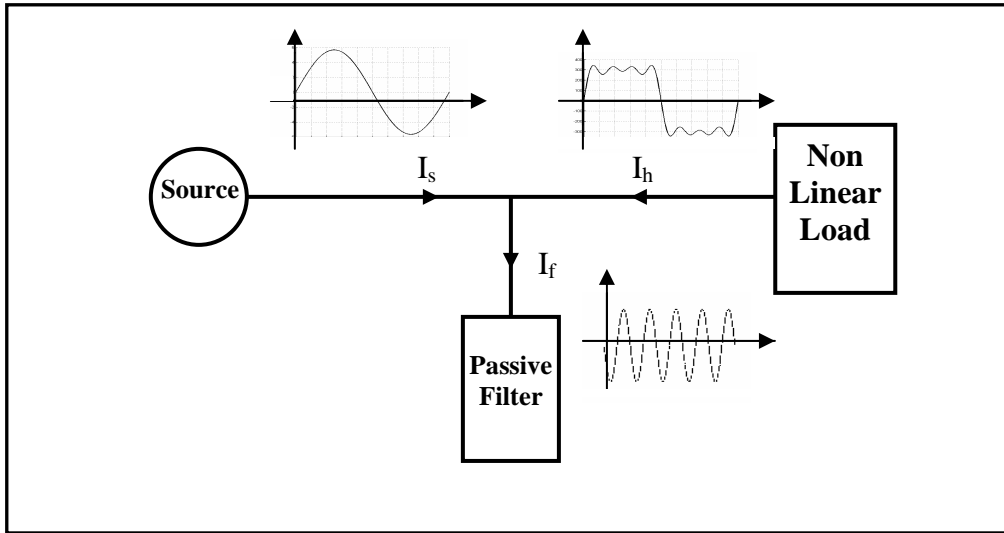
## 4-2 المرشحات غير الفعالة [7] :- Passive Filters

وهي دوائر كهربائية تتكون من عناصر خطية RLC ، وتعتمد فكرة عملها على حدوث رنين بين عناصر الدائرة عند تردد التوافقية المراد التخلص منها ، وتوصل عناصر الدائرة معاً إما على التوالي أو على التوازي أو توازي توالي. وعند حدوث الرنين فإن المركبة التخيلية للتيار المار في المرشح تساوي صفر ، ويحدث ذلك عندما تكون المفاعلة المكافئة للمرشح ( $X_{eq}$ ) تساوي صفر . ويمكن التعبير عن ذلك رياضياً بالمعادلات الآتية :

$$I_f \sin \theta = 0 \quad \dots\dots\dots(1-4)$$

$$X_{eq} = 0 \quad \dots\dots\dots(2-4)$$

والشكل (1-4) يوضح مخطط مبسط لمرشح غير فعال، مفاعلة المرشح المكافئة ( $X_{eq}$ ) تعتمد على تردد التيار المار بالمرشح ، وبالتالي إذا كان تردد التيار يسبب حالة الرنين فان المعاوقة التي يراها التيار تكون أقل ما يمكن ويصبح المرشح مسار سهل للتيار، ويتم تصميم المرشح باختيار قيم مناسبة لعناصره بحيث يحدث الرنين عند تردد التوافقية المراد ترشيحها.



شكل (1-4):مخطط مبسط يوضح المرشح الغير فعال

ويتم توصيل المرشحات مع الشبكة إما على التوالي بجعل الرنين يحدث عند تردد القوى 50Hz ، أو بتوصيلها على التوازي و جعل الرنين يحدث عند تردد التوافقيات، ولكن عملياً يتم توصيل المرشحات على التوازي وذلك للأسباب الآتية :-

- لتعويض القدرة غير الفعالة.
  - حتى لا يحدث هبوط في الجهد نتيجة لمقاومة المرشح.
  - تيار الحمل عادةً ما يكون عالي وبالتالي قد يتلف المكثف أو الملف.
- وهناك أربع طرق لتوصيل المرشحات غير الفعالة لكل طور في الأنظمة الثلاثية الطور وهي :-
- توصيلها على شكل دلتا.
  - توصيلها على شكل نجمة غير مؤرضة.
  - توصيلها على شكل نجمة مؤرضة.
  - توصيلها على شكل نجمة، نقطة تعادلها متصلة بخط التعادل للنظام الثلاثي.

ولكل مرشح من هذا النوع تردد خاص يعرف بتردد القطع أو الحرج وهو التردد الذي عنده تكون القدرة المفقودة في المرشح نصف القدرة المفقودة عند الرنين، أي أن قيمة التيار المار عبر المرشح لا تقل

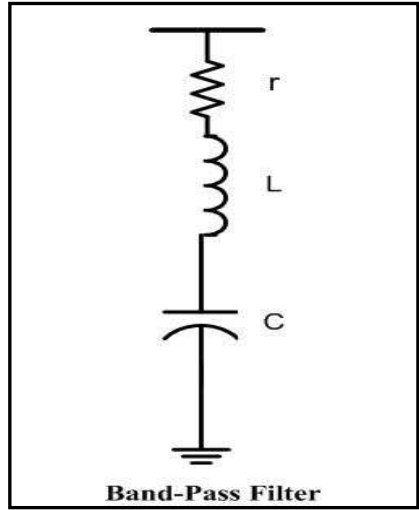
عن 70.7% من القيمة العظمى (عند الرنين)، ويحدث ذلك عندما تكون المفاعلة المكافئة للمرشح ( $X_{eq}$ ) مساوية للمقاومة المكافئة للمرشح ( $R_{eq}$ ).

وهناك نوعين من المرشحات غير الفعالة المستخدمة في ترشيح التوافقيات هي:-

#### 1-2-4 مرشح إمرار نطاقي [7]: - Band-Pass Filter

يتكون هذا النوع من المرشحات من دائرة رنين توالي كما هو موضح بالشكل (2-4) ، وتمثل ( $L$ ) محاطة الملف و ( $r$ ) مقاومة الملف و ( $C$ ) قيمة متسعة المكثف، وتصمم قيم عناصر دائرة المرشح لحدوث الرنين عند تردد التوافقية المراد التخلص منها ( $f_r$ )، وذلك حسب العلاقة التالية :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \dots\dots\dots(3-4)$$



شكل(2-4): مرشح إمرار نطاقي

#### خصائص مرشح إمرار نطاقي :-

- عند استخدام هذا المرشح في تعويض القدرة غير الفعالة عند تردد القوى فإن مقدار القدرة غير الفعالة يمكن إيجادها كالتالي:

$$Q_{var} = \frac{V_1^2}{2\pi f_1 L - 1/(2\pi f_1 C)}$$

$$\therefore f_1 = \frac{f_r}{n_r} \dots\dots\dots(4-4)$$

$$\therefore Q_{var} = \frac{-n_r^2}{n_r^2 - 1} V_1^2 2\pi f_1 C \dots\dots\dots(5-4)$$

حيث:

$f_1$  : تردد المركبة الأساسية.

$V_1$  : القيمة الفعالة لجهد القضيب الذي ربط به المرشح.

$n_r$  : رتبة التوافقية التي يقوم المرشح بترشيحها.

يلاحظ أن القدرة غير الفعالة تكون سالبة عند استخدام المرشح في ترشيح التوافقيات التي لها تردد أعلى من التردد الأساسي ، وذلك بسبب نقصان مفاعلة الملف و كبر مفاعلة المكثف عند تقليل التردد، والإشارة السالبة تعني أن المرشح يعطي القدرة غير الفعالة للشبكة.

• المعاوقة المميزة للمرشح ( $X_o$ ) تعطى بالعلاقة:

$$X_o = \sqrt{\frac{L}{C}} \dots\dots\dots(6-4)$$

• معامل الجودة للمفاعلة ( $q$ ) يعطى بالعلاقة التالية :

$$q = \frac{X_o}{r} \dots\dots\dots(7-4)$$

وعند استخدام ملف ذو قلب حديدي فإن  $r \ll X_o$  وبالتالي يصبح معامل الجودة أكبر من 75 في هذه الحالة.

• نطاق الإمرار للمرشح يعطى من العلاقة :

$$BP = 2 \frac{f_c - f_r}{f_r} = \frac{1}{q} = \frac{r}{X_o} \dots\dots\dots(8-4)$$

حيث ( $f_c$ ) تردد القطع للمرشح.

• المفاقيد في المرشح بسبب المركبة الأساسية تعطى بالعلاقة :

$$P_1 = \frac{Q_{var}}{q \times n_r} \dots\dots\dots(9-4)$$

ولكن المفاقيد بسبب تيار التوافقية الذي يسبب الرنين (التيار المخمد) تكون أكبر من ذلك وتعطى من العلاقة:

$$P_n = \frac{V_n^2}{r} \dots\dots\dots(10-4)$$

حيث ( $V_n$ ) هو جهد الخط الناتج بسبب التوافقية المرشحة.

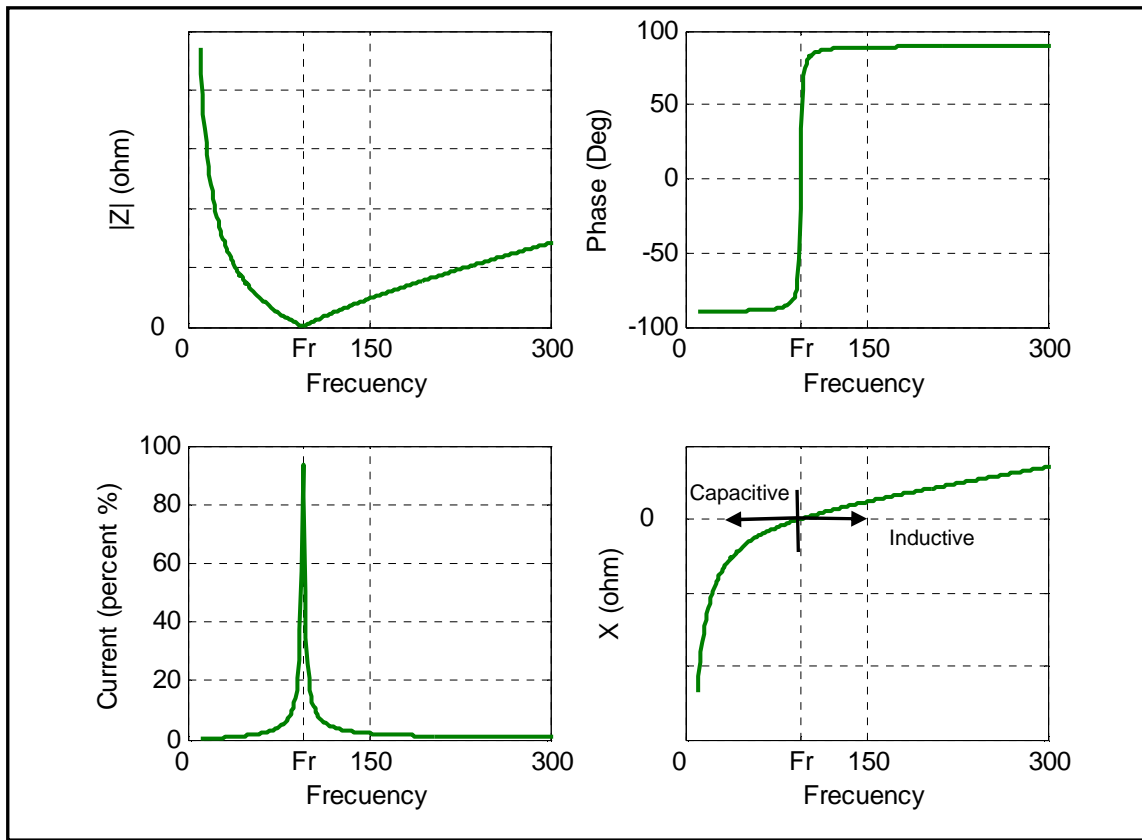
• الخطأ النسبي في تردد الرنين للمرشح نتيجة للتغيرات الحادثة في المحاثة ( $\Delta L$ ) و المتسعة ( $\Delta C$ )

بسبب التغير في درجة الحرارة أو القدم، يعطى بالعلاقة:

$$\delta = \frac{1}{2} \left[ \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta C}{C} \right] \dots\dots\dots(11-4)$$

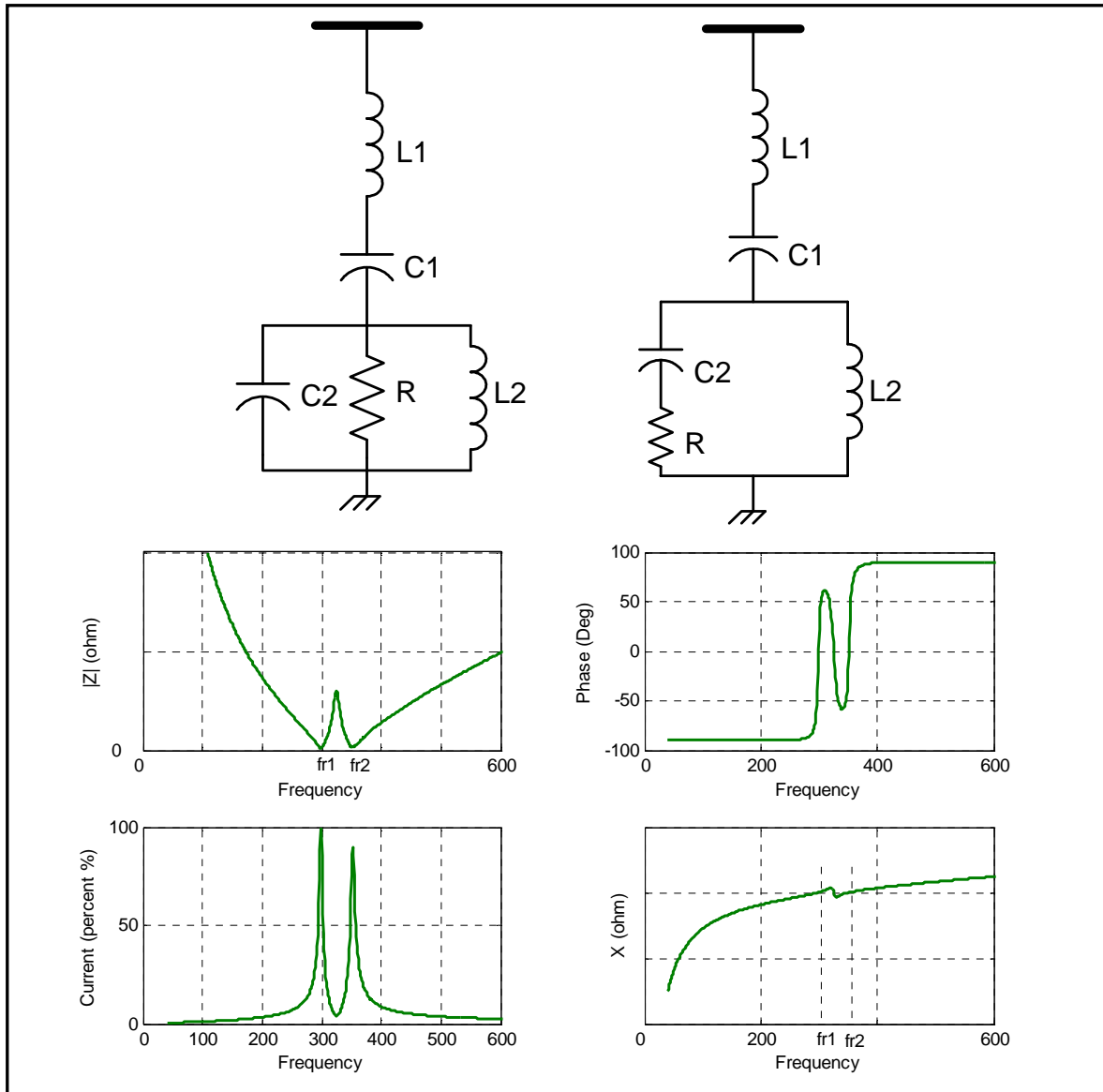
لذلك يجب تصميم المرشح لكي يتكيف مع هذه التغيرات باستخدام محاثة متغيرة يتم ضبطها تلقائياً بنظام سيطرة يعمل على جعل جهد الملف و المكثف متساويين.

والشكل (3-4) يوضح خواص هذا النوع من المرشحات، حيث يلاحظ أنه عند الرنين يكون مقدار معاوقة المرشح أقل ما يكون وزاوية المعاوقة تساوي صفر، ويكون التيار المار بالمرشح في أعلى قيمة له، كما يلاحظ أنه قبل حدوث الرنين تكون المفاعلة السعوية للمكثف أكبر من المفاعلة الحثية للملف وبالتالي تكون المفاعلة المكافئة للمرشح سعوية، وبعكس الحال بعد حدوث الرنين فتصبح المفاعلة المكافئة للمرشح حثية.



شكل(3-4): خواص مرشح إمرار نطاقي

وهناك نوع آخر من هذه المرشحات وهو يقوم بتمرير نطاقين من التردد (Double-Tuned Filter)، أي أن الرنين يحدث عند ترددين مختلفين ، والشكل (4-4) يوضح بعض الدوائر التي تحقق هذا المرشح ، كما يوضح خواص هذا المرشح مع التردد ، حيث  $(f_{r1}, f_{r2})$  تمثل ترددات الرنين في هذه الدوائر.



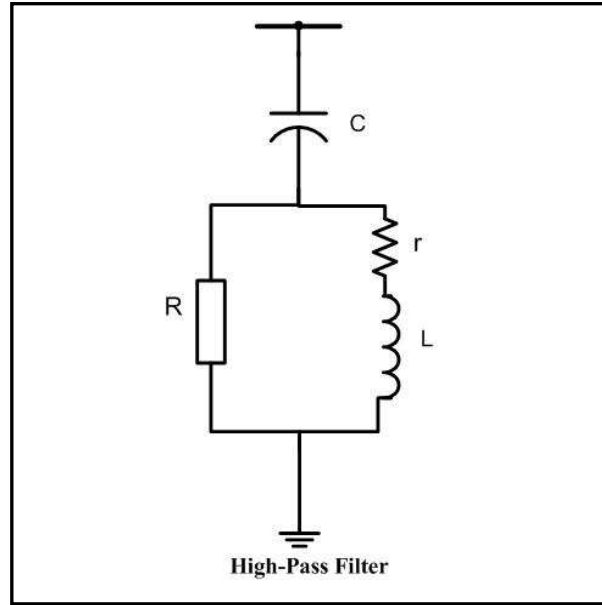
شكل (4-4): تركيب وخواص مرشح إمرار نطاقين

### High-Pass Filter

### 2-2-4 مرشح إمرار الترددات العالية [7]:-

يستخدم هذا النوع من المرشحات مع أفران الصهر بالقوس الكهربائي، وذلك بسبب الطيف التوافقي المستمر، والذي يحتوي على ترددات عالية، لذا يستخدم هذا المرشح لإخماد جميع هذه التوافقيات. الشكل (4-5) يوضح تركيب مرشح إمرار ترددات عالية من الرتبة الثانية، وهذا المرشح يقوم بإخماد جميع التوافقيات التي لها تردد أكبر من تردد الرنين. وتردد الرنين لهذا المرشح يعطى من العلاقة:

$$f_r = \frac{r + R}{2\pi\sqrt{R^2LC - L^2}} \dots\dots\dots(12-4)$$



شكل (4-5): مرشح إمرار ترددات عالية

**خصائص مرشح إمرار ترددات عالية:-**

- معامل الجودة للمرشح (Q) يعطى بالعلاقة التالية:

$$Q = \frac{R}{X_o} \dots\dots\dots(13-4)$$

حيث (X<sub>o</sub>) المعاوقة المميزة للمرشح، وعادةً ما تكون قيمة هذا المعامل ما بين 2- 10 . ويمكن حساب تردد الرنين بدلالة معامل الجودة للمرشح (Q) ومعامل جودة المفاعلة (q) من العلاقة التالية :-

$$f_r = \frac{1 + Qq}{2\pi q\sqrt{(Q^2 - 1)LC}} \dots\dots\dots(14-4)$$

- مقدار القدرة غير الفعالة التي يساهم بها المرشح عند تردد القوى يمكن حسابها من المعادلة التالية:

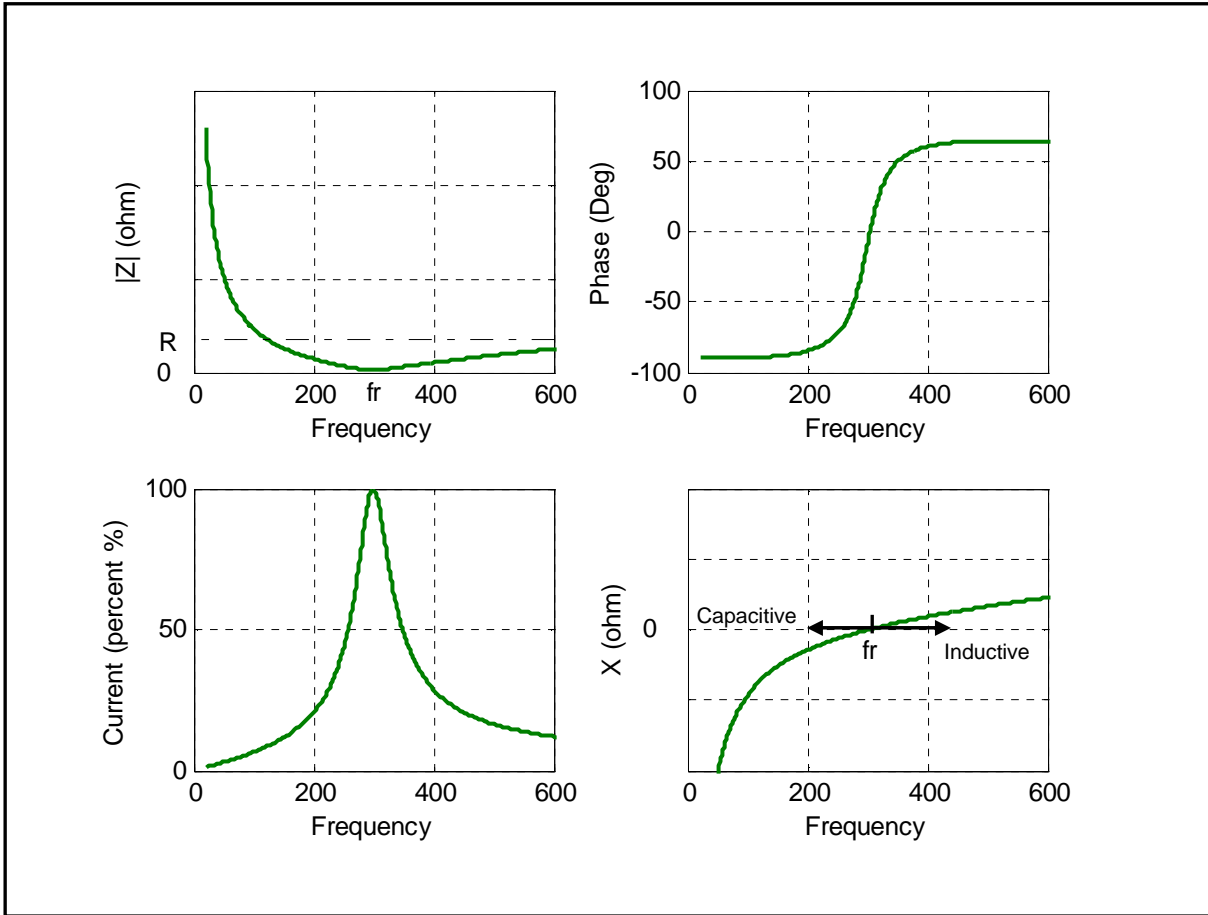
$$Q_{var} = \frac{-n_r^2}{n_r^2 - 1} V_1^2 2\pi f_1 C \dots\dots\dots(15-4)$$

- الخطأ النسبي في تردد الرنين للمرشح نتيجة للتغيرات الحاصلة في المحاثة (ΔL) و المتسعة (ΔC) ومقاومة الملف (Δr) والمقاومة (ΔR) بسبب التغير في درجة الحرارة أو القدم، يعطى

بالعلاقة:

$$\delta = \frac{\Delta r}{r(1 + Qq)} + \frac{Qq\Delta R}{R(1 + Qq)} - \frac{(Q^2 - 2)\Delta L}{2L(Q^2 - 1)} - \frac{(Q^2)\Delta C}{2C(Q^2 - 1)} \dots\dots\dots(16-4)$$

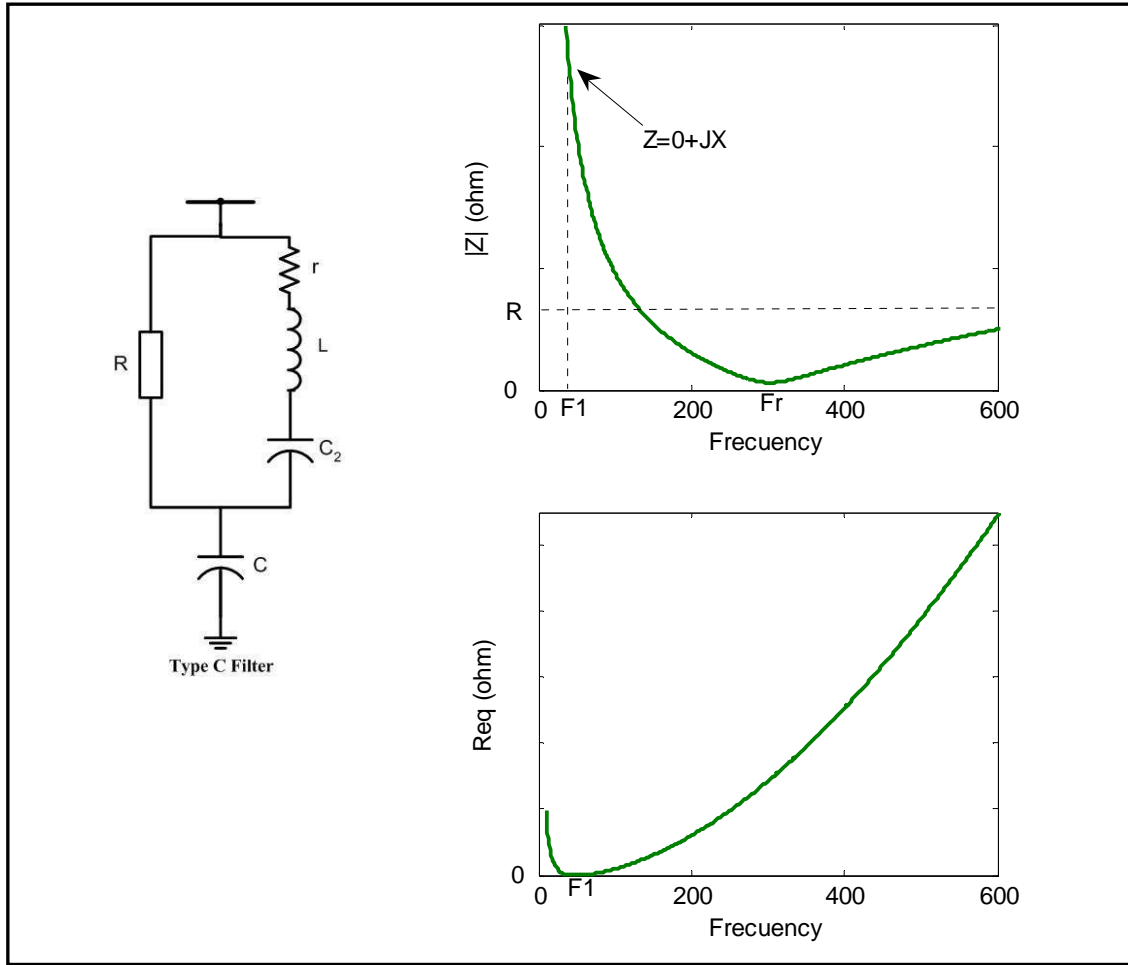
- المفايد في هذا المرشح أعلى من مرشح الإمرار النطاقي، بسبب وجود المقاومة  $R$ .
- والشكل (6-4) يوضح خصائص مرشح إمرار الترددات العالية، حيث يلاحظ أن تردد الرنين في هذا المرشح ( $f_r$ ) أعلى من تردد الرنين في مرشح إمرار نطاقي ( $f_{r1}$ ) وذلك عند نفس القيم لـ (LC).



شكل (6-4): خواص مرشح إمرار الترددات العالية.

هناك تركيب آخر لهذا النوع من المرشحات يعرف بمرشح نوع  $C$  ، وينتشر استخدامه في إخماد التوافقيات وخاصة التوافقية الثانية والتوافقيات الوسطية الناتجة من أفران الصهر بالقوس الكهربائي، لأن له القدرة على الفصل بين التوافقية الثانية والمركبة الأساسية. والشكل (7-4) يوضح تركيب هذا المرشح.





شكل (4-7): تركيب وخواص مرشح نوع C

من الشكل السابق يلاحظ أن المرشح نوع C يتربك من مرشح إمرار ترددات عالية تقليدي مضاف إليه متسعة على التوالي مع الملف وذلك لتقليل المفاقيد الناتجة عن المرشح عند تردد القوى، بسبب المقاومة  $(R)$ ، بحيث تصمم المتسعة التي على التوالي مع الملف لحدوث الرنين عند تردد القوى، بحيث يحدث قصر على المقاومة  $(R)$  عندما  $(r = 0)$ ، وبالتالي تكون المفاقيد تساوي صفر في هذه الحالة، ولكن عندما  $(r \neq 0)$  فإن المقاومة الكلية للمرشح تكون  $(R // r)$  وتكون المفاقيد أقل ما يمكن. كما يمكن اعتبار مكثفات تصحيح معامل القدرة كمرشحات بسيطة التركيب للترددات العالية حيث أن معاوقة المكثف تقل مع زيادة التردد، وبالتالي توفر مسار سهل للتوافقيات ذات الترددات العالية.

### 3-4 ترشيح التوافقيات باستخدام المرشحات غير الفعالة:-

عند ربط عدة مرشحات غير فعالة بترددات إمرار مختلفة بقضيب توصيل واحد، فإنه سوف يحدث رنين توازي بين هذه المرشحات، بحيث يقع تردد هذا الرنين بين كل ترددين لرنين توالي، وعند الرنين التوازي يكون مقدار المعاوقة الكلية أكبر ما يمكن.

كما يحدث رنين توازي بين المرشحات ومعاوقة الشبكة المكافئة عند هذا القضيبي ، والتي عادةً ما تمثل بمفاعلة حثية متصلة على التوازي مع المرشحات، وتردد هذا الرنين يكون أقل من أصغر تردد رنين توالي للمرشحات، وقيمتها تعتمد على قيمة مفاعلة الشبكة المكافئة، وبما أن مفاعلة الشبكة المكافئة تختلف من قضيبي لآخر ، فإن قيمة تردد الرنين التوازي يختلف باختلاف القضيبي التي سوف تربط عليها هذه المرشحات.

يسبب رنين التوازي في تمرير توافقيات التيار للشبكة، والتي قد تسبب مشاكل عديدة، ولتلافي هذه المشكلة يجب أن يحدث هذا الرنين عند تردد خارج النطاق التوافقي للتيار الناتج عن الحمل اللاخطي.

لذلك عند تصميم منظومة مرشحات لترشيح التوافقيات الناتجة عن حمل غير خطي معين، فإنه يجب توفر المعلومات التالية:-

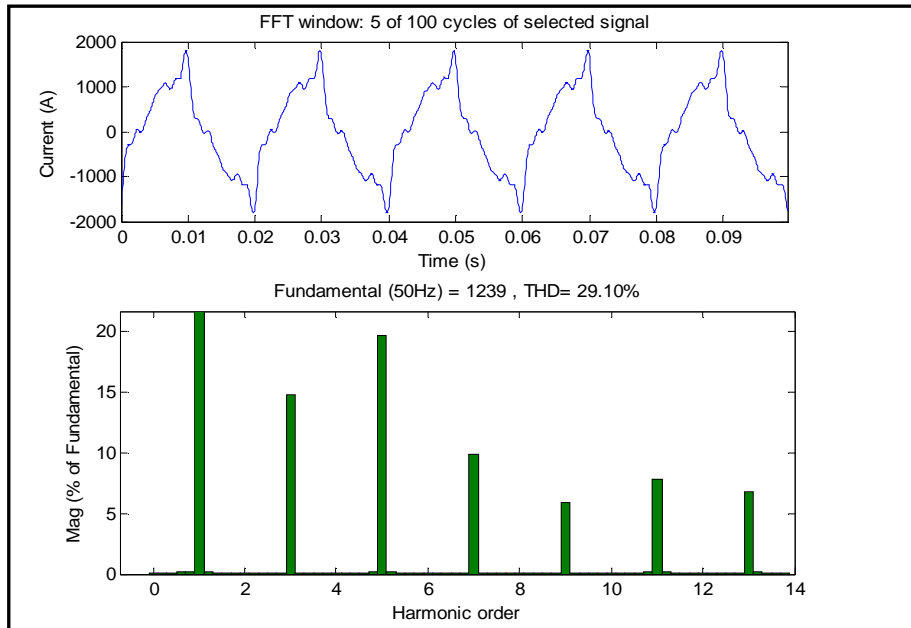
- 1- مخطط أحادي الطور للشبكة التي سوف توصل بها المرشحات.
- 2- القيمة المكافئة لمعاوقة الشبكة عند نقطة اتصال المرشحات.
- 3- مقدار ونوع التوافقيات المراد ترشيحها.
- 4- القيمة الفعالة للجهد عند قضيبي التوصيل الذي سوف تربط به المرشحات.
- 5- نوع وقيمة الأحمال المربوطة بنفس قضيبي التوصيل.

ولتصميم أي منظومة مرشحات لترشيح التوافقيات الناتجة عن حمل غير خطي ما، فإنه يجب إتباع الخطوات التالية:-

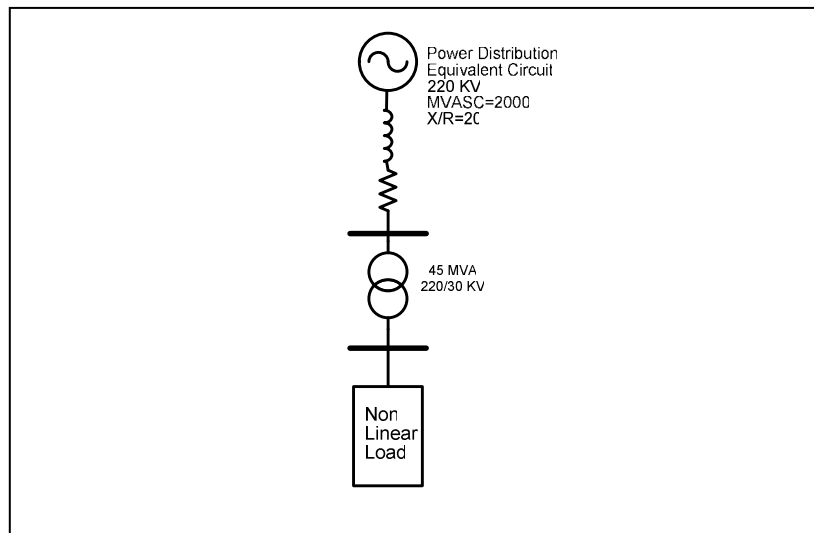
- 1- تحديد الطيف التوافقي للتيار الذي يولده الحمل اللاخطي ومنها يتحدد عدد ونوع المرشحات المستخدمة.
- 2- تحديد القدرة غير الفعالة الكلية للأحمال الموصلة على التوازي مع المرشحات ( $Q_L$ ).
- 3- تقسيم القدرة غير الفعالة التي تحتاجها الأحمال على المرشحات بحيث يساهم كل مرشح بقدر معين من القدرة غير الفعالة.
- 4- حساب السعة الكلية لكل طور ولكل مرشح من المعادلة (4-5) أو (4-15).
- 5- حساب باقي عناصر المرشح حسب نوع المرشح المستخدم.
- 6- في المرشح نوع (C) يتم حساب قيمة السعة ( $C_2$ ) بحيث تعطي رنين توالي مع المحاثة عند تردد القوى 50-60 Hz .

#### 4-4 مثال على استخدام المرشحات غير الفعالة :-

نفرض أنه لدينا حمل غير خطي ينتج توافقيات تيار كما بالشكل (4-8). ومقننات هذا الحمل هي ( 45 MVA , 50 Hz , 30 KV , P.F=0.6 Lag ) وموصل هذا الحمل بالشبكة كما هو موضح بالشكل (4-9). والمطلوب هو ترشيح هذه التوافقيات باستخدام المرشحات غير الفعالة.



شكل (4-8): الطيف التوافقي لتيار حمل لاخطي



شكل (4-9) : مخطط أحادي الطور يوضح توصيل الحمل اللاخطي بالشبكة

يلاحظ أن التوافقيات التي تحمل رتبة ( $n \geq 9$ ) تكون بقيم صغيرة وبترددات عالية ، وبالتالي يمكن استخدام مرشح إمرار ترددات عالية لترشيح التوافقية التاسعة في نفس الوقت يعمل على ترشيح التوافقيات ذات الرتب العليا ويكون بمعامل جودة للمرشح منخفض ( $Q=0.5$ ) ومعامل جودة للمفاعلة ( $q=70$ )، وذلك ليكون أكثر فاعلية في ترشيح التوافقيات ذات الرتب العليا. كما يمكن استخدام مرشحات ذات إمرار نطاقي لترشيح التوافقيات الثالثة والخامسة والسابعة بمعامل جودة للمفاعلة ( $q=70$ ). وبحساب القدرة غير الفعالة الكلية التي يحتاجها هذا الحمل نجد أنها تساوي :

$$Q_L = 45 \times \sin(\cos^{-1}(0.6)) = 36 \text{ MVAR}$$

وبفرض تقسيم القدرة الكلية هذه بالتساوي على المرشحات :

$$Q_{\text{var } 3HF} = Q_{\text{var } 5HF} = Q_{\text{var } 7HF} = Q_{\text{var } 9HF} = 9MVAR$$

أولاً: حساب عناصر مرشح التوافقية الثالثة ( $n_r=3$ ):-

$$C = \frac{Q \text{ var}(n_r^2 - 1)}{2\pi n_r^2 V_1^2 f_1} = 28.294 \mu F$$

$$L = \frac{1}{4\pi^2 C f_1^2 n_r^2} = 39.79 \text{ mH}$$

$$r = \sqrt{\frac{L}{q^2 C}} = 0.536 \Omega$$

ثانياً: حساب عناصر مرشح التوافقية الخامسة ( $n_r=5$ ):-

$$C = \frac{Q \text{ var}(n_r^2 - 1)}{2\pi n_r^2 V_1^2 f_1} = 30.56 \mu F$$

$$L = \frac{1}{4\pi^2 C f_1^2 n_r^2} = 13.26 \text{ mH}$$

$$r = \sqrt{\frac{L}{q^2 C}} = 0.297 \Omega$$

ثالثاً: حساب عناصر مرشح التوافقية السابعة ( $n_r=7$ ):-

$$C = \frac{Q \text{ var}(n_r^2 - 1)}{2\pi n_r^2 V_1^2 f_1} = 31.18 \mu F$$

$$L = \frac{1}{4\pi^2 C f_1^2 n_r^2} = 0.135 \text{ mH}$$

$$r = \sqrt{\frac{L}{q^2 C}} = 0.02977 \Omega$$

رابعاً: حساب عناصر مرشح التوافقية التاسعة ( $n_r=9$ ):-

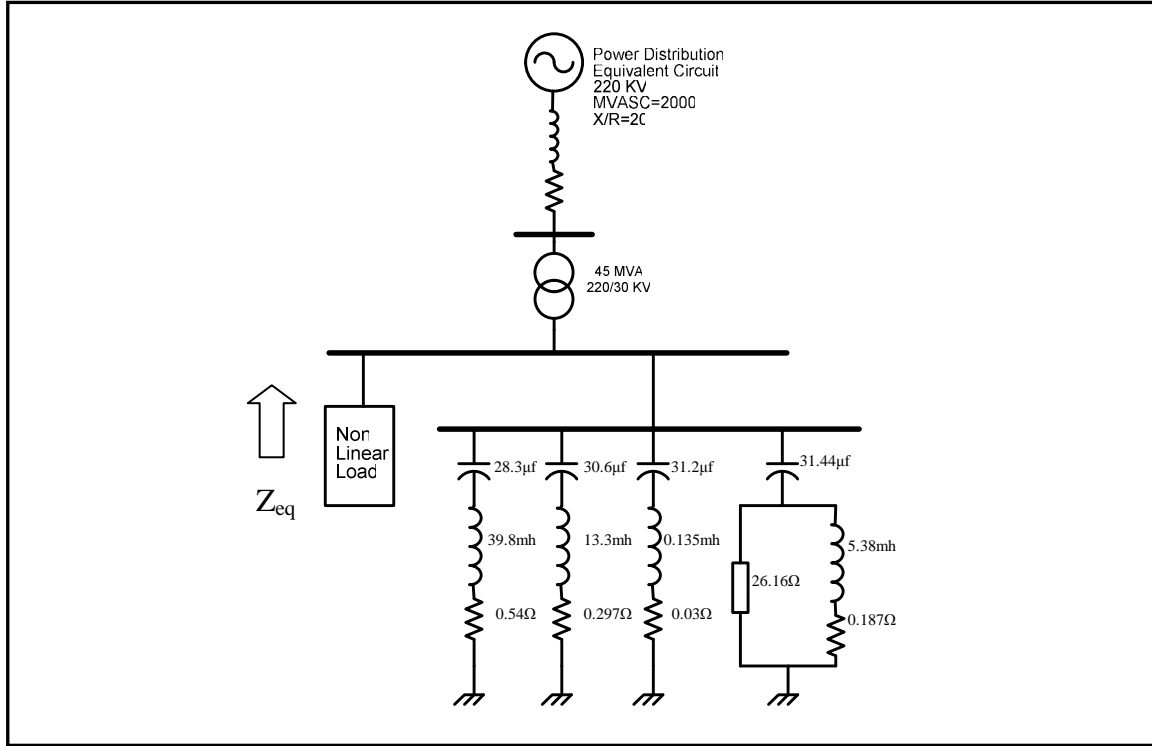
$$C = \frac{Q \text{ var}(n_r^2 - 1)}{2\pi n_r^2 V_1^2 f_1} = 31.44 \mu F$$

$$L = \frac{(1 + Qq)^2}{4\pi^2 q^2 (Q^2 - 1) C f_1^2 n_r^2} = 5.38 \text{ mH}$$

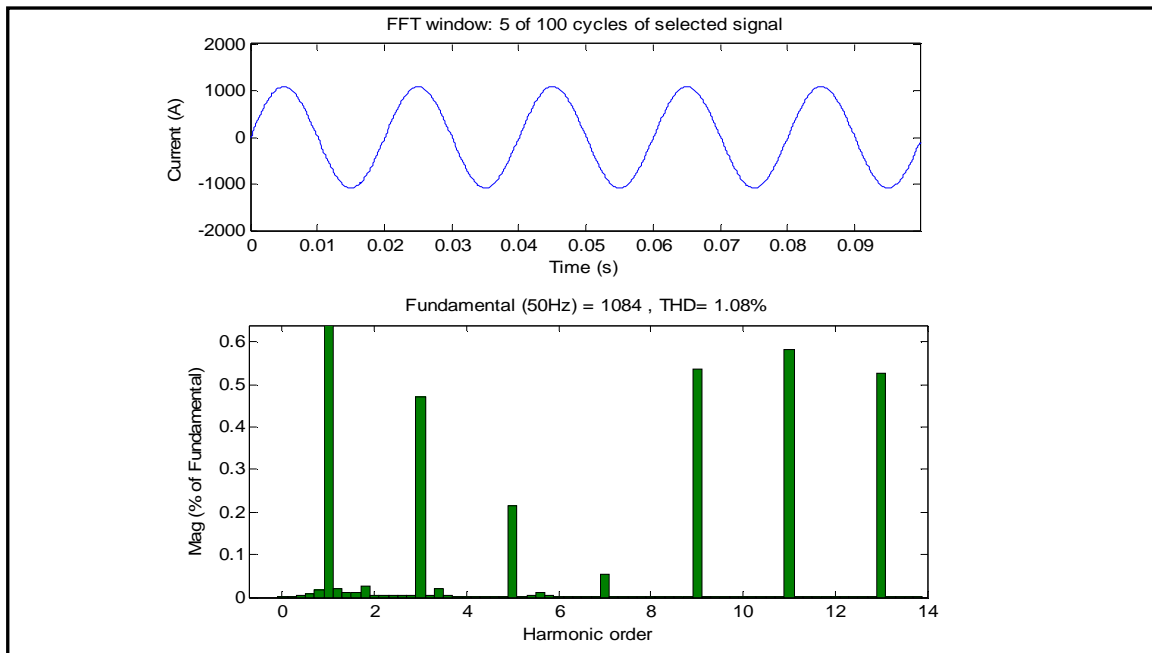
$$r = \sqrt{\frac{L}{q^2 C}} = 0.187 \Omega$$

$$R = \sqrt{\frac{Q^2 L}{C}} = 26.16 \Omega$$

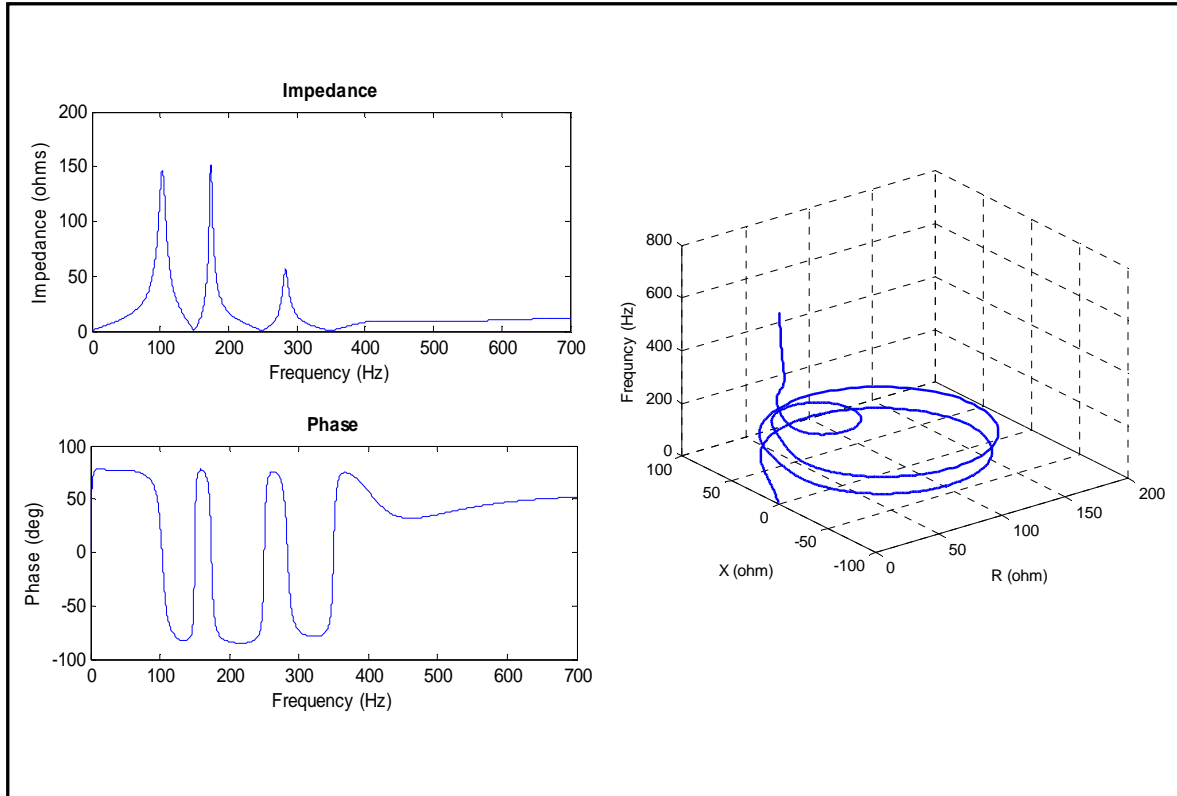
والشكل (10-4) يوضح مخطط أحادي الطور لكيفية توصيل المرشحات الأربعة على التوازي مع الحمل, كما يوضح الشكل (11-4) الطيف التوافقي للتيار المار للشبكة، حيث يلاحظ أن التوافقيات المارة للشبكة قد قلت بنسبة كبيرة، أما الشكل (12-4) فيبين العلاقة بين مقدار المعاوقة المكافئة للشبكة بالنسبة للحمل وبين التردد، حيث يلاحظ انه عند القيم الكبيرة للمعاوقة يحدث رنين توازي، أما عند القيم الصغيرة فيحدث رنين توالي.



شكل (10-4) : توصيل المرشحات غير الفعالة على التوازي



شكل (11-4): الشكل الموجي والطيف التوافقي للتيار بعد عملية الترشيح



شكل(4-12):العلاقة بين المعاوقة المكافئة للشبكة والتردد

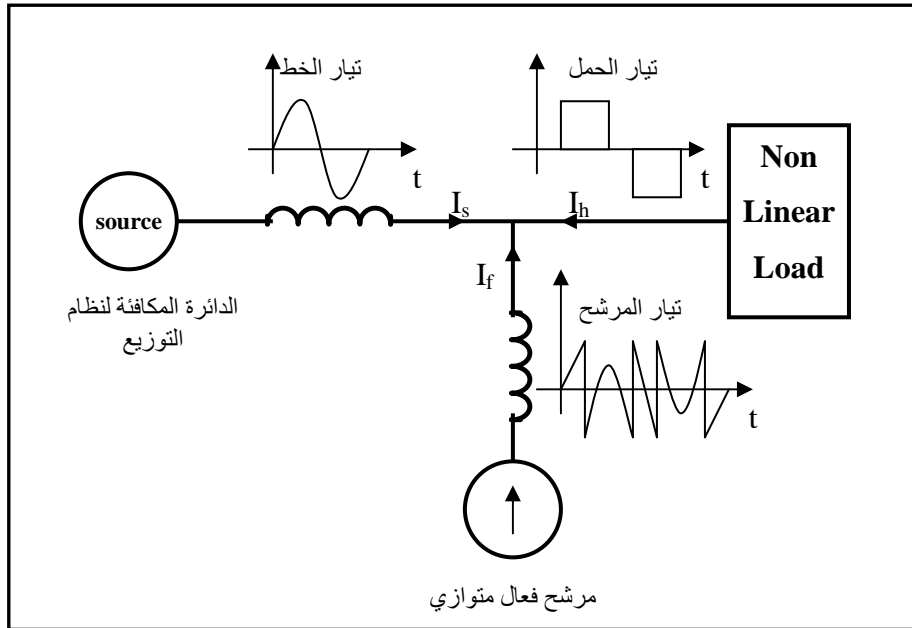
#### 5-4 المرشحات الفعالة [11,10] :- Active Power Filters

وهي عبارة عن دوائر كهربائية تحتوي على عناصر غير خطية مثل الثايرستورات أو الثنائيات ، وتستخدم هذه الدوائر لإخماد التوافقيات الحادثة في المنظومة الكهربائية ، وتوصل مع الشبكة إما على التوالي أو على التوازي ، كما يمكن توصيلها على التوالي مع المرشحات غير الفعالة. وتستخدم لتعويض القدرة غير الفعالة لاحتوائها على مكثفات وملفات بجانب العناصر الغير خطية، كما تستخدم لتثبيت الجهد و المحافظة على اتزان الجهود والتيارات بالشبكة.

وتنقسم المرشحات الفعالة حسب نوع توصيلها مع الشبكة إلى ثلاث أنواع هي :-

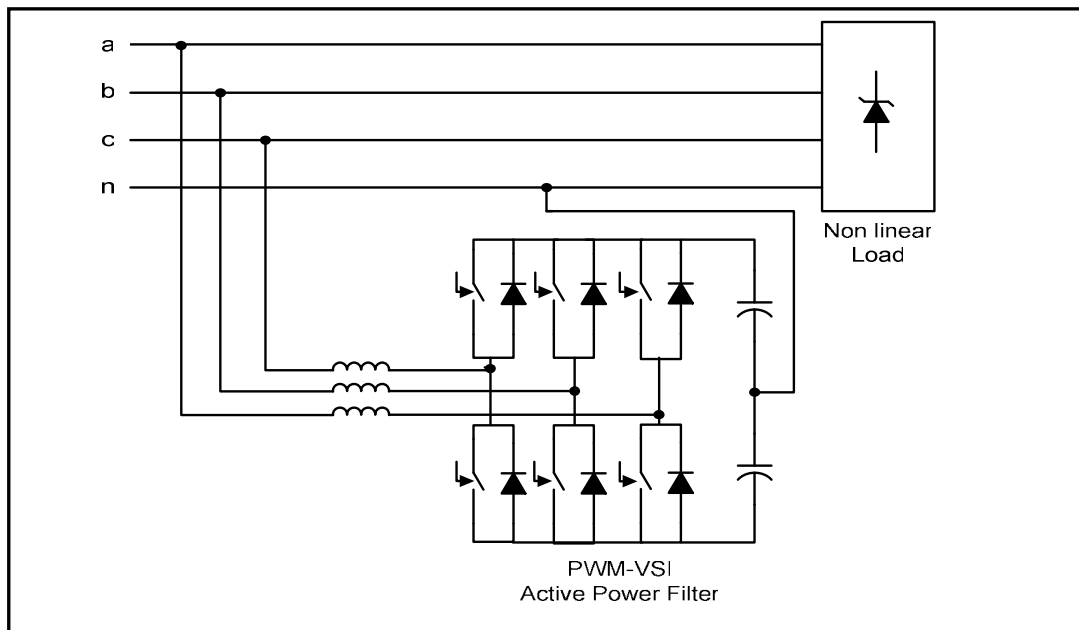
#### 1-5-4 المرشحات الفعالة المتوازية [10] :- Shunt Active Power Filters

يوصل هذا النوع من المرشحات على التوازي مع الحمل المسبب للتوافقيات ، حيث يتم حقن تيار للشبكة به توافقيات مشابهة لتلك الناتجة من الحمل اللاخطي ولكن بإزاحة في الطور مقدارها  $180^\circ$  ، فتعمل هذه التوافقيات بإلغاء التوافقيات الناتجة من الحمل اللاخطي ، وتكون محصلة التيار هي عبارة عن المركبة الأساسية فقط، والتي يعطيها المصدر. ولذلك يمكن اعتبار هذا المرشح كمصدر للتيار كما هو موضح بالشكل (4-13).



شكل (4-13): توضيح خاصية تعويض التيار لمرشح فعال متوازي

وتتكون دائرة المرشح عادةً من عاكس للجهد باستخدام تعديل عرض النبضة PWM-VSI ، حيث يتم التحكم في التيار عن طريق التحكم في زمن فتح وغلق المفاتيح الالكترونية والتي غالباً ما تكون عبارة عن ترانزستورات أو ثايرستورات، والشكل (4-14) يبين دائرة لمرشح فعال متوازي باستخدام PWM-VSI .

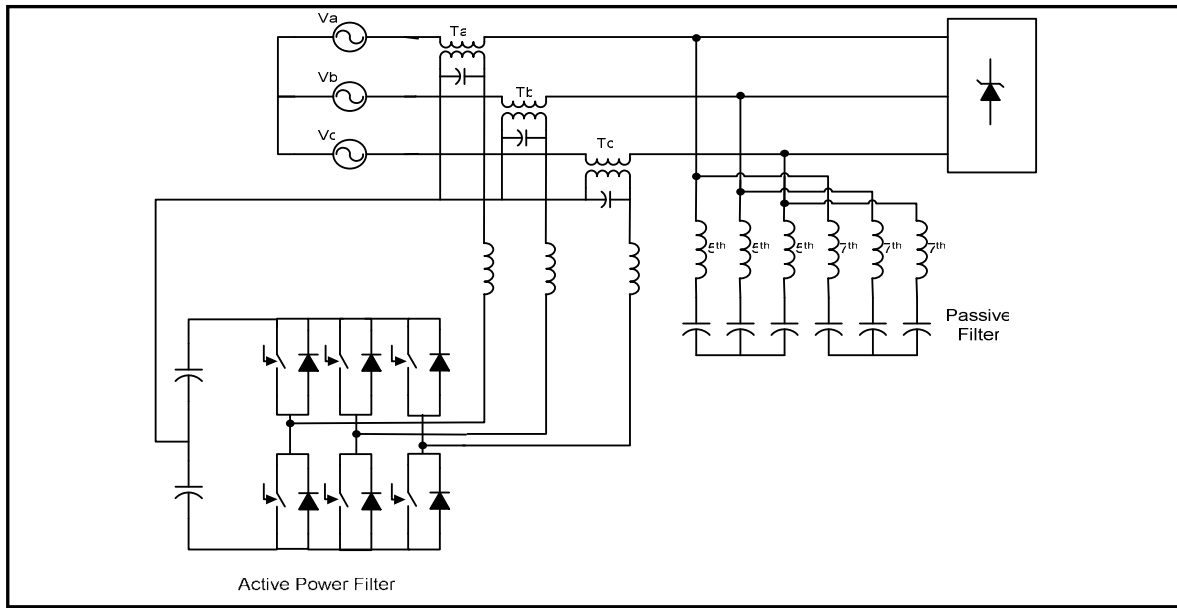


شكل (4-14): دائرة لمرشح فعال متوازي باستخدام PWM-VSI .

### 2-5-4 المرشحات الفعالة المتواليّة [10]: - Series Active Power Filters

تقوم هذه المرشحات بتعويض التيار المشوه بسبب الأحمال اللاخطية عن طريق فرض معاوقة مسار عالية لتوافقيات التيار والتي تُجبر على المرور من خلال المرشحات غير الفعالة المتصلة على التوازي مع الحمل. المعاوقة العالية المفروضة من خلال المرشح الفعال المتوالي تتكون عن طريق توليد جهد مساوي في التردد لتوافقيات التيار التي تحتاج للحذف.

ويكون هذا المرشح من عاكس للجهد باستخدام تعديل عرض النبضة PWM-VSI كما في المرشحات الفعالة المتوازية، والشكل (4-15) يوضح تركيب هذا النوع من المرشحات.



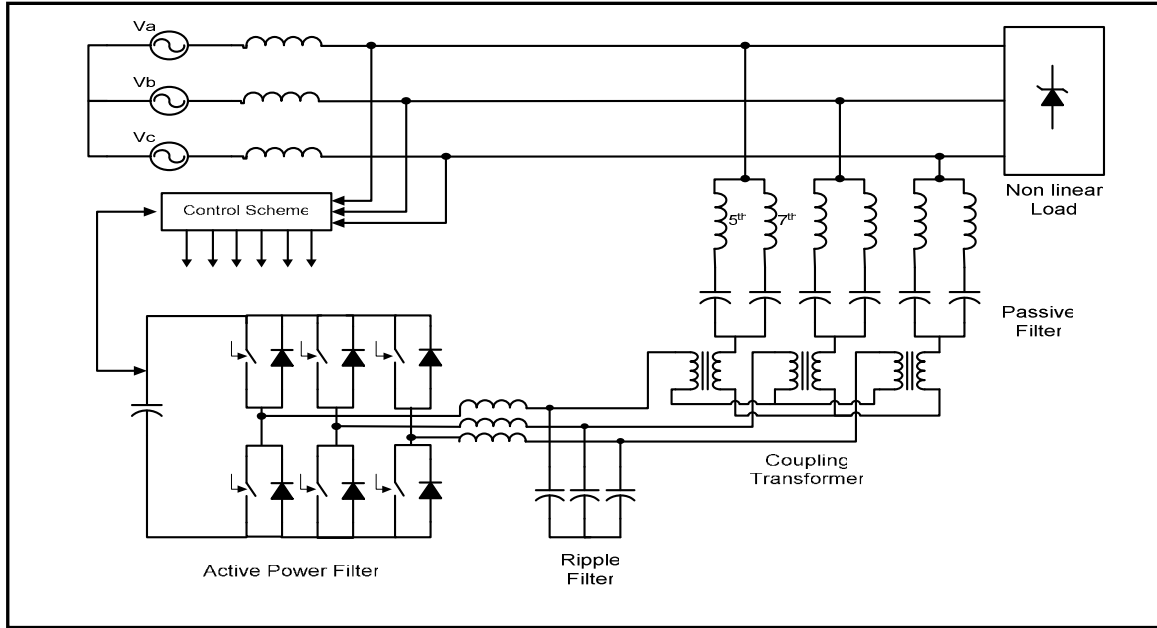
شكل (4-15) : دائرة لمرشح فعال متوالي باستخدام PWM-VSI .

### 3-5-4 المرشحات الفعالة الهجينة [11]: - Hybrid Active Power Filters

المرشحات الفعالة يمكن أن تستعمل مع المرشحات غير الفعالة لتحسين خاصية التعويض للمرشحات غير الفعالة، وتقادي إمكانية حدوث رنين توالي أو توازي غير مرغوب فيه مع الشبكة أو مع مرشحات أخرى، ومثال على هذه المرشحات موضح بالشكل (4-16).

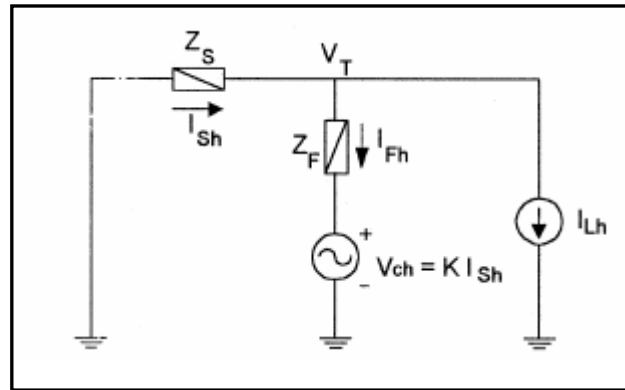
حيث توصل المرشحات الفعالة على التوالي مع المرشحات غير الفعالة، حيث يقوم المرشح الفعال بتوليد مركبات توافقية للجهد عبر الملف الابتدائي للمحول التوالي المتصل مع المرشح الغير فعال ، مما يجبر توافقيات التيار المتولدة عن طريق الحمل أن تنتقل من خلال المرشح الغير فعال بدلاً من نظام التوزيع.





شكل(4-16): دائرة لمرشح فعال هجين باستخدام PWM-VSI .

والشكل (4-17) يوضح فكرة عمل هذا النوع من المرشحات, حيث الجهد ( $V_{ch}$ ) يكون متولد بواسطة المرشح الفعال ، وهو يتناسب طرديا مع المركبات التوافقية لتيار المصدر ( $I_{sh}$ ) المراد التخلص منها .



شكل(4-17) : ترشيح توافقيات التيار باستخدام مرشح فعال هجين

$$V_{ch} = K I_{sh} \dots\dots\dots(17-4)$$

حيث ( $K$ ) كسب المرشح الفعال ووحدة قياسه بالاووم, ومن الشكل(4-12) نستطيع إيجاد ( $I_{sh}$ ) بدلالة تيار الحمل التوافقي ( $I_{Lh}$ ) ، وتكون العلاقة التي تربط التيارين هي:-

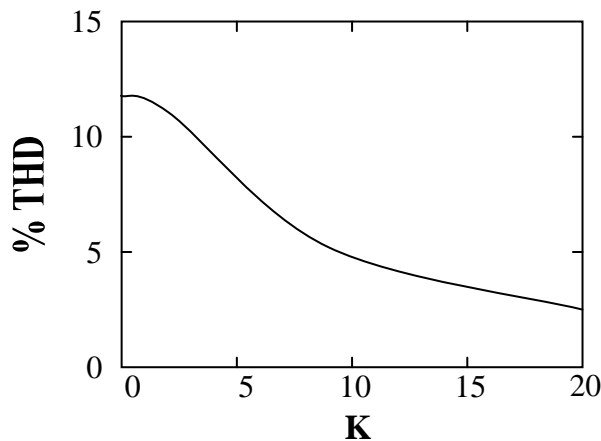
$$I_{sh} = I_{Lh} \frac{Z_f}{Z_f + Z_s + K} \dots\dots\dots(18-4)$$

حيث  $(Z_f)$  المعاوقة المكافئة للمرشح غير الفعال، وهي عادة ما تكون صغيرة و ثابتة، وتمثل  $(Z_s)$  المعاوقة المكافئة للشبكة، وهي أيضا ثابتة. لذلك يتم التحكم في مقدار الكسب للمرشح الفعال  $(K)$  ، حيث نلاحظ من المعادلة (4-18) أنه كلما زاد مقدار الكسب  $K$  كلما قلت المركبات التوافقية في تيار المصدر  $(I_{sh})$  .

ويعطى معامل التشوه الكلي للتوافقيات في هذه الحالة بالعلاقة التالية:-

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2} (I_{Lh} \cdot \frac{Z_f}{Z_s + Z_f + K})^2}}{I_{S1}} \dots\dots\dots(19-4)$$

من المعادلة السابقة نلاحظ أن معامل التشوه الكلي (THD) يتناسب عكسيا مع كسب المرشح الفعال  $(K)$  ، والشكل (4-18) يوضح العلاقة العامة بين التشوه الكلي للتوافقيات و كسب المرشح الفعال.



شكل (4-18): العلاقة بين التشوه الكلي للتوافقيات و كسب المرشح الفعال.

## الفصل الخامس

# تطبيق عملي على أفران الصهر بمصنع الحديد والصلب

**5-1 مقدمة :-**

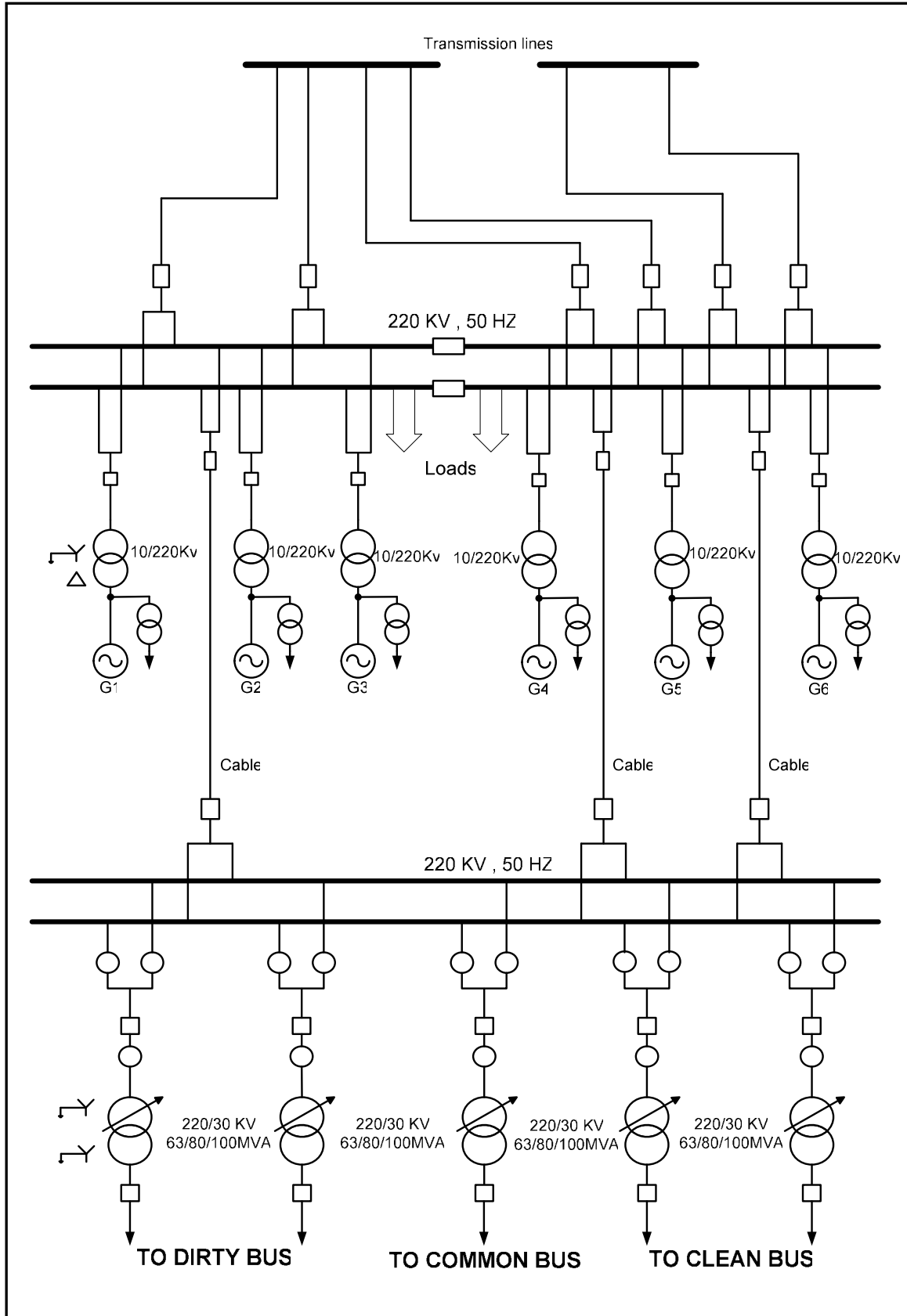
يتم إنتاج الطاقة الكهربائية بمجمع الحديد والصلب "بمصراته" عن طريق محطة بخارية سعتها 510MW، وتحتوي هذه المحطة على ستة مولدات سعة كل منها 84 MW وجهد التوليد 10 kV ، ويتم رفع جهد التوليد بواسطة ستة محولات إلى 220 kV ، وترتبط هذه المحطة بالشبكة العامة للكهرباء عن طريق مغذيين وستة خطوط نقل هوائية.

وكما هو موضح بالشكل (5-1) يتم توزيع الطاقة الكهربائية داخل المجمع عن طريق محطة توزيع رئيسية مربوطة مع محطة التوليد عن طريق ثلاث مغذيات رئيسية وهي عبارة عن كوابل معزولة بالزيت، وتقوم هذه المحطة أولاً بخفض الجهد من 220 kV إلى 30 kV عن طريق خمسة محولات قدرة وتغذي هذه المحولات خمسة قضبان ، اثنين منها مخصصة للأحمال الثابتة مثل المحركات و الإضاءة وغيرها وتعرف هذه القضبان بالقضبان النظيفة (Clean Bus) ، واثنين آخرين مخصصة لأحمال الأفران ، وتعرف بالقضبان الملوثة (Dirty Bus) ، والقضيب الآخر عبارة عن قضيب مشترك يوصل مع احدي القضبان السابقة عند الحاجة، ولكن بسبب التحميل الكبير على قضبان الأفران فإنه غالباً ما يوصل معها.

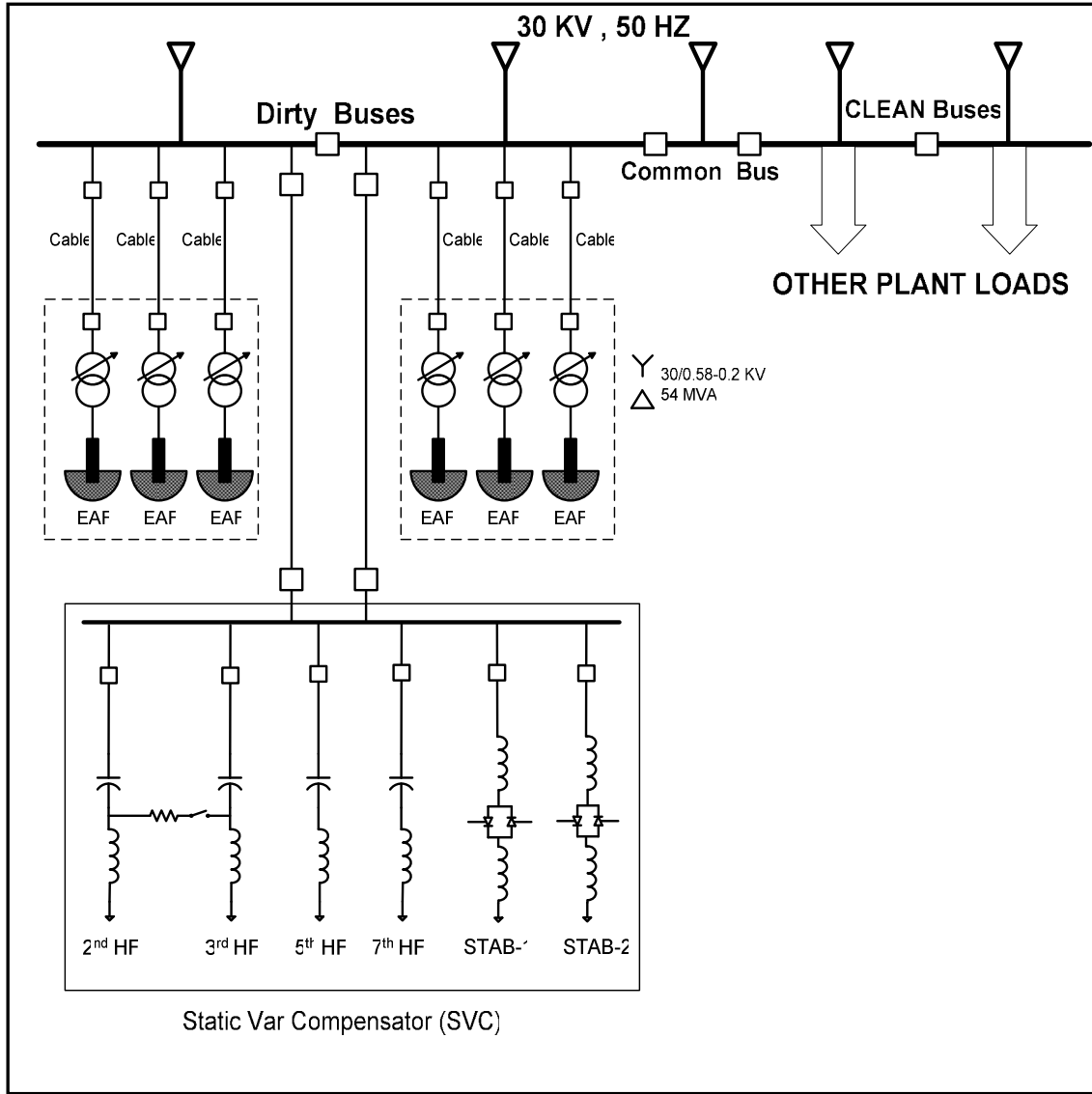
**5-2 أفران الصهر بالقوس الكهربائي بالمجمع :-**

يوجد بمجمع الحديد والصلب ستة أفران صهر بالقوس الكهربائي من نوع ذات التغذية بالتيار المتردد أو من نوع أفران الصهر بالقوس الكهربائي المباشر ، سعة كل منها 90T,45/54MVA ، ويتغذى كل فرن عن طريق محول خافض للجهد بعدد لفات متغيرة ناحية الجهد العالي بعدد خطوات 1-17 خطوة ، وموصل المحول على شكل دلتا ناحية الجهد المنخفض (ناحية الفرن) وعلى شكل نجمة غير مؤرضة ناحية الجهد العالي (ناحية الشبكة) ، والجدول المبين في الملحق (1) يوضح قيمة الجهد عند كل خطوة للمحول ومقدار الطاقة المستهلكة ومعامل القدرة للفرن محسوب عند طول قوس مثالي والذي في حدود 20 cm ، ويتصل المحول بقضيب الأفران عن طريق كابل وقاطع دائرة وعازلين.

وتوجد كل ثلاث أفران في مصنع وتسمى هذه المصانع بمصنع الصلب رقم (1) و مصنع الصلب رقم (2)، ويتصل كل مصنع بإحدى قضبان الأفران ، ويتم ربط أو فصل قضبان الأفران عن طريق قاطع دائرة وغالباً ما يكون هذا القاطع موصل إلا في حالة وجود خطأ أو صيانة في إحدى القضيبين. والشكل (5-2) يوضح طريقة توصيل الأفران الستة بالشبكة الكهربائية داخل المجمع.



شكل (1-5): نظام التوليد والتوزيع بمجمع الحديد والصلب



الشكل (2-5): طريقة توصيل الأفران الستة بالشبكة الكهربائية داخل المجمع.

### 3-5 محطة التعويض بالمجمع [2] :- Static VAR Compensator (SVC)

تسبب أفران الصهر بالقوس الكهربائي التي بالمجمع عدة مشاكل للشبكة الكهربائية ، وذلك باعتبارها أحمال غير خطية تسبب في توليد التوافقيات وكذلك تعتبر كأحمال مفاجئة تدخل على الشبكة وتؤثر على استقراريتها. وأنشأت محطة التعويض بالمجمع لتحقيق الأهداف التالية:-

- تحسين معامل القدرة بتعويض القدرة غير الفعالة.
- الحصول على تنظيم للجهد والتخلص من ظاهرة الرجفة (Flicker) .
- التخلص من التوافقيات المتولدة من أفران الصهر.

وتحتوي المحطة على أربع مرشحات للتوافقيات الثانية والثالثة والخامسة والسابعة، وهذه التوافقيات

هي الأكثر تأثيراً في الشبكة، كما تحتوي أيضاً على مثبتين للجهد وهما عبارة عن ملفات موصلة على شكل

دلنا سعة كل مثبت 90 MVAR ، وتتغذى المحطة عن طريق مغذيين بجهد 30 kV ويتم فصل و توصيل المحطة باستخدام قواطع غاز سادس فلوريد الكبريت (SF6) بتيار مقنن 2500A وجهد 30KV ، والشكل(5-3) يبين تركيب محطة التعويض بمجمع الحديد والصلب.

سعة محطة التعويض 152 MVAR ، ويتم التحكم في مقدار القدرة غير الفعالة التي تساهم بها المحطة عن طريق مثبتين سعتهما الكلية 180MVAR ، ولتحسين معامل القدرة للحمل (الأفران) يجب أن تكون القدرة غير الفعالة المطلوبة من الأفران الستة والمثبتين مساوية للقدرة غير الفعالة التي تساهم بها المرشحات، وبما أننا لا نستطيع التحكم في القدرة غير الفعالة المطلوبة من قبل الأفران وكذلك القدرة المساهم بها من قبل المرشحات، فإنه يتم التحكم في القدرة المطلوبة من قبل المثبتين عن طريق التحكم في القيمة الفعالة للتيار المار بالمثبت بواسطة تغيير زاوية إشعال الثايروستورات ، مما يسبب في تولد توافقيات من المثبتين.

والشكل(5-4) يوضح قياسات مختلفة للقيمة الفعالة للجهد على قضيب الأفران و مقدار الهبوط الحاصل عند بدأ عمل الفرن عند زمن 4.5 ثانية ، كما يوضح التغير في القيمة الفعالة للتيارات التي يسحبها الفرن من الشبكة وكذلك التيار المار في مثبت الجهد بمحطة التعويض عند عملها في وضع التشغيل الجزئي، حيث نلاحظ أن القيمة الفعالة للتيار المار في مثبت الجهد تقل بزيادة التيار الذي يسحبه الفرن. وذلك لتصحيح معامل القدرة.

### 5-3-1 طرق تشغيل محطة التعويض :-

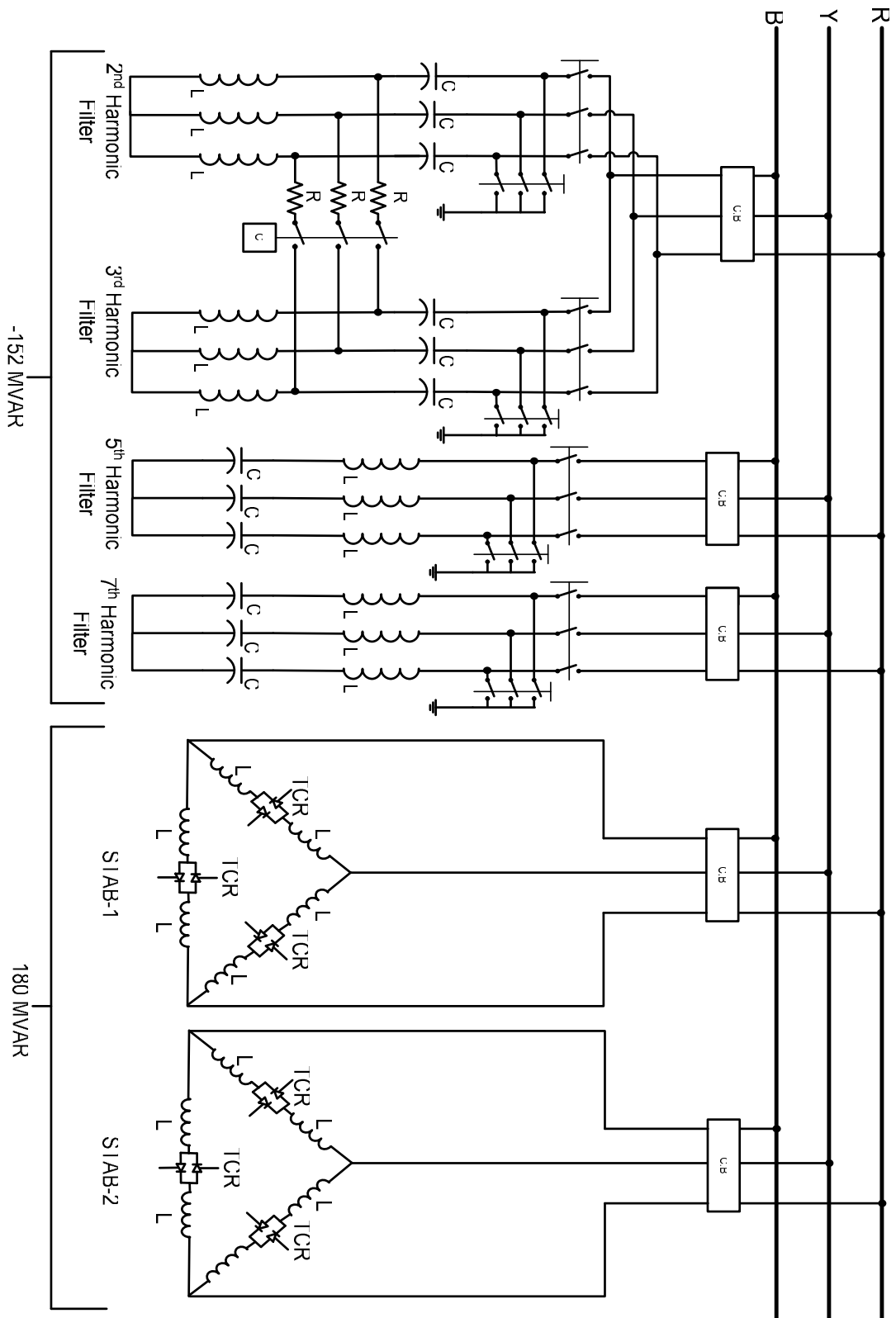
يتم تشغيل المحطة على نطاقين للتشغيل هما :-

#### أ- التشغيل الجزئي :-

في هذا التشغيل يستخدم أحد المغذيات لتغذية المحطة وأحد المثبتات وجميع مرشحات التوافقيات ماعدا مرشح التوافقية السابعة، ويستخدم هذا التشغيل عند حدوث أعطال في أحد أجزاء المحطة أو المغذيات، وسعة المحطة في هذا الوضع من التشغيل هي 92 MVAR ، ولذلك يستخدم أحد المثبتات في التحكم بالقدرة غير الفعالة المعوضة.

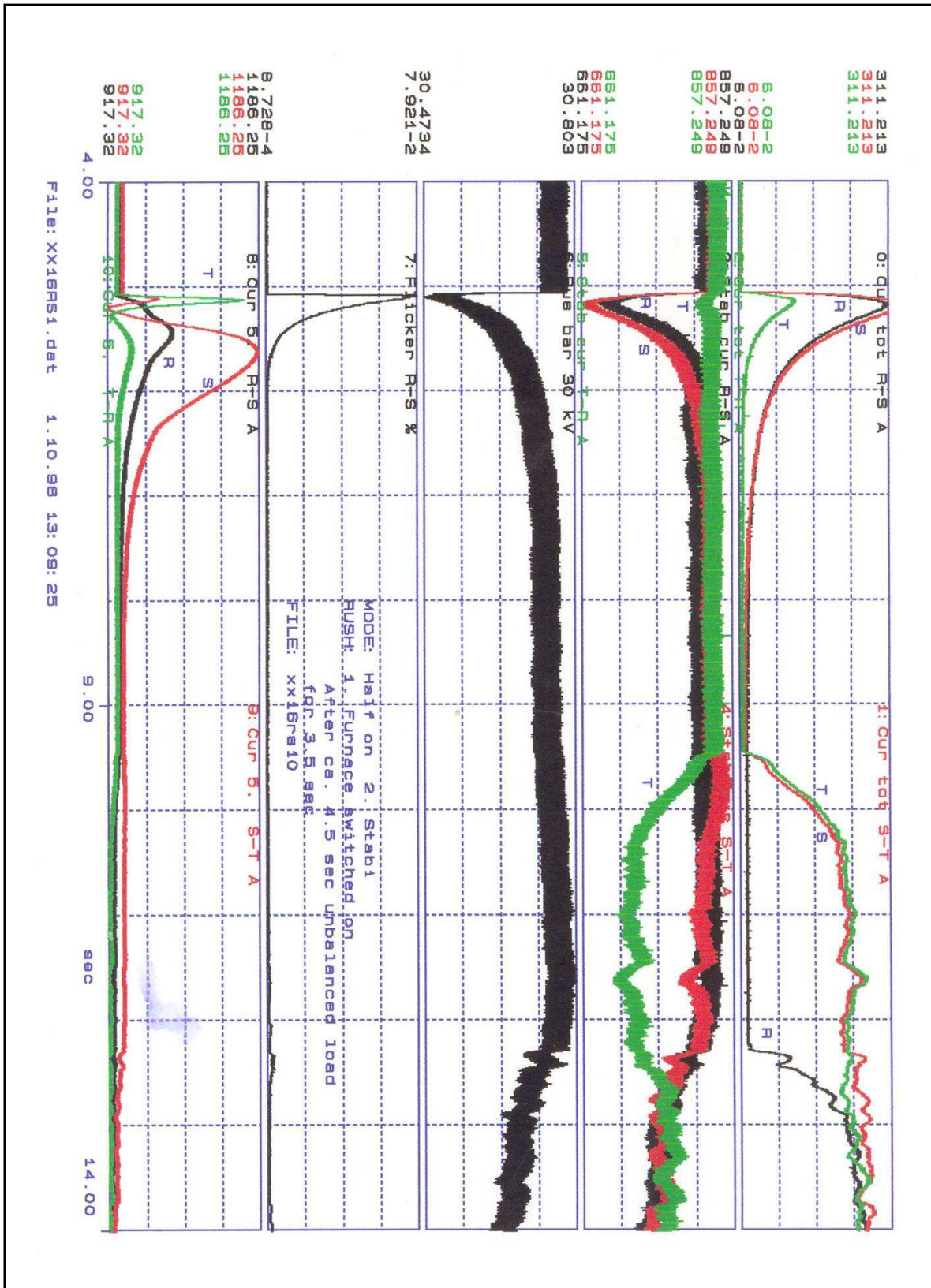
#### ب- التشغيل الكامل :-

في هذه الحالة يتم توصيل المغذيين الرئيسيين لتغذية المحطة وكذلك توصيل جميع مرشحات التوافقيات والمثبتات، ويستخدم هذا التشغيل في الوضع العادي عند عدم وجود أي مشاكل بالمحطة، وسعة المحطة في هذه الحالة حوالي 152 MVAR.



شكل (3-5): محطة التعويض للقذرة الغير فعالة بمجمع الحديد والصلب (SVC)





شكل (4-5): قياسات عملية لتيارات و جهود مختلفة من مجمع الحديد و الصلب

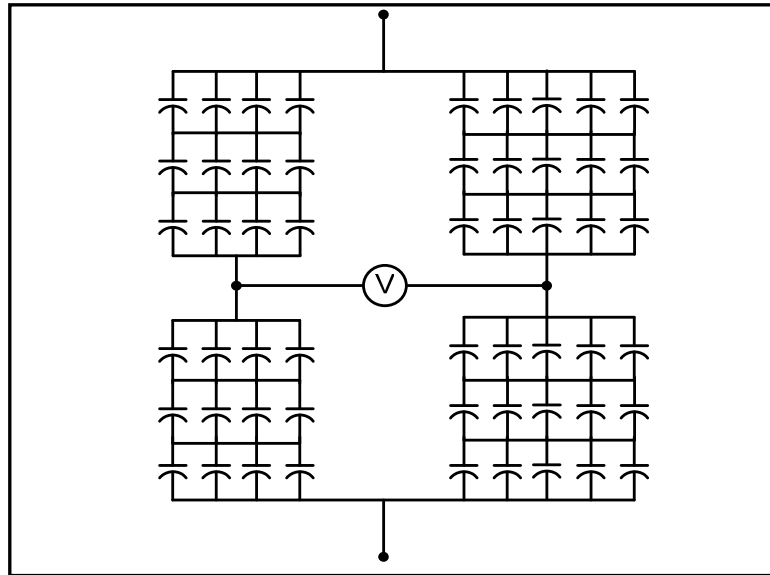
### 5-3-2 مرشحات التوافقيات بالمحطة:-

تحتوي المحطة على أربع مرشحات للتوافقيات الأكثر تأثيراً في شبكة المجمع والنااتجة عن وجود أفران الصهر، وهذه التوافقيات هي الثانية والثالثة والخامسة والسابعة، وجميع هذه المرشحات هي من النوع غير الفعال، وفيما يلي نبذة مختصرة عن تركيب كل مرشح بالمحطة :-

#### أ- مرشح التوافقية الثانية :-

نوع هذا المرشح هو مرشح إمرار نطاقي بتردد رنين حوالي 100Hz ، وتعتمد قيمته على قيم المكثفات وقيمة المحاثة المتغيرة المستخدمة، وموصل هذا المرشح على هيئة نجمة غير مؤرضة ويكون توصيل النجمة ناحية الملفات.

من الجدول المبين في الملحق (2) نلاحظ أن قيمة المتسعات المستخدمة هي 22.24μF لكل مكثف، وقيمة المحاثة لكل طور عند خطوة 100% هي 83.51mH ، وعند خطوة 90% هي 75.159mH ، وللحصول على تردد الرنين للمرشح عند قيمة حوالي 100Hz فإنه يجب توصيل المكثفات كما هو موضح بالشكل (5-5).



شكل (5-5): توصيل مكثفات كل طور لمرشح التوافقية الثانية

وتكون قيمة السعة الكلية لكل طور هي :

$$C = \frac{22.24 \times 5}{6} + \frac{22.24 \times 4}{6} = 33.36 \mu F$$

ويمكن حساب تردد الرنين للمرشح عند خطوات مختلفة للمحاثة وذلك بالتعويض في المعادلة (3-4) كالتالي :-

• عند خطوة 100% :-

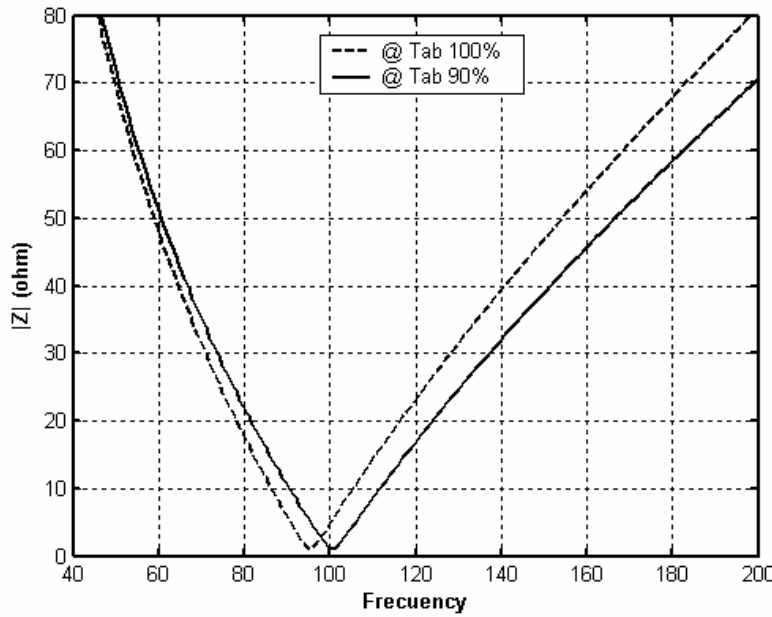
$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{83.51 \times 10^{-3} \times 33.36 \times 10^{-6}}} = 95.35 \text{ Hz}$$

• عند خطوة 90% :-

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{75.159 \times 10^{-3} \times 33.36 \times 10^{-6}}} = 100.51 \text{ Hz}$$

الشكل (5-6) يوضح العلاقة بين مقدار معاوقة المرشح والتردد عند خطوة للمحاثنة 100% و 90% ، ولحساب القدرة غير الفعالة التي يساهم بها هذا المرشح نعوض في المعادلة (4-5) كالتالي :-

$$Q_{\text{var}} = \frac{-(2)^2}{(2)^2 - 1} \times (30 \times 10^3)^2 \times 2\pi \times 50 \times 33.36 \times 10^{-6} = -12.58 \text{ MVAR}$$



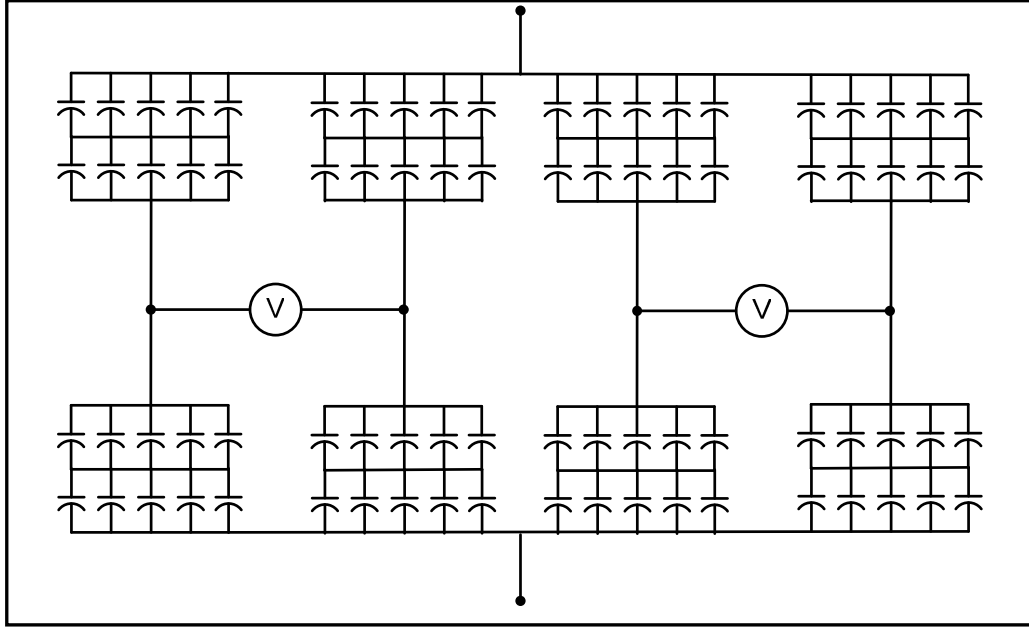
شكل (5-6): تغير مقدار معاوقة مرشح التوافقية الثانية مع التردد

ويتم فصل وتوصيل المرشح عن طريق عازل ذو جهد مقنن 30KV و تيار 2500A ، ويكون يدوي التشغيل ومعه مفتاح للتأريض للتخلص من الشحنة الموجودة على المكثفات.

#### ب- مرشح التوافقية الثالثة:-

نوع هذا المرشح هو مرشح إمرار نطاقي بتردد رنين حوالي 150Hz ، وتعتمد قيمته على قيم المكثفات وقيمة المحاثنة المتغيرة المستخدمة، وموصل هذا المرشح على هيئة نجمة غير مؤرضة ويكون توصيل النجمة ناحية الملفات.

من الجدول المبين في الملحق (2) نلاحظ أن قيمة المتسعات المستخدمة هي 22.24μF لكل مكثف، وقيمة المحاثنة لكل طور عند خطوة 100% هي 11.135mH ، وعند خطوة 90% هي 10.022mH ، وللحصول على تردد الرنين للمرشح عند قيمة حوالي 150Hz فإنه يجب توصيل المكثفات كما هو موضح بالشكل (5-7).



شكل (5-7): توصيل مكثفات كل طور لمرشح التوافقية الثالثة

وتكون قيمة السعة الكلية لكل طور هي :

$$C = \frac{22.24 \times 5}{2} \div 2 \times 4 = 111.2 \mu F$$

ويمكن حساب تردد الرنين للمرشح عند خطوات مختلفة للمحاثة وذلك بالتعويض في المعادلة (4-3) كالتالي :-

• عند خطوة 100% :-

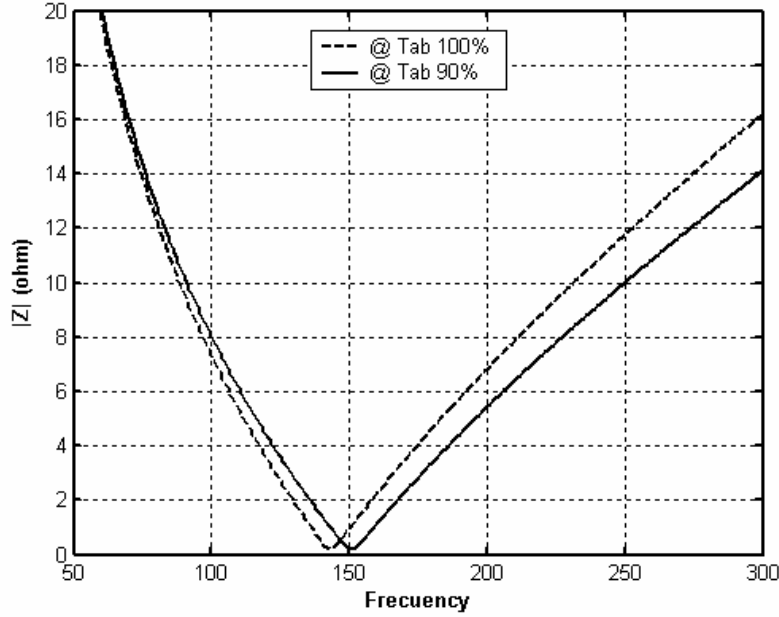
$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{11.135 \times 10^{-3} \times 111.2 \times 10^{-6}}} = 143.03 Hz$$

• عند خطوة 90% :-

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{10.022 \times 10^{-3} \times 111.2 \times 10^{-6}}} = 150.76 Hz$$

الشكل (5-8) يوضح العلاقة بين مقدار معاوقة المرشح والتردد عند خطوة للمحاثة 100% و 90%، ولحساب القدرة غير الفعالة التي يساهم بها هذا المرشح نعوض في المعادلة (4-5) كالتالي :-

$$Q_{var} = \frac{-(3)^2}{(3)^2 - 1} \times (30 \times 10^3)^2 \times 2\pi \times 50 \times 111.2 \times 10^{-6} = -35.37 MVAR$$



شكل (5-8): تغير مقدار معاوقة مرشح التوافقية الثالثة مع التردد

ويتم فصل وتوصيل المرشح عن طريق عازل ذو جهد مقنن 30KV و تيار 2500A ، ويكون يدوي التشغيل ومعه مفتاح للتأريض للتخلص من الشحنة التي بالمكثفات.

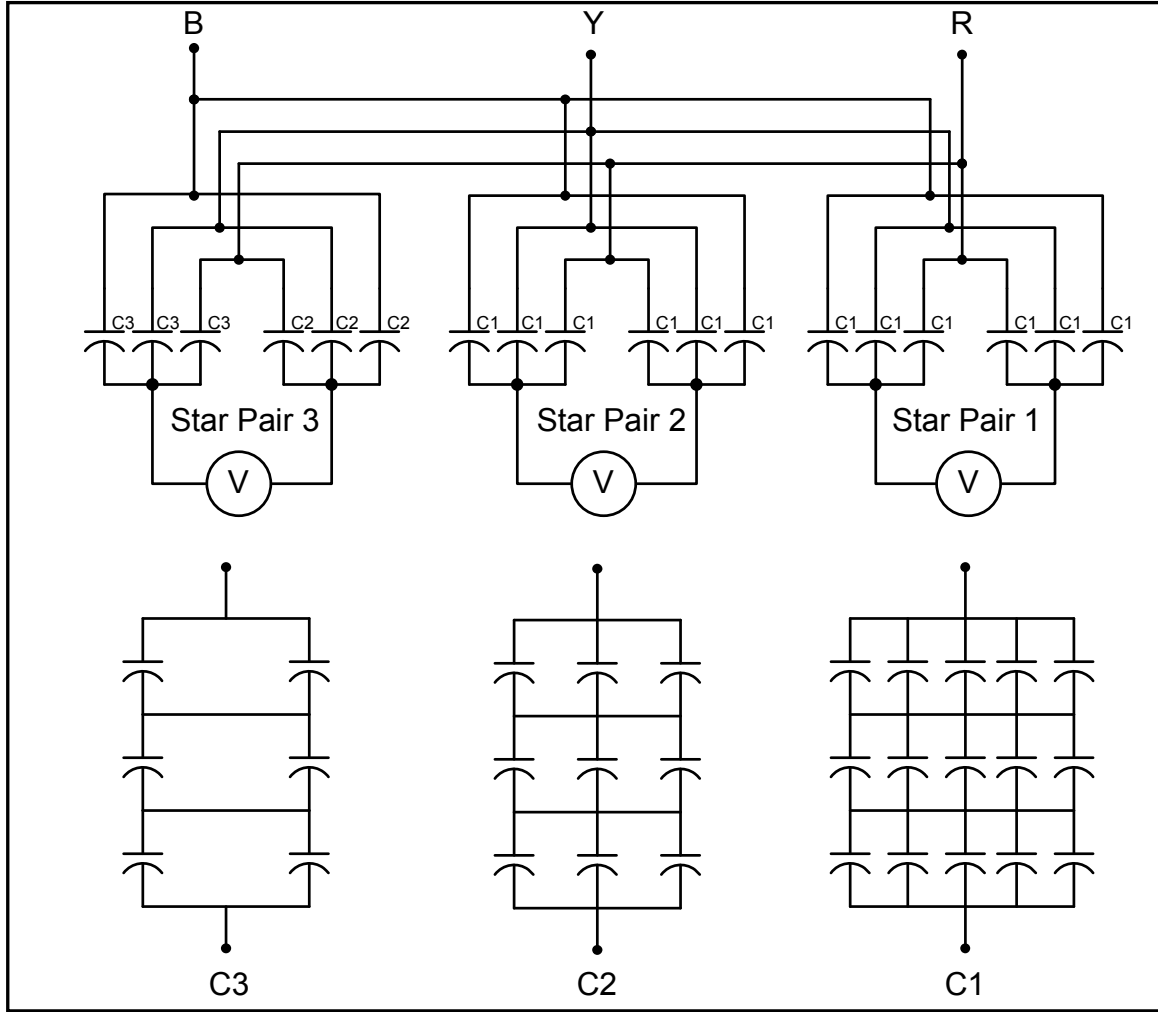
#### ج- مرشح التوافقية الخامسة :-

نوع هذا المرشح هو مرشح إمرار نطاقي بتردد رنين حوالي 250Hz ، وتعتمد قيمته على قيم المكثفات وقيمة المحاثة المتغيرة المستخدمة، وموصل هذا المرشح على هيئة نجمة غير مؤرضة ويكون توصيل النجمة ناحية المكثفات.

من الجدول المبين في الملحق (2) نلاحظ أن قيمة المتسعات المستخدمة هي 18.59μF لكل مكثف، وقيمة المحاثة لكل طور عند خطوة 100% هي 2.921mH ، وعند خطوة 90% هي 2.629mH ، وللحصول على تردد الرنين للمرشح عند قيمة حوالي 250Hz فإنه يجب توصيل المكثفات كما هو موضح بالشكل (5-9).

وتكون قيمة السعة الكلية لكل طور هي :

$$C = \frac{18.59 \times 5}{3} \times 4 + \frac{18.59 \times 3}{3} + \frac{18.59 \times 2}{3} = 154.92 \mu F$$



شكل (5-9): توصيل مكثفات كل طور لمرشح التوافقية الخامسة

ويمكن حساب تردد الرنين للمرشح عند خطوات مختلفة للمحاثة وذلك بالتعويض في المعادلة (3-4) كالتالي :-

• عند خطوة 100% :-

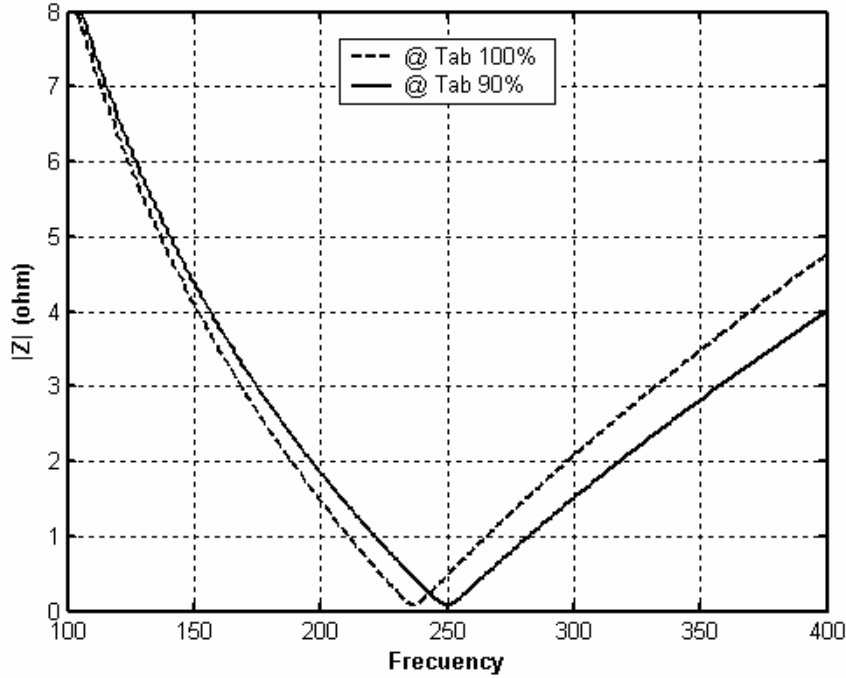
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{2.921 \times 10^{-3} \times 154.92 \times 10^{-6}}} = 236.59 \text{ Hz}$$

• عند خطوة 90% :-

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{2.629 \times 10^{-3} \times 154.92 \times 10^{-6}}} = 249.39 \text{ Hz}$$

الشكل (5-10) يوضح العلاقة بين مقدار معاوقة المرشح والتردد عند خطوة للمحاثة 100% و 90%، ولحساب القدرة غير الفعالة التي يساهم بها هذا المرشح نعوض في المعادلة (4-5) كالتالي :-

$$Q_{\text{var}} = \frac{-(5)^2}{(5)^2 - 1} \times (30 \times 10^3)^2 \times 2\pi \times 50 \times 154.92 \times 10^{-6} = -45.63 \text{ MVAR}$$



شكل (5-10): تغيير مقدار معاوقة مرشح التوافقية الخامسة مع التردد

ويتم فصل وتوصيل المرشح عن طريق عازل ذو جهد مقنن 30KV و تيار 2500A ، ويكون يدوي التشغيل ومعه مفتاح للتأريض للتخلص من الشحنة التي بالمكثفات.

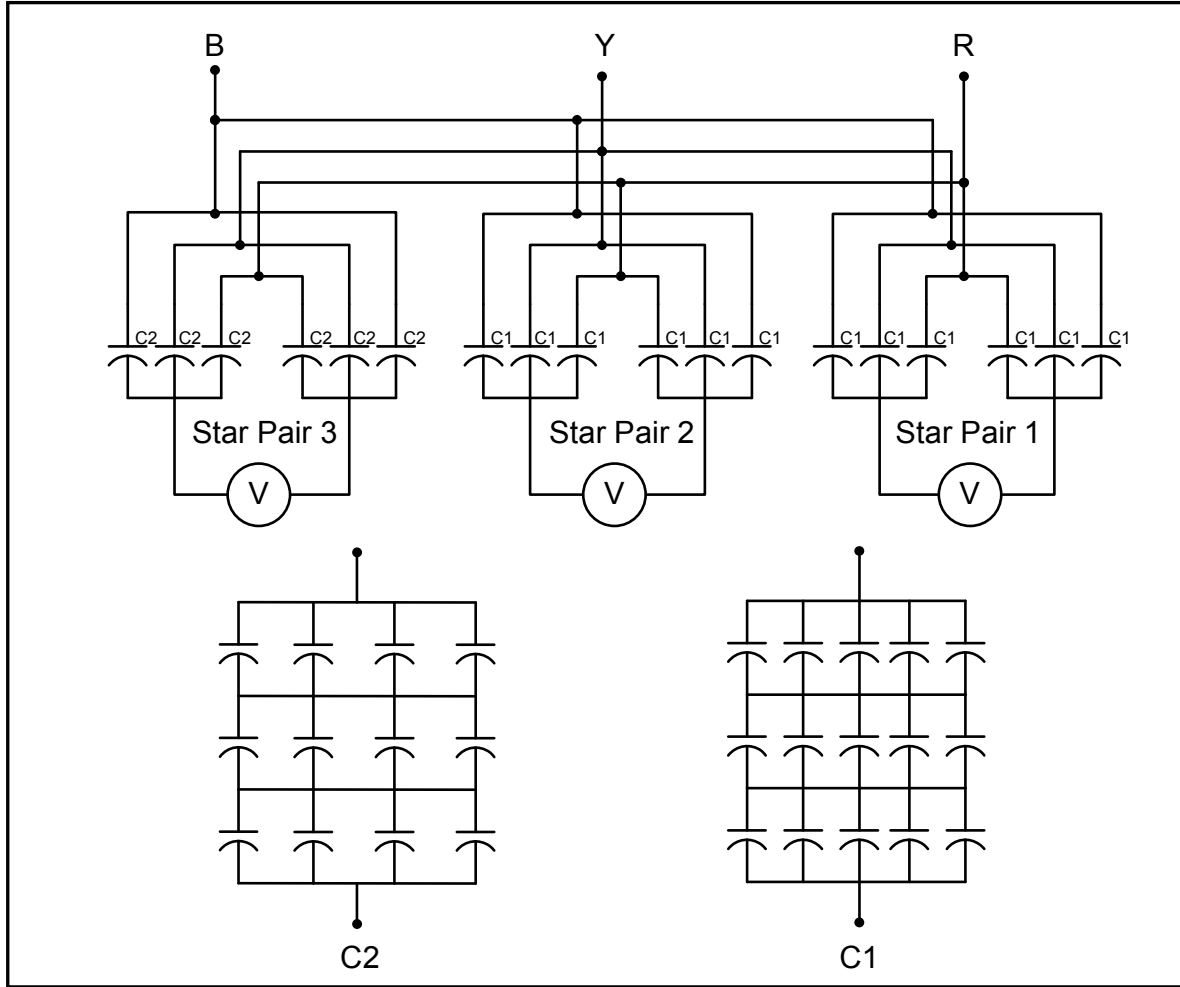
#### د - مرشح التوافقية السابعة :-

نوع هذا المرشح هو مرشح إمرار نطاقي بتردد رنين حوالي 350Hz ، وتعتمد قيمته على قيم المكثفات وقيمة المحاثة المتغيرة المستخدمة، وموصل هذا المرشح على هيئة نجمة غير مؤرضة ويكون توصيل النجمة ناحية المكثفات.

من الجدول المبين في الملحق (2) نلاحظ أن قيمة المتسعات المستخدمة هي 22.24μF لكل مكثف، وقيمة المحاثة لكل طور عند خطوة 100% هي 1.096mH ، وعند خطوة 90% هي 0.986mH ، وللحصول على تردد الرنين للمرشح عند قيمة حوالي 350Hz فإنه يجب توصيل المكثفات كما هو موضح بالشكل (5-11).

وتكون قيمة السعة الكلية لكل طور هي :

$$C = \frac{22.24 \times 5}{3} \times 4 + \frac{22.24 \times 4}{3} \times 2 = 207.57 \mu F$$



شكل (5-11): توصيل مكثفات كل طور لمرشح التوافقية السابعة

ويمكن حساب تردد الرنين للمرشح عند خطوات مختلفة للمحاثة وذلك بالتعويض في المعادلة (4-3) كالتالي :-

• عند خطوة 100% :-

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{1.096 \times 10^{-3} \times 207.57 \times 10^{-6}}} = 333.68 \text{ Hz}$$

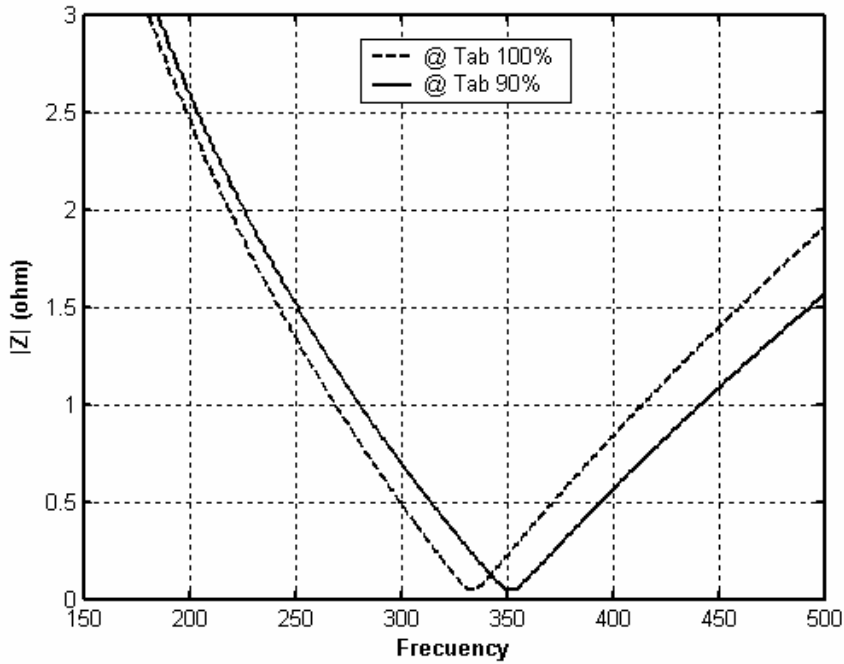
• عند خطوة 90% :-

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{0.986 \times 10^{-3} \times 207.57 \times 10^{-6}}} = 351.80 \text{ Hz}$$

الشكل (5-12) يوضح العلاقة بين مقدار معاوقة المرشح والتردد عند خطوة للمحاثة 100% و 90%، ولحساب القدرة غير الفعالة التي يساهم بها هذا المرشح نعوض في المعادلة (4-5) كالتالي :-



$$Q_{\text{var}} = \frac{-(7)^2}{(7)^2 - 1} \times (30 \times 10^3)^2 \times 2\pi \times 50 \times 207.57 \times 10^{-6} = -59.91 \text{ MVAR}$$



شكل (5-12): تغيير مقدار معاوقة مرشح التوافقية السابعة مع التردد

ويتم فصل وتوصيل المرشح عن طريق عازل ذو جهد مقنن 30KV و تيار 2500A ، ويكون يدوي التشغيل ومعه مفتاح للتأريض للتخلص من الشحنة التي بالمكثفات.

### 3-3-5 مقاومة الإخماد بالمحطة :-

يوجد بالمحطة مقاومة إخماد تعمل على توصيل مرشحي التوافقيتين الثانية والثالثة وذلك في لحظة دخول إحدى الأفران الستة على الشبكة، ويستمر هذا التوصيل لعدة ثواني ثم يتم فتح المقاومة عن طريق عازل للجهد العالي ذو جهد مقنن 30KV و تيار 2500A ، ويكون تشغيل العازل عن طريق محرك خاص، وقيمة هذه المقاومة  $500\Omega$  لكل طور.

ويتم التوصيل كما هو موضح بالشكل (5-3) عند نقطة ربط الملف بمجموعة المكثفات، وعند التوصيل يعمل المرشحين كمرشح واحد نوع مرشح إمرار نطاقين، وفائدة هذا التوصيل هو تقليل التيار المار خلال المرشحين بسبب التوافقيتين الثانية والثالثة ، وذلك بتغيير تردد الرنين قليلا عن القيمة المضبوطة ، لأنه عند بداية عمل إحدى الأفران يكون مقدار التوافقيتين الثانية والثالثة عالي والتي تسبب مع مرور الوقت في تلف مكثفات هاذين المرشحين.

ومن عيوب هذه الطريقة هو عدم ترشيح التوافقيتين الثانية والثالثة بالشكل المطلوب في فترة التوصيل، ولكن من مميزاتها أنها تقلل من التكلفة الكلية لمرشحي التوافقيتين الثانية والثالثة.

### 4-3-5 المعلومات التصميمية للمحطة :-

صممت محطة التعويض بمجمع الحديد والصلب على عدة معلومات وشروط يجب أخذها في الاعتبار هي :-

- 1- قدرة الخطأ للنظام هي 2174MVA عند قضييب التوصيل ذو الجهد 220KV .
- 2- عمل أفران الصهر السنة بالكيفية التالية :
  - اثنان منها في حالة صهر الخردة.
  - اثنان آخران في حالة صهر المادة الخام (DRI).
  - اثنان في حالة تنقية.
- 3- تقليل التوافقيات المتولدة في موجات الجهد أو التيار ، بحيث يكون مقدار معامل التشويه المسموح به بما لا يتجاوز 5% بالنسبة لموجة الجهد، أما لموجة التيار فينبغي ألا تتجاوز 20% في حالة القياس على جهد 30KV, وذلك حسب المواصفات البريطانية الموضوعة للشركة الليبية للحديد والصلب(LISCO) . أما في حالة القياس على جهد 220KV فإن أقصى قيمة لمعامل التشويه مسموح به لموجة الجهد 1.5% .
- 4- مصادر التوافقيات التي صممت المحطة على التلخص منها موضحة بالجدول (1-5) و(2-5) و(3-5)، والجدول (4-5) يبين تيارات التوافقيات التي أخذت في الاعتبار عند تصميم المرشحات.

جدول(1-5):توافقيات التيار المتوقعة بسبب فرن صهر بالقوس الكهربائي

رتبة التوافقية	تيار التوافقية (A)
2	71
3	102
4	41
5	168
6	39
7	72

جدول(2-5):توافقيات التيار المتوقعة بسبب محولات الأفران

رتبة التوافقية	تيار التوافقية (A)
2	980
3	490
4	147
5	784

جدول (3-5): توافقيات التيار المتوقعة بسبب مثبتات الجهد

رتبة التوافقية	التيار لمثبت (A)	التيار لمثبتين (A)
2	117	234
3	230	460
4	77	154
5	145	290
6	29	58
7	60	120
11	28	56
13	20	41

جدول (3-5): توافقيات التيار المشتركة التي اعتبرت في تصميم المرشحات

رتبة التوافقية	تيار التوافقية (A)
2	245
3	470
4	160
5	335
6	70
7	140
11	56
13	41

### 5-3-5 المشاكل المتعلقة بمحطة التعويض :-

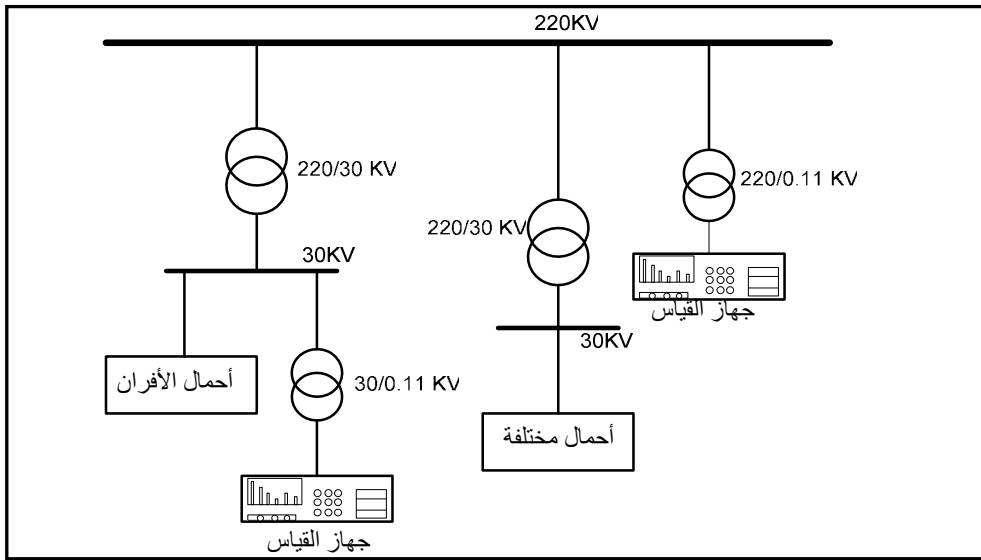
- 1- تعاني محطة التعويض بالمجمع من عدة مشاكل، أهمها المشاكل التالية:-
- 1- الفصل المتكرر للمحطة بسبب عمل مرحلات عدم اتزان الجهد المركبة على مرشحي التوافقيتين الخامسة والسابعة.
- 2- تلف المكثفات الموجودة بمرشحي التوافقيتين الخامسة والسابعة.
- 3- تلف محولات الجهد المستخدمة للقياس والحماية.
- 4- تلف المكثفات لمرشحي التوافقيتين الخامسة والسابعة بعد فصلهما عن طريق قاطع الدائرة.

### 4-5 قياس التوافقيات بالمجمع [2] :-

يوجد بالمجمع جهاز قياس للتوافقيات الموجودة في موجة الجهد أو التيار، وإعطاء قيم توافقيات الجهد أو التيار كنسبة مئوية بالنسبة للمركبة الأساسية ( $D_n$ )، كما يمكن إظهار النتائج على شاشة الجهاز مباشرة، أو طباعة النتائج على ورق باستخدام الطابعة المربوطة مع الجهاز. وكذلك يمكن للجهاز إعطاء علاقة بين

قيمة الجهد أو التيار للتوافقيات بالنسبة المئوية نسبةً للجهد أو التيار الأساسي على شكل أعمدة بيانية، يمثل المحور الأفقي درجة التوافقية والمحور العمودي الجهد أو التيار لكل توافقية بالنسبة للجهد أو التيار الأساسي. والجهاز المستخدم في المجمع يعرف باسم المحلل التوافقي لخط القدرة (power Line Harmonic Analyzer).

يتم ربط جهاز القياس على النقطة المراد قياس التوافقيات فيها، عبر محول خافض للجهد بجهد ثانوي 110V. والشكل (5-13) يوضح كيفية توصيل الجهاز على كل من قضيب التوصيل 30KV و 220KV لغرض إجراء عملية القياس.



شكل (5-13) : طريقة توصيل جهاز القياس على قضبان التوصيل المختلفة

ويمكن تلخيص خطوات تشغيل الجهاز والقياس كالآتي:-

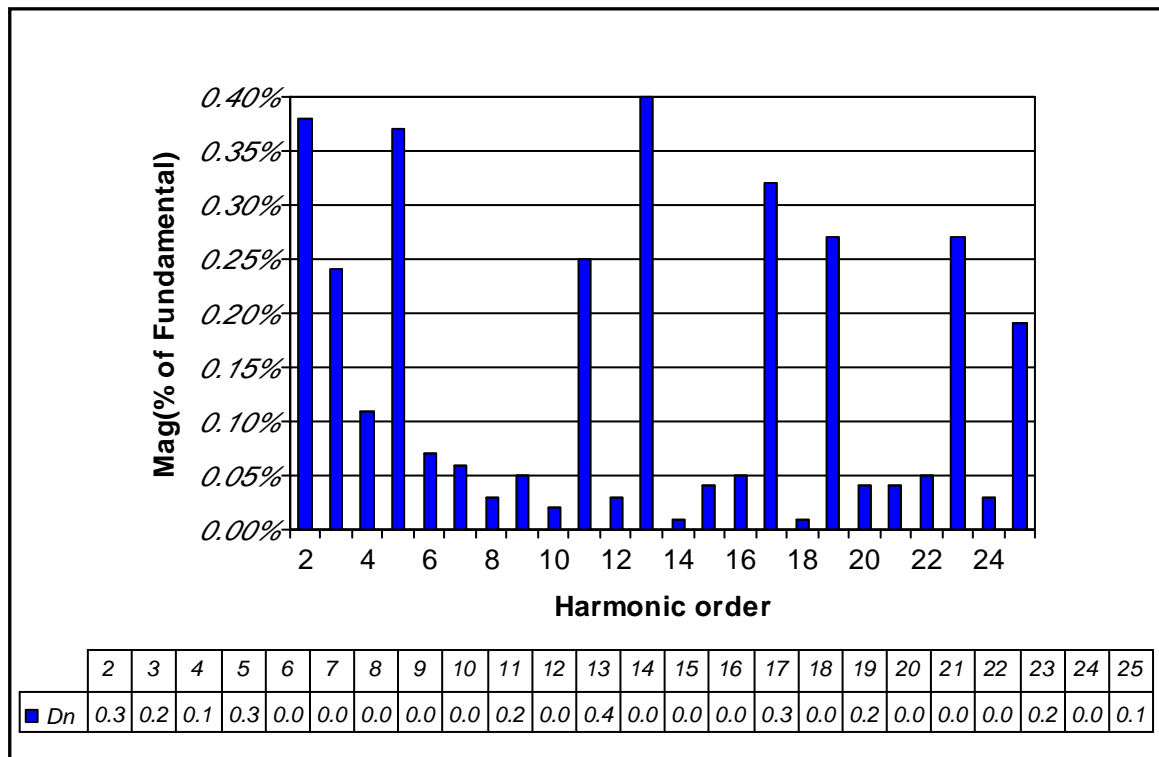
- 1- يتم ربط الجهاز عن طريق قناة مدخل الجهد على التوازي مع طورين من المحول.
- 2- يتم تعديل ذاكرة الجهاز وذلك بضبط اليوم والساعة التي تم فيها القياس ويتم تحديد مدى القياس للجهد 110V.
- 3- يتم إجراء الاختبار (Test) للجهاز وذلك للتأكد من إمكانية القياس وإجراء عملية المعايرة للجهاز.
- 4- يتم الضغط على زر البدء (Start) لبدء عملية القياس.
- 5- يتم اختيار مدى التوافقيات المطلوب قياسها من (1-25) أو من (1-50).
- 6- يتم تحديد سرعة استجابة الجهاز للإشارة الداخلة.
- 7- يتم ملاحظة القيم التي تأخذها التوافقيات المختلفة على الشاشة كأعمدة بيانية، كما يمكن اختيار التوافقية المطلوب معرفة قيمتها بالنسبة للأساس.
- 8- يتم إخراج القيم التي تأخذها التوافقيات من جهد أو تيار على ورق، وذلك بالضغط على الزر الخاص بالطابعة.

### 5-5 بعض عينات القياس للتوافقيات بالمجمع :-

تم أخذ عدد من العينات لقياس التوافقيات بشبكة الكهرباء بمجمع الحديد والصلب بمصراته ، وفي ظروف تشغيل مختلفة للأفران ، وتم القياس من قضيبي التوصيل (30KV) و(220KV). وفيما يلي بعضاً من هذه العينات التي تم الحصول عليها:

#### أ- العينة (1):-

تم أخذ هذه العينة يوم الأحد الموافق 11-03-2007م عند الساعة 10:50 صباحاً، وكانت محطة التعويض عند وضع تشغيل كامل وفي لحظة دخول الفرن الثاني على الشبكة، وتم القياس على قضيب توصيل 30KV، وكانت النتائج كما هي موضحة بالشكل (5-14).



شكل(5-14): قراءات عينة القياس (1)

من النتائج الموضحة بالشكل (5-14) يمكن حساب معامل التشويه الكلي (THD) الحاصل في الشكل الموجي وذلك حسب المعادلة (2-13) كما يلي:

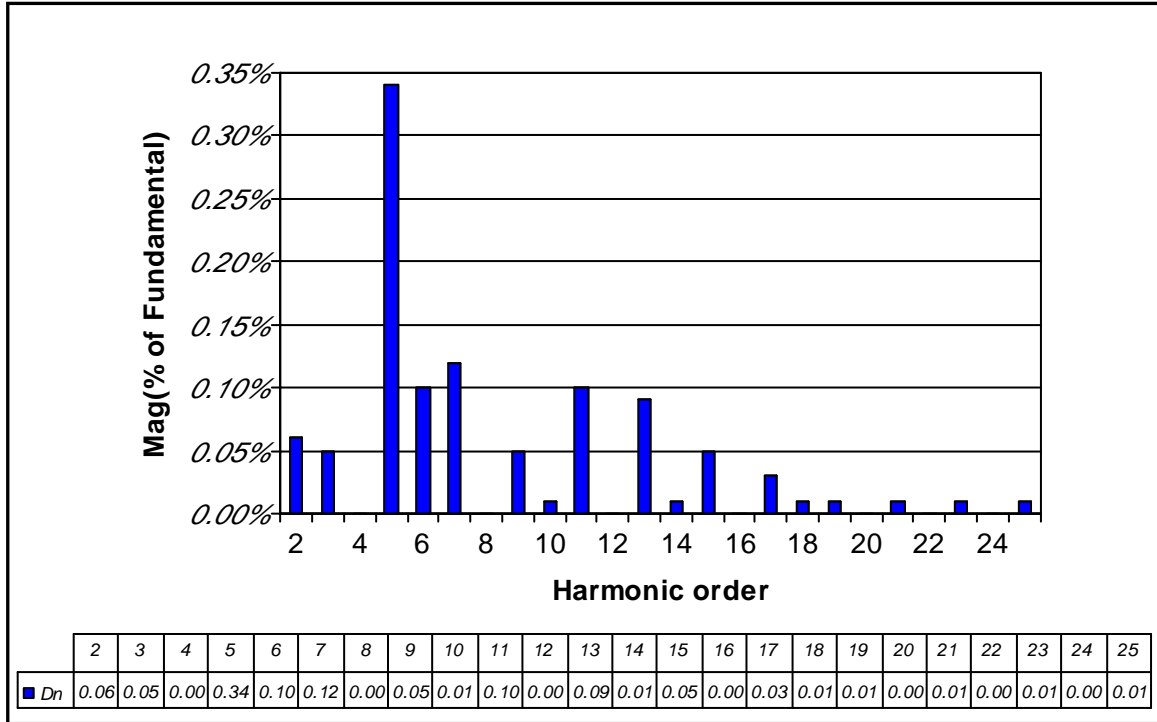
$$THD = \frac{\sqrt{0.38^2 + 0.24^2 + 0.11^2 + \dots + 0.19^2}}{100} \times 100$$

$$\therefore THD = 0.939 \%$$

نلاحظ أن معامل التشويه لموجة الجهد على قضيب القياس له قيمة مسموح بها، كما نلاحظ ارتفاع مقدار التوافقيات الفردية وذلك بسبب تشغيل محركات الدرفلة بالمجمع.

**ب- العينة (2):-**

تم أخذ هذه العينة يوم الأحد الموافق 11-03-2007م عند الساعة 10:55 صباحاً، وكانت محطة التعويض عند وضع تشغيل كامل وعدد الأفران التي تعمل هي أربعة، وتم القياس على قضيب توصيل 220KV، وكانت النتائج كما هي موضحة بالشكل (5-15).



شكل(5-15): قراءات عينة القياس (2)

من النتائج الموضحة بالشكل (5-15) يمكن حساب معامل التشويه الكلي (THD) الحاصل في الشكل الموجي وذلك حسب المعادلة (2-13) كما يلي:

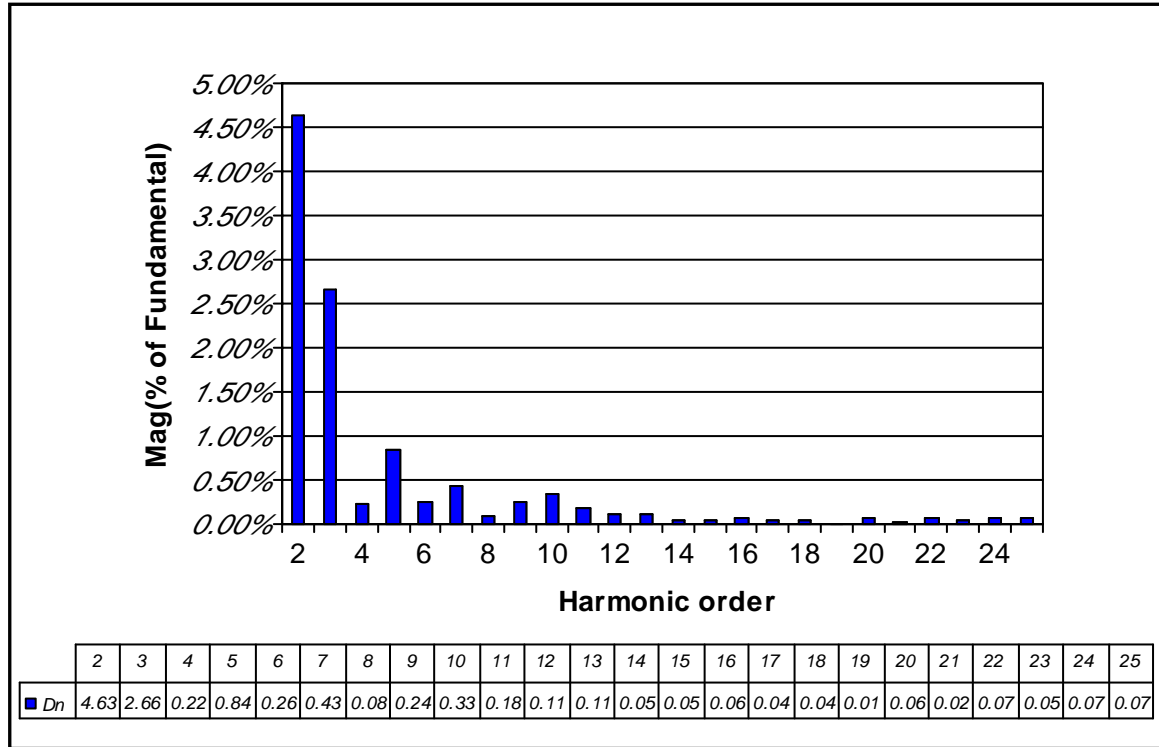
$$THD = \frac{\sqrt{0.06^2 + 0.05^2 + 0.34^2 + \dots + 0.01^2}}{100} \times 100$$

$$\therefore THD = 0.413 \%$$

نلاحظ أن معامل التشويه لموجة الجهد على قضيب القياس له قيمة مسموح بها، كما نلاحظ ارتفاع مقدار التوافقية الخامسة، وذلك بسبب عدم ضبط مرشح هذه التوافقية على تردد رنين 250Hz.

ج- العينة (3):-

تم أخذ هذه العينة يوم الأحد الموافق 03-06-2003م عند الساعة 9:46 صباحاً، وكانت محطة التعويض لا تعمل وعدد الأفران التي تعمل هي فرن واحد، وتم القياس على قضيب توصيل 30KV، وكانت النتائج كما هي موضحة بالشكل (5-16).



شكل(5-16): قراءات عينة القياس (3)

من النتائج الموضحة بالشكل (5-16) يمكن حساب معامل التشويه الكلي (THD) الحاصل في الشكل الموجي وذلك حسب المعادلة (2-13) كما يلي:

$$THD = \frac{\sqrt{4.63^2 + 2.66^2 + 0.22^2 + \dots + 0.07^2}}{100} \times 100$$

$$\therefore THD = 5.45 \%$$

نلاحظ أن معامل التشويه لموجة الجهد على قضيب القياس له قيمة أعلى من المسموح بها، كما نلاحظ ارتفاع مقدار التوافقية الثانية، وذلك بسبب عدم عمل محطة التعويض.

الفصل السادس  
**المحاكاة والنتائج**



## 6-1 مقدمة:-

أثناء دراستنا في الفصول السابقة تم التعرف على كيفية تحليل التوافقيات، وأنواع التوافقيات الناتجة عن أفران الصهر بالقوس الكهربائي في مرحلتي التشغيل، والطرق المستخدمة للحد منها وترشيحها، وتم كذلك دراسة عملية لأفران الصهر بالقوس الكهربائي الموجودة بمجمع الحديد والصلب بمصراته وكيفية ترشيح التوافقيات الناجمة عنها باستخدام محطة التعويض، وفي هذا الجزء من المشروع سوف يتم عمل محاكاة لفرن قوس كهربائي مغذى بالتيار المتردد وتوصيله بشبكة كهربائية مشابهة لتلك التي بمجمع الحديد والصلب ودراسة و تحليل التوافقيات الناجمة عن هذا الفرن في مرحلتي التشغيل الصهر الأولي والتنقية، وكذلك قبل وبعد عملية الترشيح وحساب معامل التشوه الكلي في كل حالة ، وكذلك سوف يتم رسم منحني المعاوقة مع التردد ومعرفة ترددات الرنين التوالي والتوازي التي تحدث بالشبكة في حالتها وجود قصر بين مرشحي التوافقيتين الثانية والثالثة و عدم وجوده. وهذه المحاكاة سوف تتم باستخدام برنامج حاسوبي منفذ على برنامج (MATLAB SIMULINK).

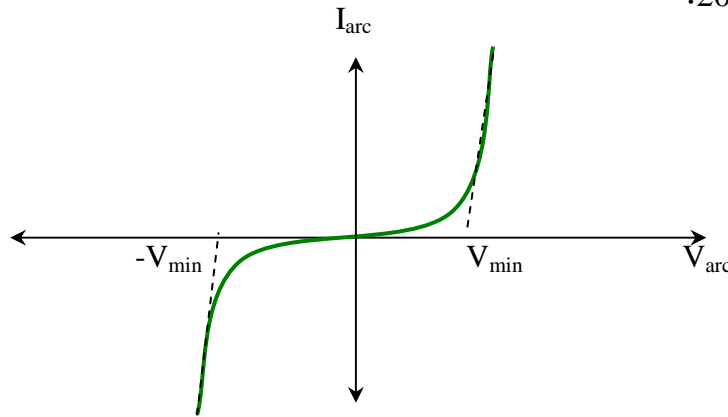
## 6-2 المحاكاة :-

إن برنامج (MATLAB SIMULINK) هو عبارة عن برنامج من ضمن عائلة (MATLAB)، وهو يحتوى على تطبيقات عديدة في مختلف أقسام الهندسة، وباستخدام هذا البرنامج سوف يتم عمل محاكاة لجزء من الشبكة الكهربائية الموجودة بمجمع الحديد و الصلب ، وهذه المحاكاة سوف تتم على مرحلتين ، المرحلة الأولى يتم فيها عمل نموذج لفرن قوس كهربائي، أما المرحلة الثانية يتم فيها توصيل هذا النموذج بالشبكة.

## 6-2-1 عمل نموذج لفرن قوس كهربائي باستخدام برنامج MATLAB SIMULINK :-

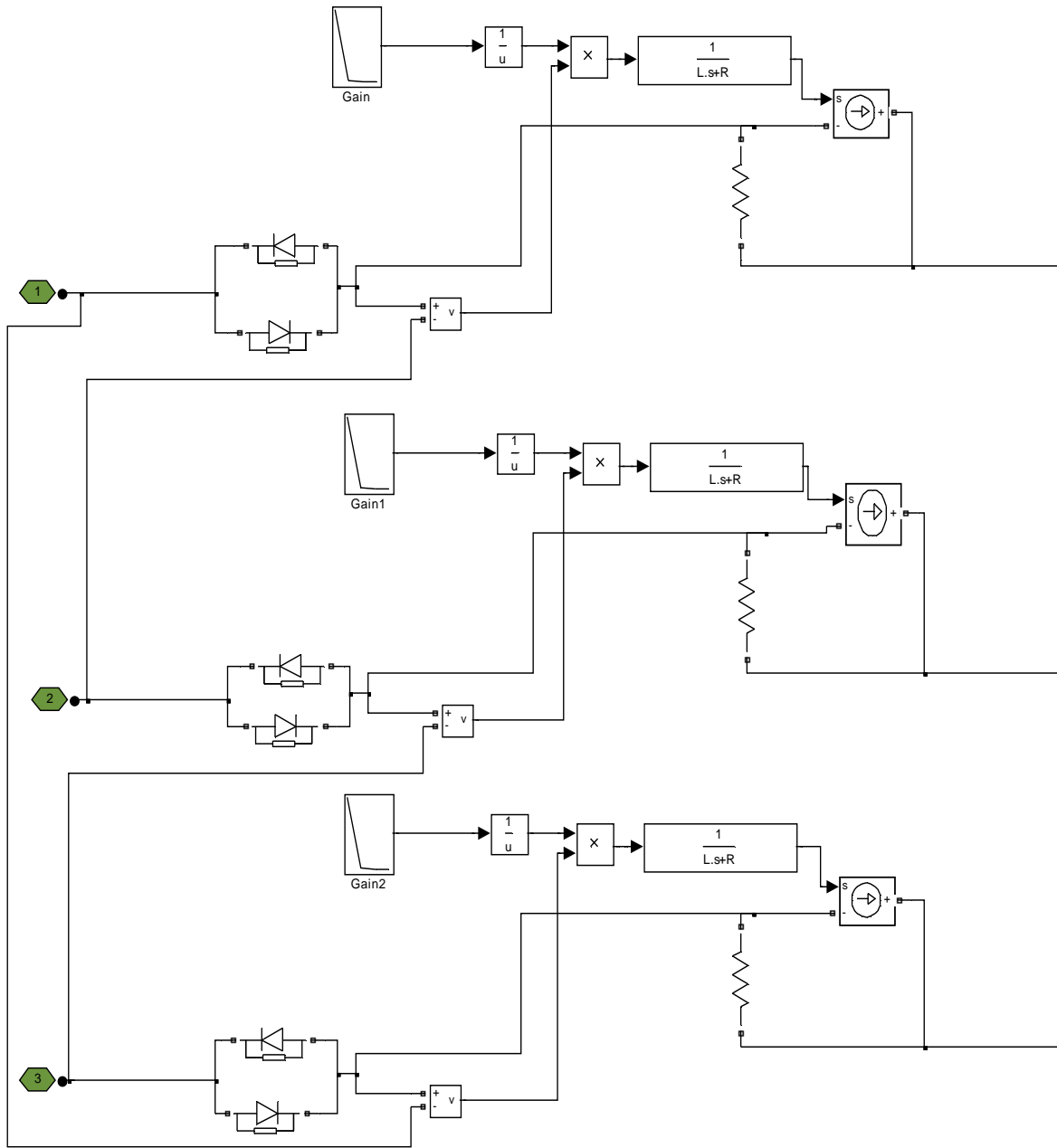
يمكن عمل نموذج تقريبي لفرن قوس كهربائي بوضع عدة فرضيات يبني عليها هذا النموذج وهي كالتالي:-

- العلاقة بين الجهد والتيار للقوس الكهربائي يمكن تقريبها كما هي موضحة بالشكل (1-6)، حيث  $V_{min}$  هو أقل قيمة للجهد الذي يشتعل عنده القوس الكهربائي والذي يتراوح ما بين 50-200 V حسب طول القوس الكهربائي، ويمكن الحصول على هذه الخصائص بتوصيل ثنائيين على التوازي بجهد داخلي تم فرضه بـ 200V.



شكل (1-6): العلاقة بين الجهد والتيار للقوس الكهربائي [12]

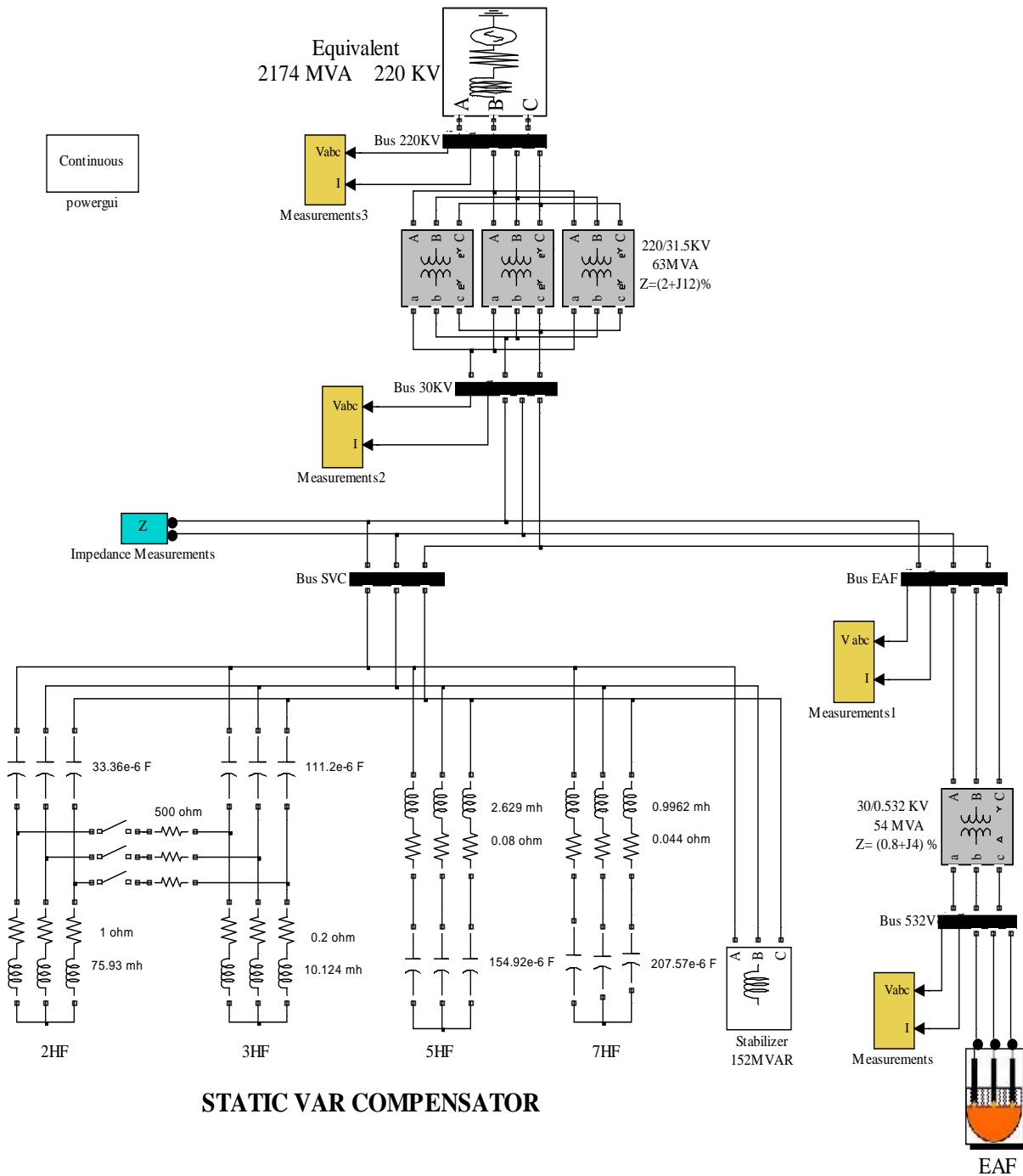
- متوسط قيمة مقاومة القوس والالكترودات حوالي  $0.006 \Omega$  أما متوسط المحاثة فيساوي  $0.019 \text{ mh}$  .
  - طول القوس الكهربائي متغير بشكل كبير في حالة الصهر الأولي ويقترب من الثبات في حالة التنقية, ويمكن تمثيل هذه الحالة بضرب إشارة التيار في كسب معين يتغير مع الزمن.
  - التيار المار في الأطوار الثلاثة غير متزن.
  - زمن عملية الصهر تم تقليصه إلى 4 ثواني, حيث تمثل كل ثانية في هذا النموذج حوالي 30 دقيقة من فترة الصهر الفعلي.
- والشكل (2-6) يبين الدائرة المكافئة لفرن قوس كهربائي .



شكل (2-6): الدائرة المكافئة لفرن صهر بالقوس الكهربائي

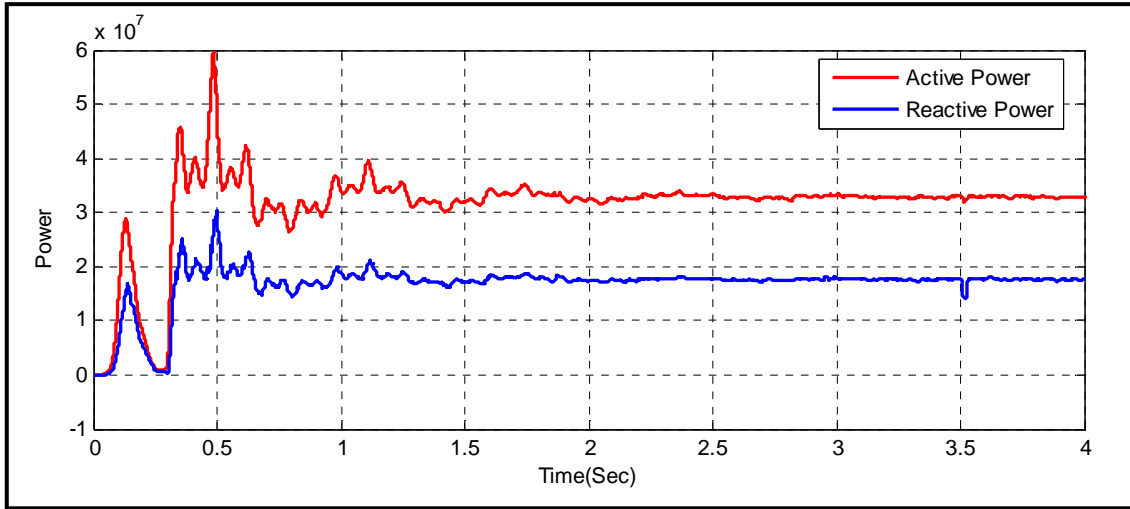
2-2-6 توصيل النموذج بشبكة كهربائية :-

بتوصيل النموذج بشبكة كهربائية مشابهة لشبكة مجمع الحديد والصلب والموضحة في الشكل (3-6). بحيث تم إهمال جميع مصادر التوافقيات ما عدا الناتجة عن الفرن، وكذلك تم فرض أن محول الفرن يعمل عند خطوة 15 بجهد 532.2V .

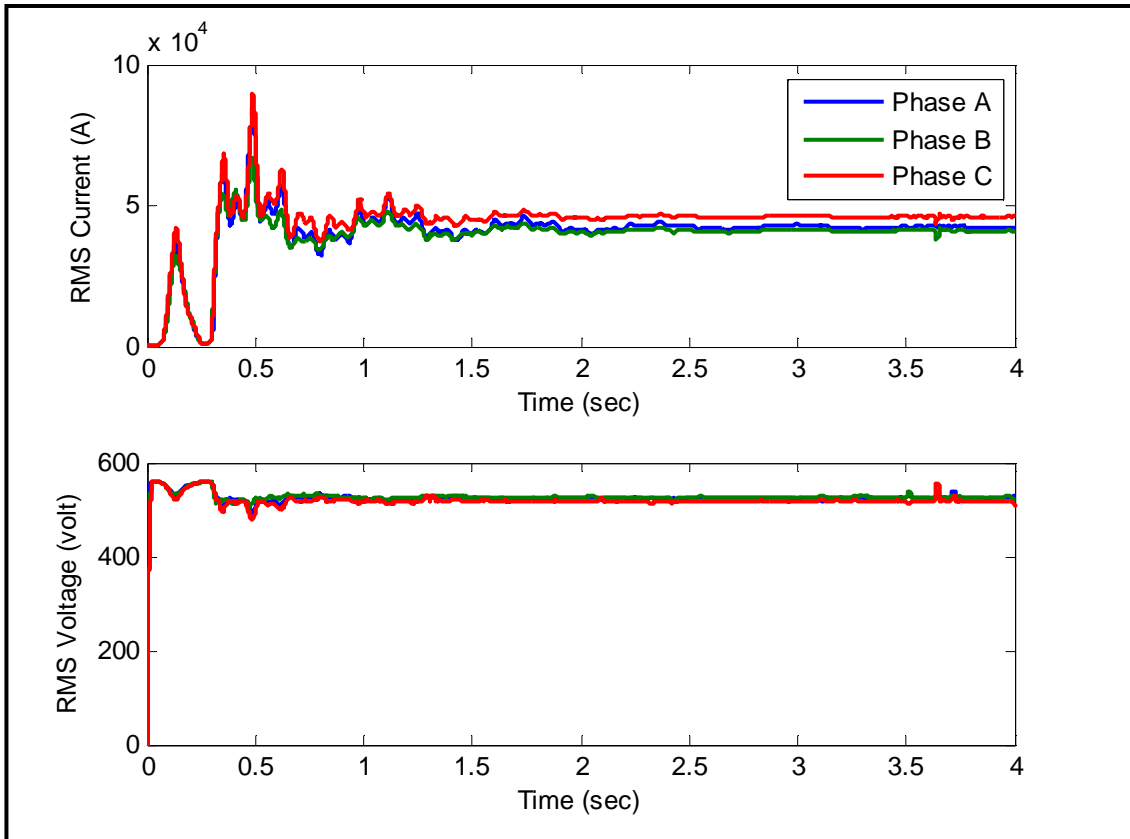


شكل(3-6):الدائرة الكهربائية المستخدمة لإجراء الدراسة

وعند قياس القدرة الفعالة وغير الفعالة المستهلكة في الفرن كما هو موضح بالشكل (4-6)، وقياس القيمة الفعالة للتيار والجهد على الملف الثانوي لمحول الفرن كما هو مبين بالشكل (5-6)، نجد أنه في الفترة من 0-1.5 ثانية تكون قيمة القدرة المستهلكة وكذلك التيار المسحوب متغيراً بشكل كبير وقد يصل إلى الصفر، وتسمى هذه الفترة بمرحلة الصهر الأولي، أما باقي فترة عملية الصهر فتسمى بمرحلة التنقية، ويكون فيها التيار أقل تغيراً وأكثر اتزاناً.

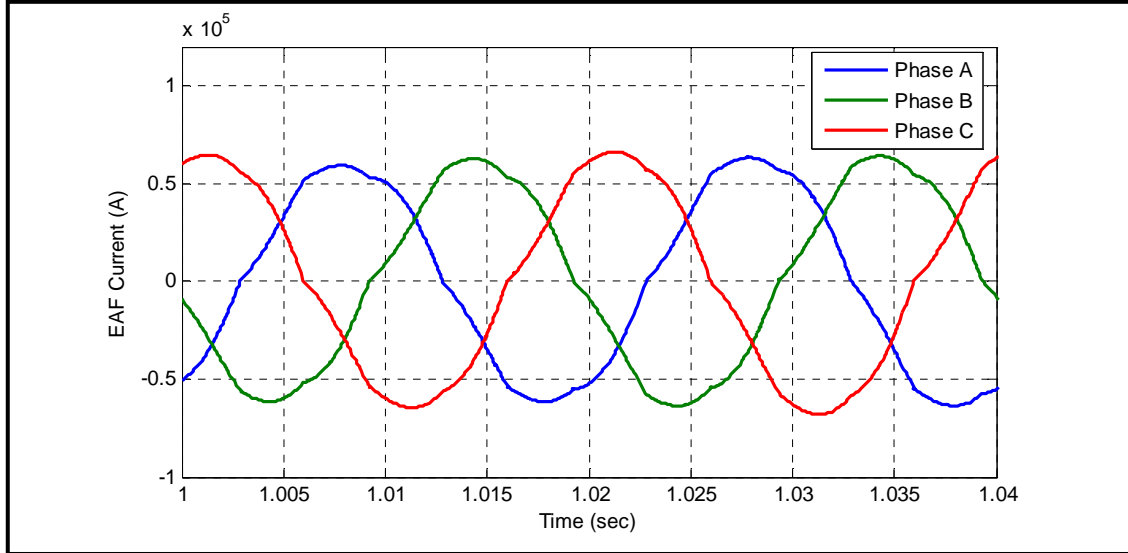


شكل (4-6) : القدرة المستهلكة في الفرن



شكل (5-6) : القيمة الفعالة للتيار والجهد على الملف الثانوي لمحول الفرن

ولتوضيح التشوه الحاصل في الشكل الموجي للتيار الذي يمر بالكترودات الفرن , تم قياس هذا التيار باستخدام راسم إشارة كما هو موضح بالشكل (6-6) , حيث نلاحظ انحراف الشكل الموجي للتيار عن الشكل الجيبي مما يسبب في وجود التوافقيات, كما نلاحظ عدم بقاء التيار عند الصفر في الفترة 200V→200- وذلك بسبب تأثير محاثة الفرن.



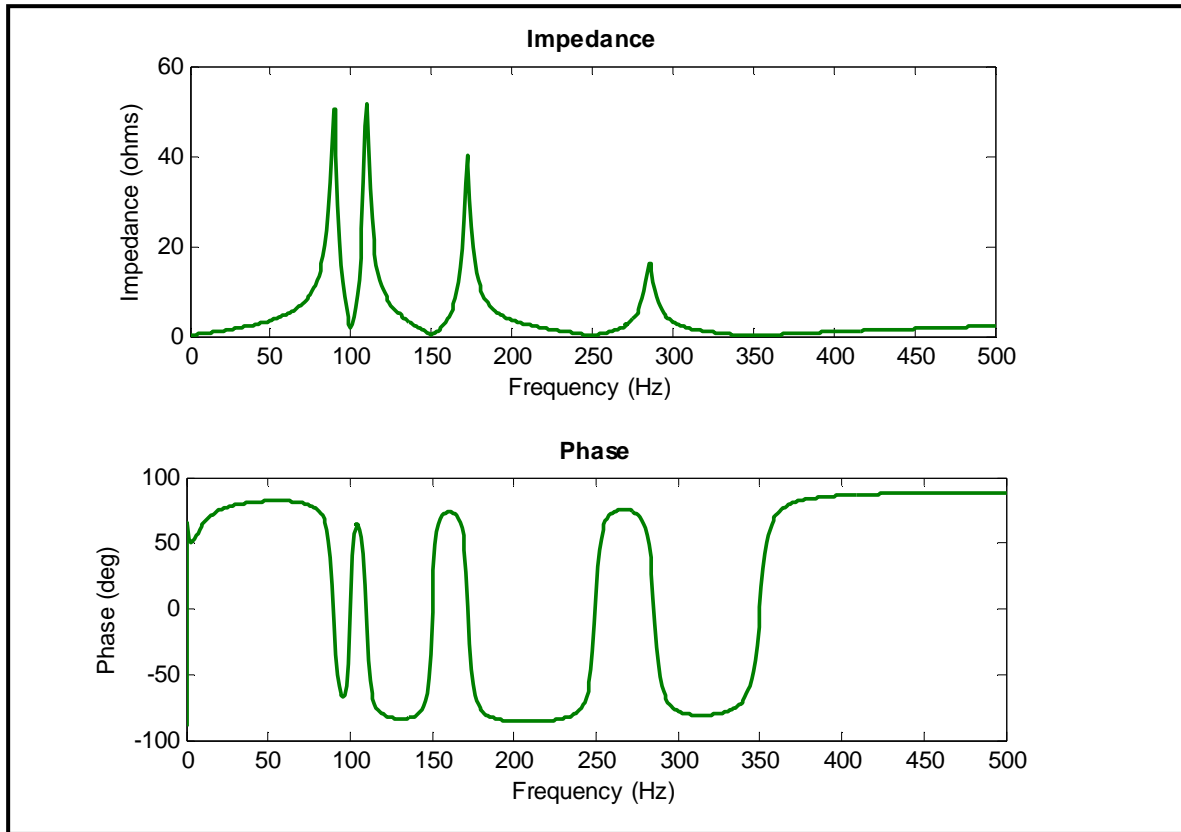
شكل (6-6) : الشكل الموجي للتيار المار في الكترودات الفرن

### 3-6 النتائج:-

بعد عمل النموذج الخاص بالفرن وتوصيله بالشبكة, سوف يتم دراسة و تحليل معاوقة الشبكة ومعرفة كيفية تغيرها مع التردد وكذلك تحليل التوافقيات الناجمة عن الفرن .

### 6-3-1 تحليل معاوقة الشبكة :-

عند قياس معاوقة الشبكة بين أي طورين عند قضيب الأفران 30KV وذلك باستخدام جهاز قياس المعاوقة (Impedance Measurement) , نجد أنها تتغير مع التردد بشكل كبير مقداراً واتجاهاً , حيث يحدث رنين توالي عندما يكون مقدار المعاوقة أقل ما يمكن أي عند نهاية صغرى , ويحدث رنين توازي عندما يكون مقدار المعاوقة أكبر ما يمكن أي عند نهاية عظمى, والشكل(6-7) يوضح التغير الحاصل في مقدار واتجاه المعاوقة في حالة عدم وجود قصر بين مرشحي التوافقيتين الثانية والثالثة, والجدول(6-1) يبين الترددات التي يحدث عندها الرنين في حالتها التوالي والتوازي والتي تسببها المرشحات.

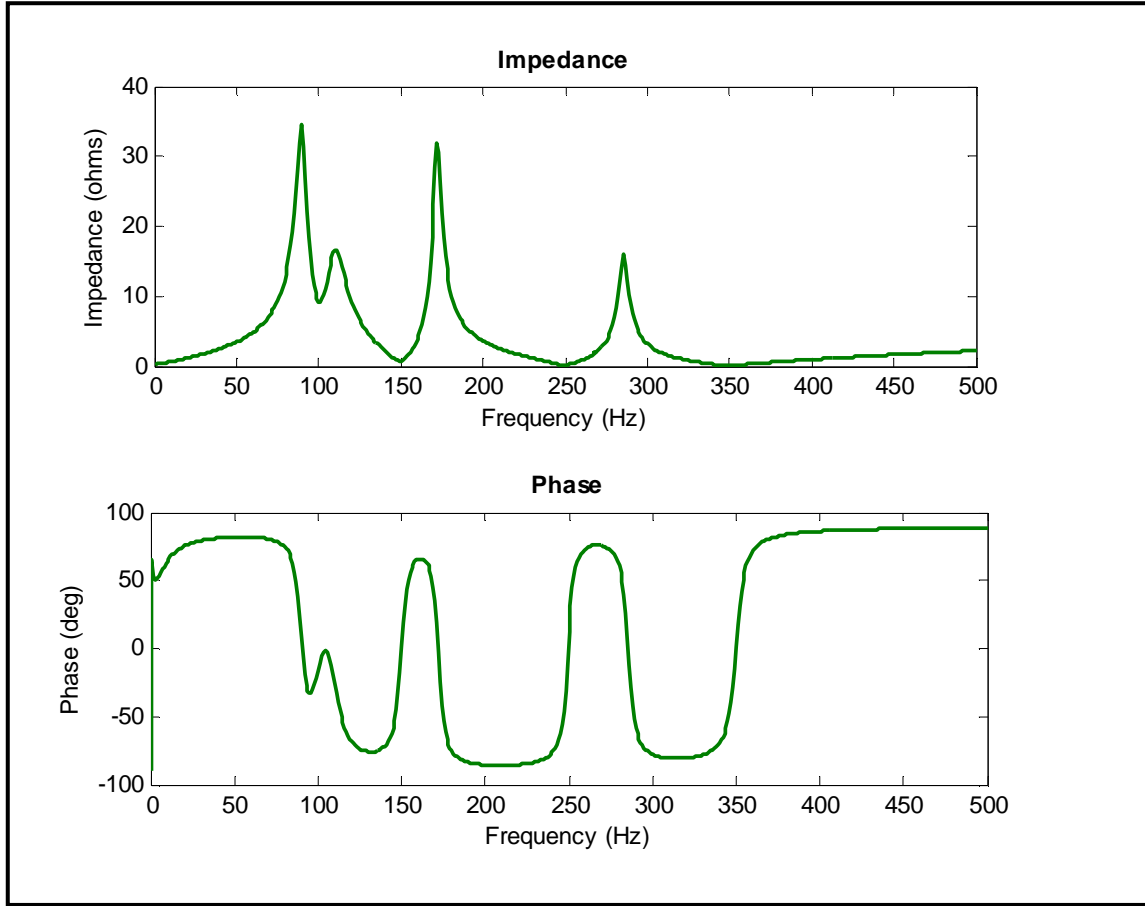


شكل (6-7) : قياس معاوقة الشبكة في حالة عدم وجود قصر بين مرشحي التوافقيتين الثانية والثالثة

جدول (6-1) : ترددات الرنين في حالة عدم وجود قصر بين مرشحي التوافقيتين الثانية والثالثة

	تردد رنين التوازي (Hz)	تردد رنين التوالي (Hz)
2HF	90.1	100
3HF	110.4	150
5HF	172.7	249.5
7HF	285.7	350

أما الشكل (6-8) فهو يوضح مقدار المعاوقة في حالة وجود قصر بين مرشحي التوافقيتين الثانية والثالثة، حيث يلاحظ أن مقدار معاوقة مرشح التوافقية الثانية عند الرنين تزداد ، وذلك لحمايته من مرور التيارات العالية، والجدول (6-2) يوضح الترددات التي يحدث عندها الرنين في حالتها التوالي والتوازي .



شكل (6-8) : قياس معاوقة الشبكة في حالة وجود قصر بين مرشحي التوافقيتين الثانية والثالثة

جدول (6-2) : ترددات الرنين في حالة وجود قصر بين مرشحي التوافقيتين الثانية والثالثة

	تردد رنين التوازي (Hz)	تردد رنين التوالي (Hz)
2HF	89.9	100.6
3HF	110.9	149.7
5HF	172.7	249.5
7HF	285.7	350

### 6-3-2 تحليل التوافقيات الناجمة عن الفرن :-

باستخدام تحليل فوريير والذي يقوم به برنامج (MATLAB SIMULINK) يمكن قياس مقدار التوافقيات للجهد والتيار وكذلك حساب معامل التشوه الكلي (THD) في مرحلتي التشغيل وكذلك في حالة وجود ترشيح للتوافقيات وعدم وجوده كالتالي :-

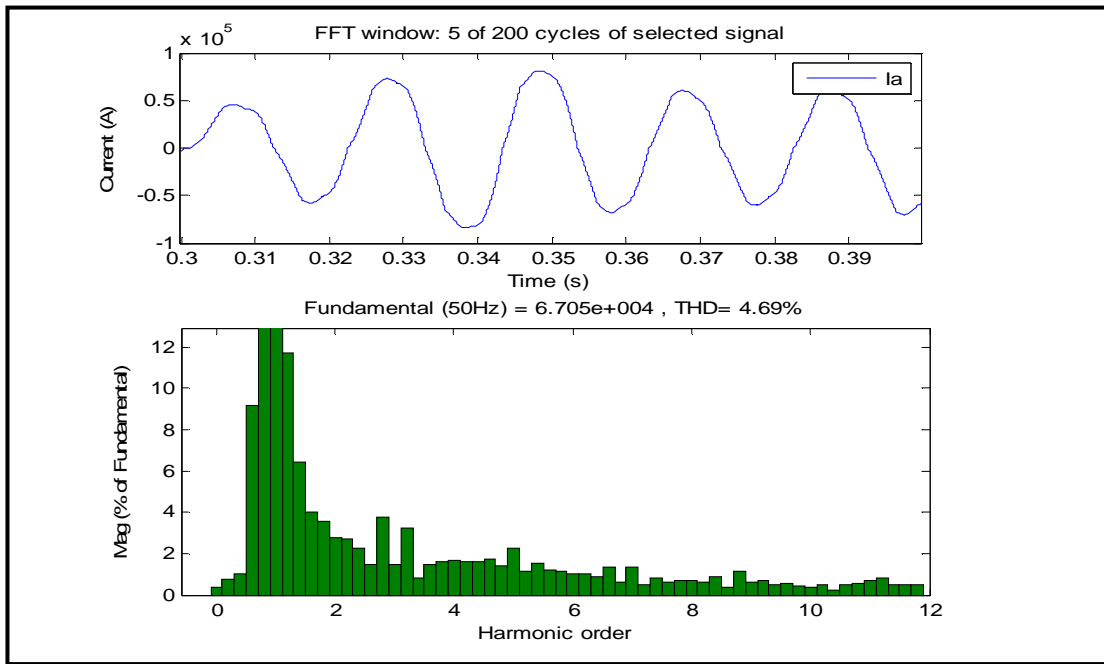
### 6-3-2-1 تحليل التوافقيات الناجمة عن الفرن في مرحلة الصهر الأولي:-

تم أخذ خمس دورات من التيارات والجهود عند نقاط مختلفة بالشبكة وتحليلها باستخدام تحليل فوريير (FFT Analysis) كما يلي :-

#### أ- تحليل التيار المار بالكترودات الفرن :-

من الشكل (6-9) نلاحظ وجود التوافقيات الوسطية بالإضافة إلى التوافقيات الفردية بنسب عالية, وبحساب معامل التشوه الكلي نجد انه يأخذ القيمة التالية:

$$\text{THD}\% = 4.69 \%$$



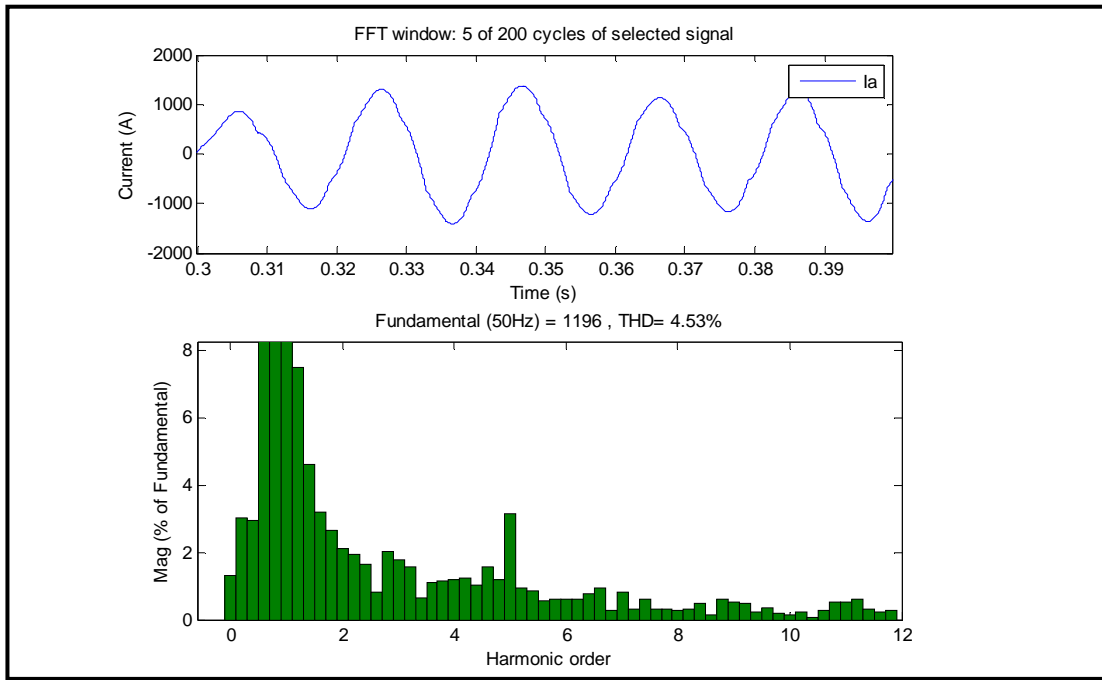
شكل (6-9) : توافقيات التيار قبل محول الفرن وفي مرحلة الصهر الأولي

#### ب- تحليل التيار المار بالملف الابتدائي لمحول الفرن :-

بتحليل الشكل الموجي لهذا التيار كما هو موضح بالشكل (6-10), يلاحظ عدم تغير مقدار التوافقيات بشكل كبير بينما يحدث تغير في الشكل الموجي للتيار وهذا ناتج عن تغير يحدث في زاوية الطور لبعض التوافقيات بسبب الإزاحة الطورية  $30^\circ$  الناتجة عن التوصيلة نجمة/دلتا, وبما أن معامل التشوه الكلي يعتمد على قيمة التوافقيات فنجد أنه لن يتغير بشكل كبير ويأخذ القيمة التالية:

$$\text{THD}\% = 4.53 \%$$



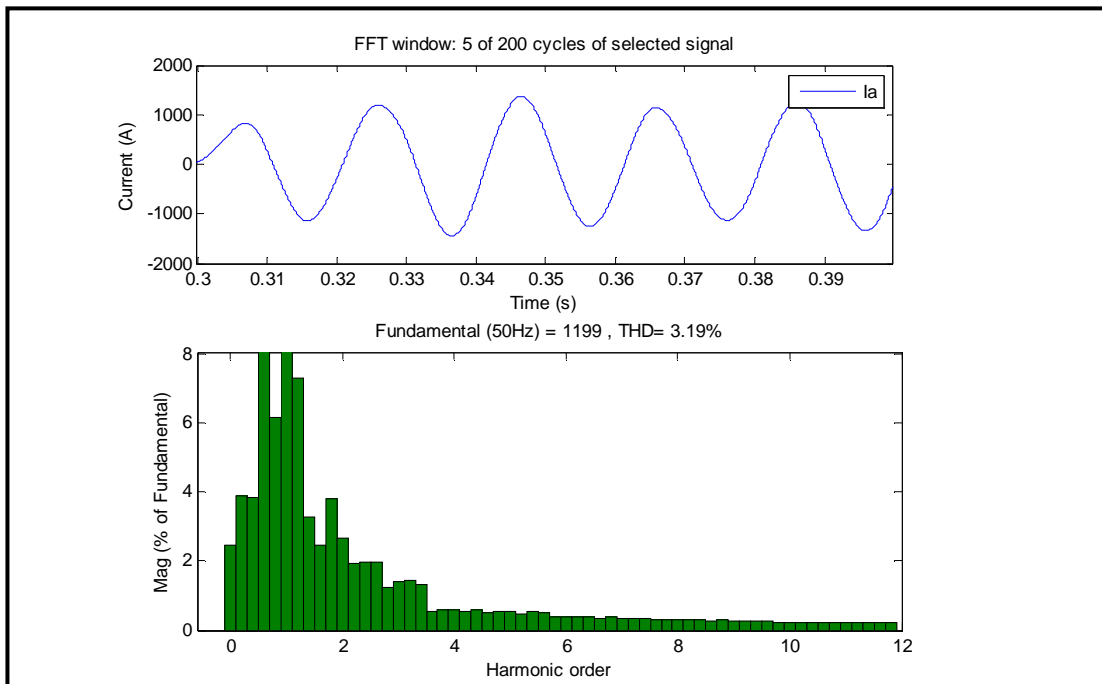


شكل (6-10) : توافقيات التيار بعد محول الفرن وفي مرحلة الصهر الأولي

ج- تحليل التيار المسحوب من الشبكة :-

عند تحليل الشكل الموجي للتيار بعد عملية ترشيحه وكما هو موضح بالشكل (6-11) يلاحظ أن مقدار التوافقيات الثالثة والخامسة والسابعة قد قلت بشكل كبير، أما التوافقية الثانية فقد ازدادت وكذلك بعض التوافقيات الوسطية والتي يقع ترددها بالقرب أو مساوي لتردد رنين توازي. وبحساب معامل التشوه الكلي فنجد أن قيمته كالتالي :

$THD\% = 3.19\%$

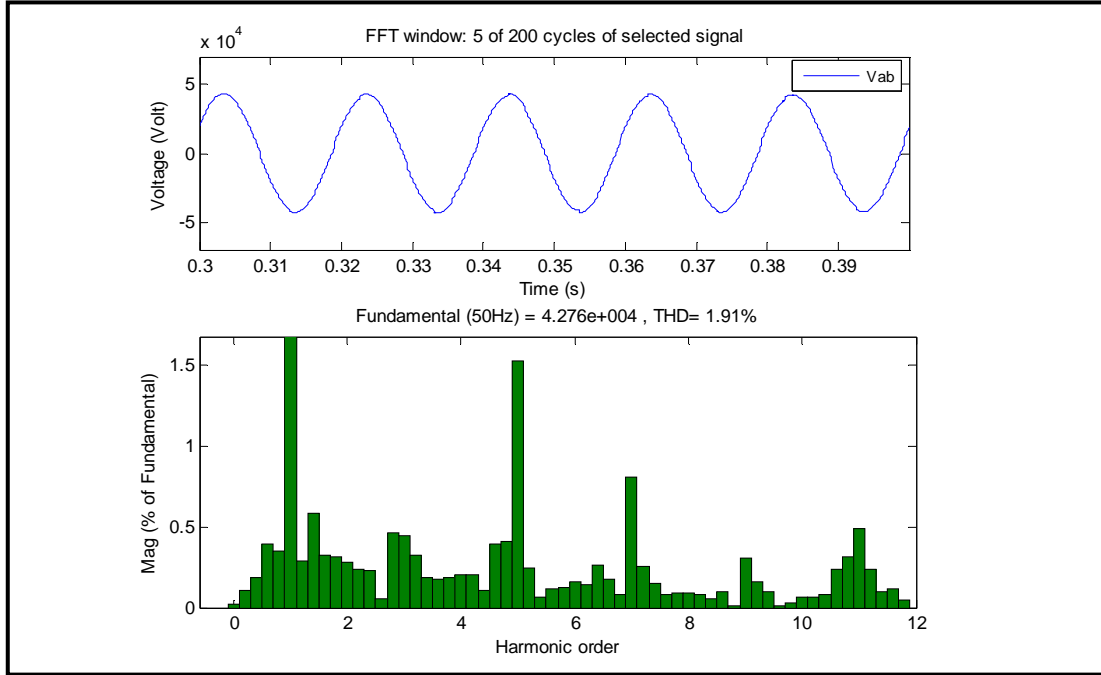


شكل (6-11) : توافقيات التيار بعد الترشيح وفي مرحلة الصهر الأولي

#### د- تحليل الجهد على قضيب الأفران في حالة عدم وجود ترشيح :-

بتحليل الشكل الموجي للجهد كما هو موضح بالشكل (6-12), يلاحظ تولد التوافقيات الفردية وكذلك التوافقيات الوسطية والتي ترددها قريب من تردد التوافقيات الفردية, وبحساب معامل التشوه الكلي نجد أن له قيمة كالتالي:

$$\text{THD}\% = 1.91\%$$



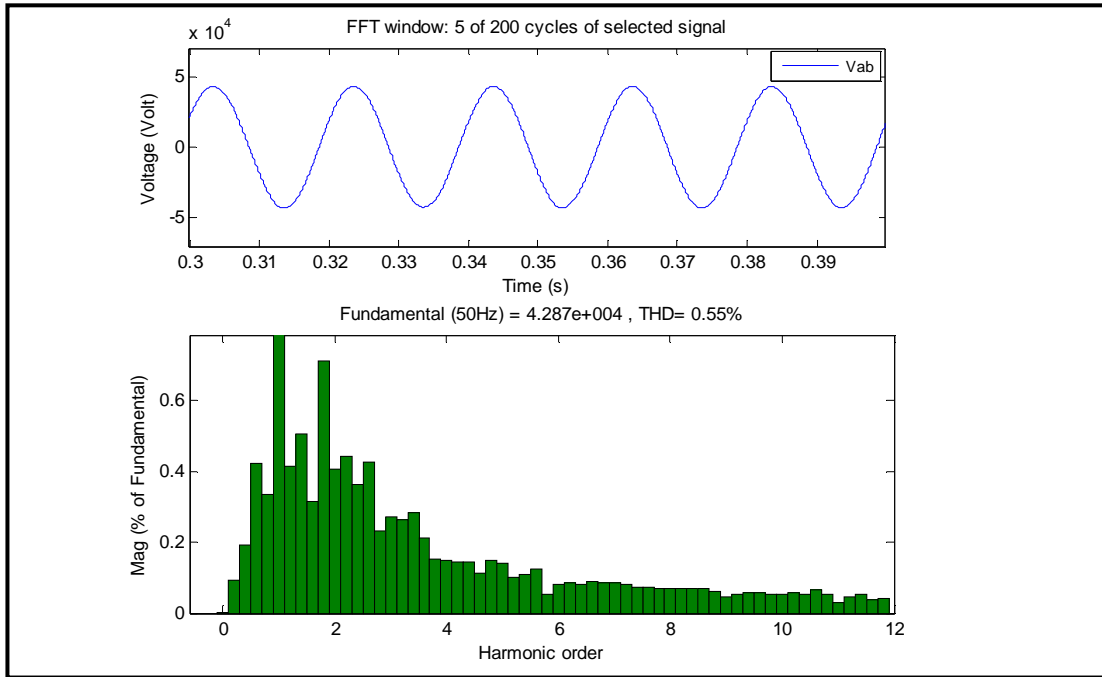
شكل (6-12) : توافقيات الجهد على قضيب الأفران في حالة عدم وجود ترشيح

#### هـ- تحليل الجهد على قضيب الأفران في حالة وجود ترشيح :-

بتحليل الشكل الموجي للجهد كما هو موضح بالشكل (6-13), يلاحظ أن التوافقيات الفردية قد قلت بشكل كبير بينما التوافقيات التي ترددها يساوي تردد رنين توازي أو حتى يقترب منه قد حدث لها تضخيم بدلا من ترشيحها, وبحساب معامل التشوه الكلي نجد أن له قيمة كالتالي:

$$\text{THD}\% = 0.55\%$$

يلاحظ أن معامل التشوه الكلي قد قل كثيرا مما يعني أن النقصان الحاصل في مقدار التوافقيات أكبر من الزيادة .

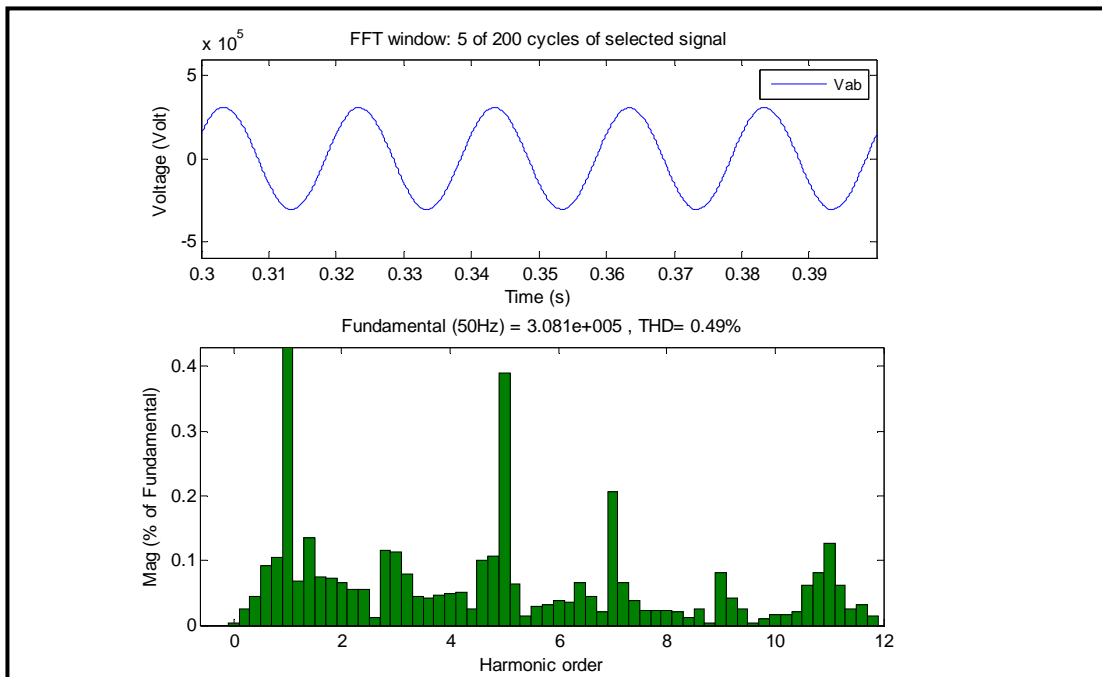


شكل (6-13) : توافقيات الجهد على قضيب الأفران في حالة وجود ترشيح

و- تحليل الجهد على قضيب جهد 220KV في حالة عدم وجود ترشيح :-

عند تحليل الشكل الموجي للجهد في حالة عدم اشتغال محطة التعويض نجد أن الطيف التوافقي كما هو موضح بالشكل (6-14), حيث يمكن ملاحظة أن مقدار التوافقيات الفردية يكون عالي نسبياً. وبحساب معامل التشوه الكلي نجد أن قيمته كالتالي:

$$THD\% = 0.49\%$$

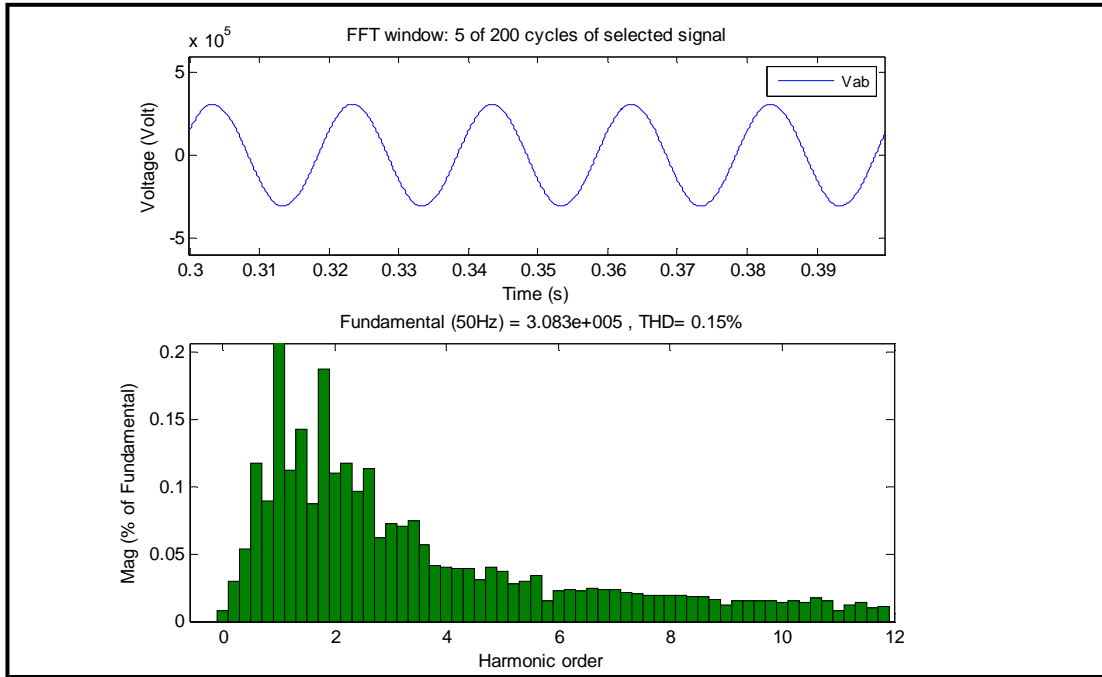


شكل (6-14) : توافقيات الجهد على قضيب جهد 220KV في حالة عدم وجود ترشيح

### ز - تحليل الجهد على قضيب جهد 220KV في حالة وجود ترشيح :-

عند تحليل الشكل الموجي للجهد في حالة تشغيل محطة التعويض نجد أن الطيف التوافقي كما هو موضح بالشكل (6-15) , بشكل عام يمكن ملاحظة أن مقدار التوافقيات قد قل بشكل كبير. وبحساب معامل التشوه الكلي نجد أن قيمته كالتالي:

$$\text{THD}\% = 0.15\%$$



شكل (6-15) : توافقيات الجهد على قضيب جهد 220KV في حالة وجود ترشيح

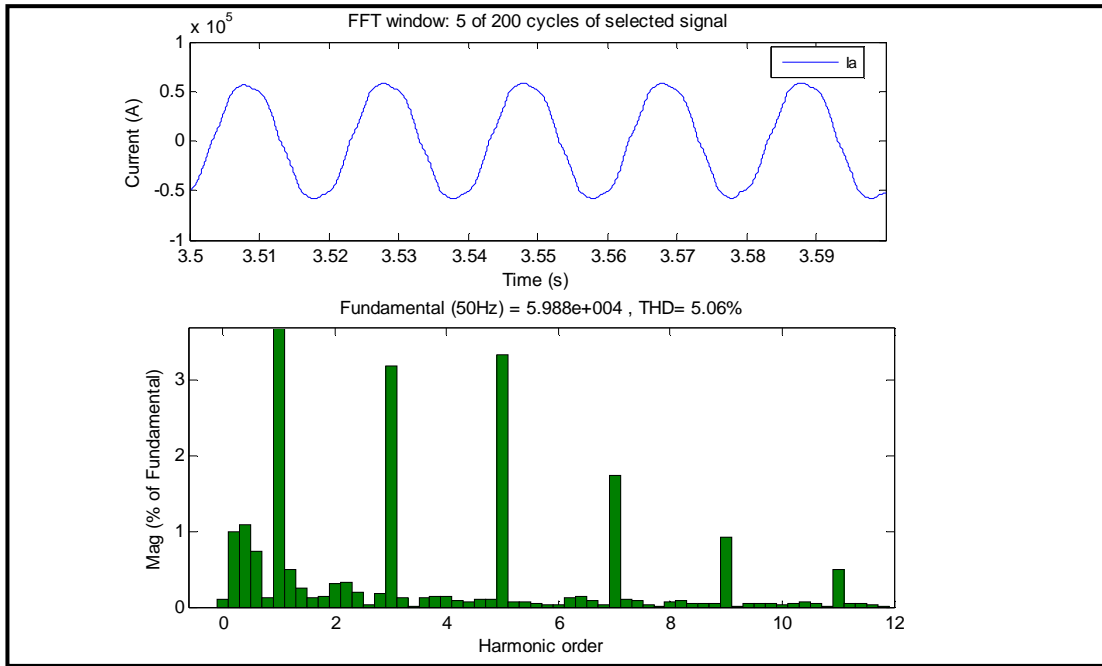
### 6-2-3-2 تحليل التوافقيات الناجمة عن الفرن في مرحلة التنقية:-

بنفس الطريقة السابقة تم أخذ عشر دورات من التيارات والجهود عند نقاط مختلفة بالشبكة وتحليلها باستخدام تحليل فوريير (FFT Analysis) كما يلي :-

#### أ- تحليل التيار المار بالكترودات الفرن :-

من الشكل (6-16), يلاحظ عدم وجود التوافقيات الوسطية في هذه المرحلة من الصهر, وكذلك نقصان التوافقيات الزوجية بشكل كبير, بالإضافة إلى ذلك يلاحظ وجود التوافقيات الفردية بنسب عالية, وبحساب معامل التشوه الكلي نجد أنه يأخذ القيمة التالية:

$$\text{THD}\% = 5.06\%$$

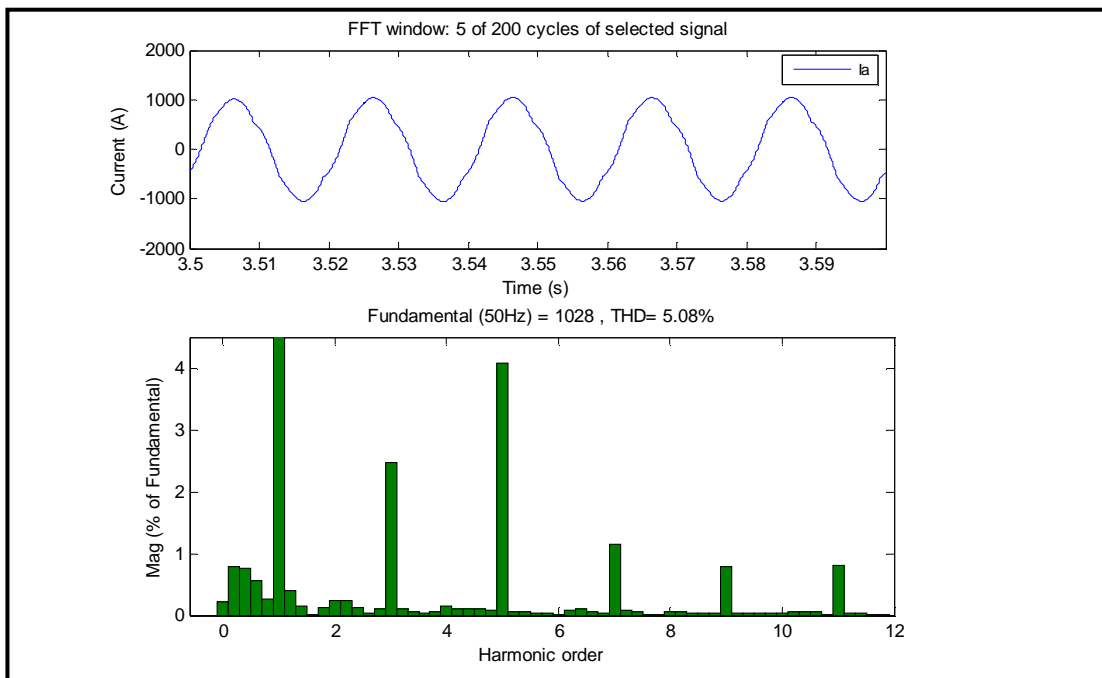


شكل (6-16) : توافقيات التيار قبل محول الفرن وفي مرحلة التنقية

ب- تحليل التيار المار بالملف الابتدائي لمحول الفرن :-

بتحليل الشكل الموجي لهذا التيار كما هو موضح بالشكل (6-17), يلاحظ عدم تغير مقدار التوافقيات بشكل كبير بينما يحدث تغير في الشكل الموجي للتيار وهذا ناتج عن تغير يحدث في زاوية الطور لبعض التوافقيات بسبب الإزاحة الطورية  $30^\circ$  الناتجة عن التوصيلة نجمة/دلتا, وبما أن معامل التشوه الكلي يعتمد على قيمة التوافقيات فنجد أنه لن يتغير بشكل كبير ويأخذ القيمة التالية:

$$THD\% = 5.08 \%$$

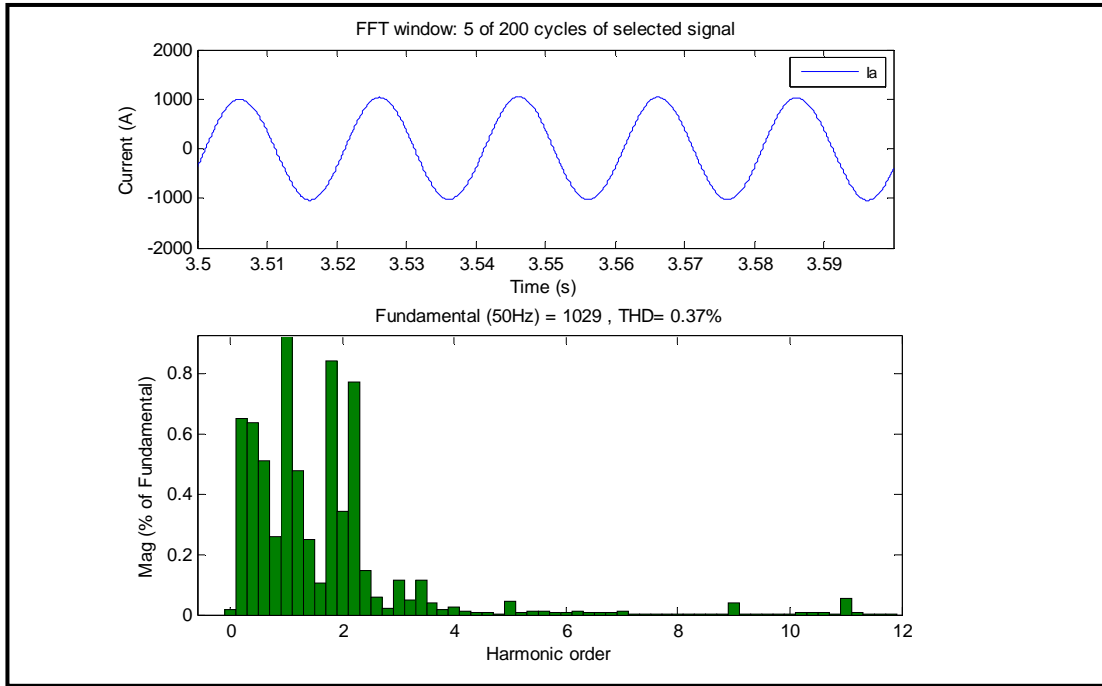


شكل (6-17) : توافقيات التيار بعد محول الفرن وفي مرحلة التنقية

## ج- تحليل التيار المسحوب من الشبكة :-

عند تحليل الشكل الموجي للتيار بعد عملية ترشيحه وكما هو موضح بالشكل (6-18), يلاحظ أن مقدار التوافقيات الثالثة والخامسة والسابعة قد قلت بشكل كبير , أما التوافقية الثانية فقد ازدادت وكذلك بعض التوافقيات الوسطية والتي يقع ترددها بالقرب أو مساوي لتردد رنين توازي , كما يلاحظ أن مقدار التوافقية الثانية قد قل بينما التوافقيات الوسطية التي ترددها بالقرب من 100 Hz قد زادت بشكل كبير. وبحساب معامل التشوه الكلي فنجد أن قيمته كالتالي :

$$\text{THD}\% = 0.37 \%$$

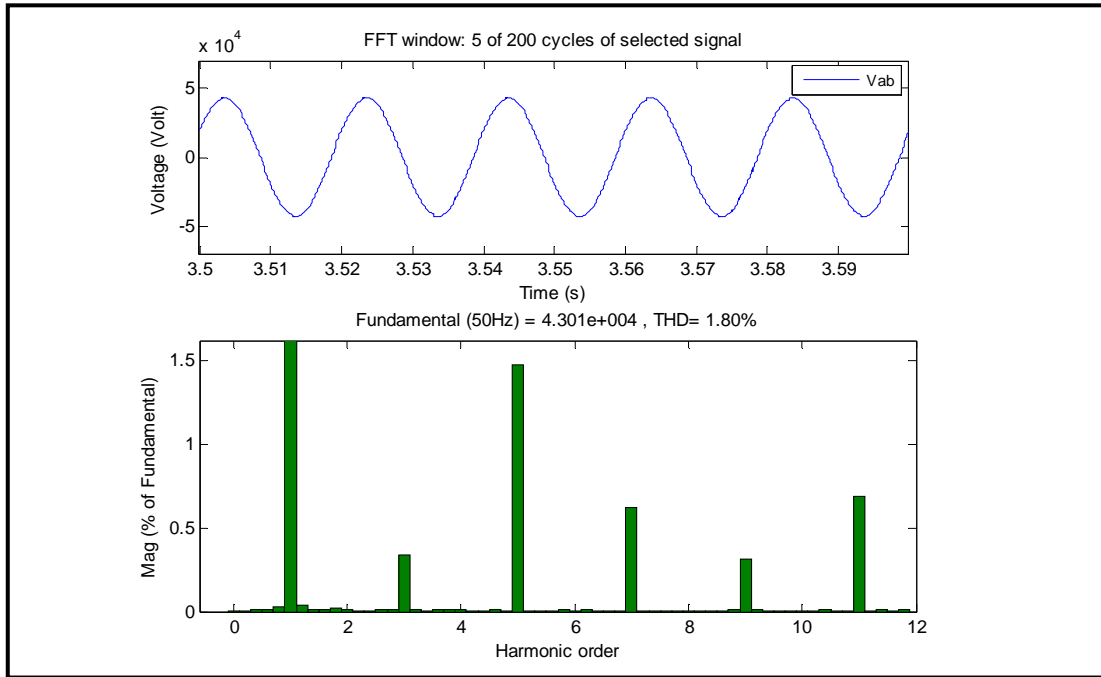


شكل (6-18) : توافقيات التيار بعد الترشيح وفي مرحلة التنقية

## د- تحليل الجهد على قضيب الأفران في حالة عدم وجود ترشيح :-

بتحليل الشكل الموجي للجهد كما هو موضح بالشكل (6-19), يلاحظ تولد التوافقيات الفردية وعدم وجود التوافقيات الوسطية إلا بنسب طفيفة, وبحساب معامل التشوه الكلي نجد أن له قيمة كالتالي:

$$\text{THD}\% = 1.80\%$$

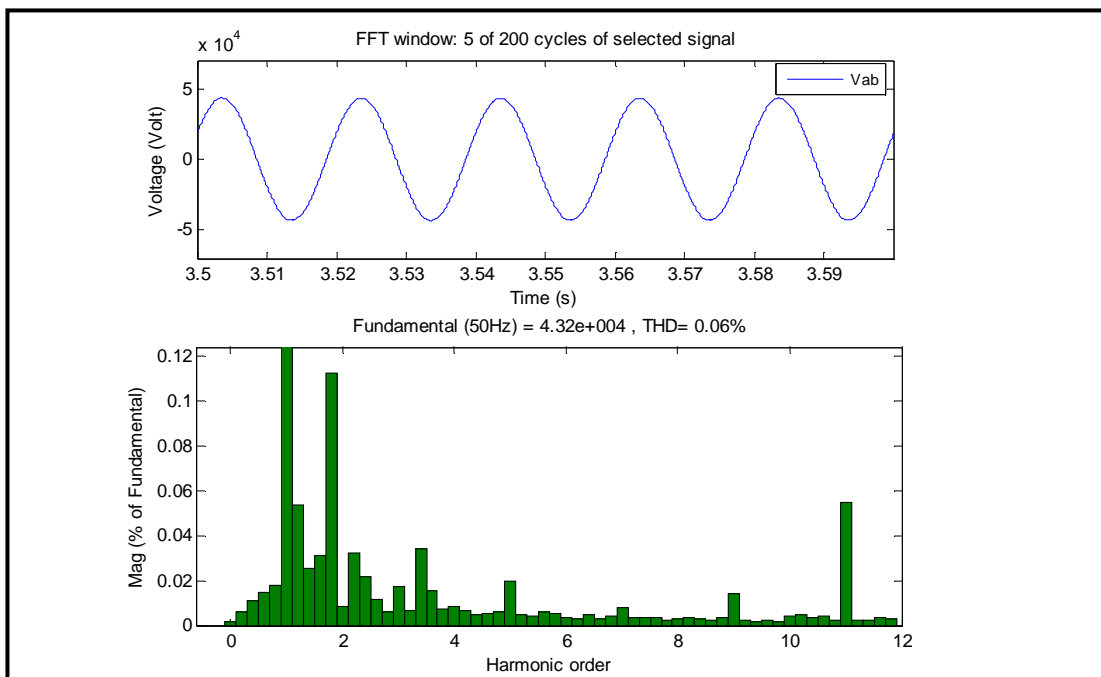


شكل (6-19) : توافقيات الجهد على قضيب الأفران في حالة عدم وجود ترشيح

هـ- تحليل الجهد على قضيب الأفران في حالة وجود ترشيح :-

بتحليل الشكل الموجي للجهد كما هو موضح بالشكل (6-20), يلاحظ أن التوافقيات الفردية قد قلت بشكل كبير بينما التوافقيات التي ترددها يساوي تردد رنين توازي أو حتى يقترب منه قد حدث لها تكبير بدلاً من ترشيحها، وبحساب معامل التشوه الكلي نجد أن له قيمة كالتالي:

$$THD\% = 0.06\%$$

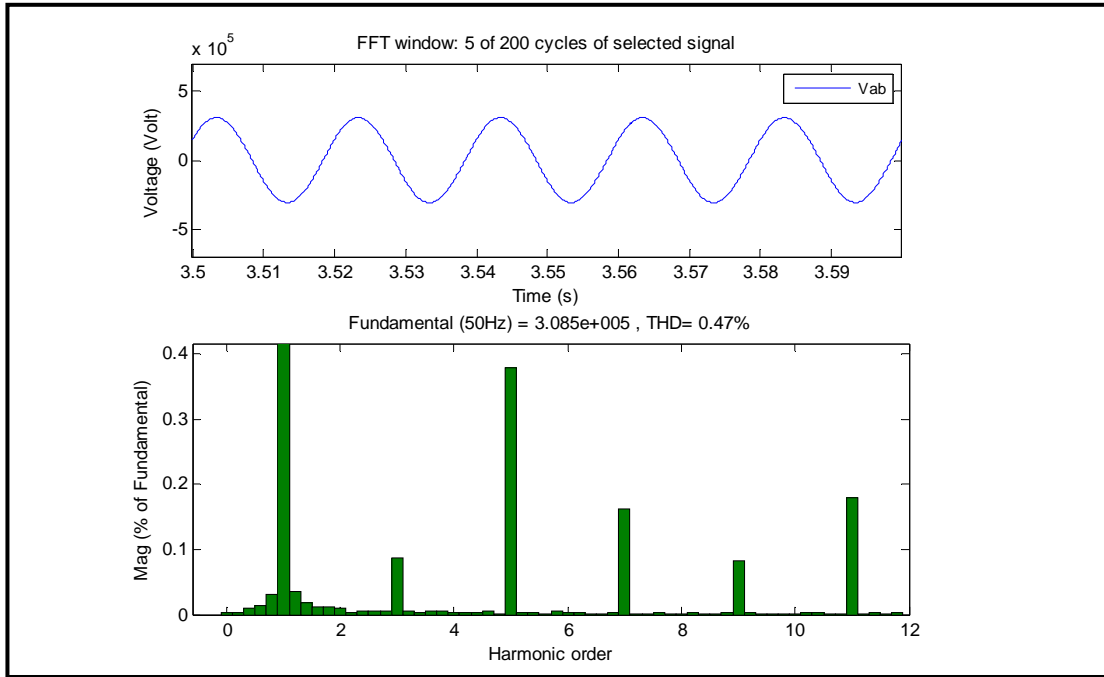


شكل (6-20) : توافقيات الجهد على قضيب الأفران في حالة وجود ترشيح

### و - تحليل الجهد على قضيب جهد 220KV في حالة عدم وجود ترشيح :-

عند تحليل الشكل الموجي للجهد في حالة فصل محطة التعويض نجد أن الطيف التوافقي كما هو موضح بالشكل (6-21), حيث يمكن ملاحظة أن مقدار التوافقيات الفردية يكون عالي نسبياً. وبحساب معامل التشوه الكلي فنجد أن قيمته كالتالي:

$$\text{THD}\% = 0.47\%$$



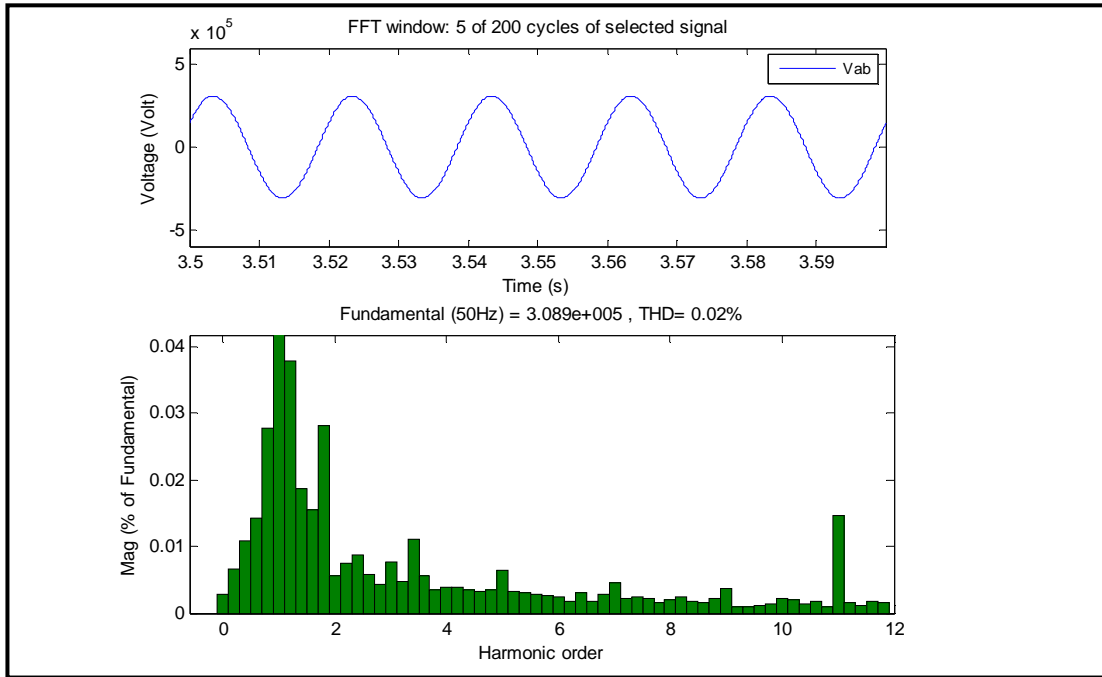
شكل (6-21) : توافقيات الجهد على قضيب جهد 220KV في حالة عدم وجود ترشيح

### ز - تحليل الجهد على قضيب جهد 220KV في حالة وجود ترشيح :-

عند تحليل الشكل الموجي للجهد في حالة تشغيل محطة التعويض نجد أن الطيف التوافقي كما هو موضح بالشكل (6-22), بشكل عام يمكن ملاحظة أن مقدار التوافقيات قد قل بشكل كبير. وبحساب معامل التشوه الكلي فنجد أن قيمته كالتالي:

$$\text{THD}\% = 0.02\%$$





شكل (6-22) : توافقيات الجهد على قضيب جهد 220KV في حالة وجود ترشيح

الفصل السابع  
**الاستنتاجات والتوصيات**

## 7-1 الاستنتاجات:-

مما سبق يمكن استنتاج ما يلي:

- 1- تظهر التوافقيات نتيجة للأحمال اللاخطية الموجودة بالشبكة, وطبيعة هذه الأحمال تختلف من حمل لآخر, وكذلك نوع ومقدار التوافقيات الناتجة عنها.
- 2- تسبب التوافقيات في العديد من المشاكل التي تؤثر على عمل الأجهزة الكهربائية وبالتالي تقليل عمرها الافتراضي.
- 3- إن التصميم غير الجيد للمرشحات غير الفعالة قد يؤدي إلى زيادة قيمة التوافقيات بدلاً من تقليلها, وذلك بسبب رنين التوازي الذي يحدث بين المرشحات مع بعضها البعض أو بينها وبين معاوقة الشبكة المكافئة.
- 4- بسبب عدم انتظام سطح الشحنة بفرن القوس الكهربائي, فإن التيار المار بالالكتروودات عادةً ما يكون متغير في القيمة وغير متزن في الأطوار الثلاثة, مما يجعل توافقيات التيار الناتجة عن الفرن تظهر في جميع التتابعات (الصفري والموجب والسالب).
- 5- في لحظة دخول الفرن فإن قيمة التوافقيات تزداد وخاصة التوافقيات الزوجية, وذلك بسبب عدم استقرار القوس ونتيجة لتيار البدء للمحول المندفع والذي يصل إلى عشرة أضعاف التيار المقنن, ويحتوي على نسبة عالية من التوافقيات.
- 6- نتيجة لتقليل زمن إجراء عملية الصهر للأفران من (156 دقيقة) إلى (120 دقيقة) لمصنع الصلب رقم (1), ومن (180 دقيقة) إلى (120 دقيقة) لمصنع الصلب رقم (2) أدى ذلك إلى زيادة عدد مرات دخول الأفران, ووجود أكثر من فرنين في لحظة بداية الصهر, وهذا يعمل على تقليل عمر مكثفات مرشحي التوافقيتين الخامسة والسابعة.
- 7- بسبب عدم وجود مرشح للتوافقية الرابعة فإن ذلك يؤدي إلى مرور تيارات عالية بمرشح التوافقية الخامسة باعتبار تردد الرنين له الأقرب لتردد التوافقية الرابعة, مما يسبب إجهاد مكثفات مرشح التوافقية الخامسة وتقليل عمرها الافتراضي.
- 8- زيادة قيمة التوافقية الثانية في لحظة دخول أي فرن, وذلك بسبب أن المحطة مصممة على أن تعمل قصر بين مرشح التوافقية الثانية و مرشح التوافقية الثالثة بشكل تلقائي.
- 9- الجهد العالي يجهد مكثفات مرشحي التوافقيتين الخامسة والسابعة ويسبب نقصان عمرها الافتراضي.
- 10- جهد الاسترجاع الانتقالي الناتج عن فصل أي مرشح, والذي يصل إلى قيم عالية, يسبب تلف المكثفات بمرشحات محطة التعويض.

## 2-7 التوصيات:-

مما تقدم فإنه يمكن التوصية بالآتي :

1- للحد من تأثير الجهد العالي على المكثفات الموجودة بمرشحات محطة التعويض, يمكن إتباع أحد

الطول الآتية :-

- إضافة مكثفات مماثلة للمكثفات المتاحة, على التوازي وعلى التوالي بحيث تكون محصلة السعة الكلية ثابتة ويقل الجهد على كل مكثف, وذلك لمرشحي التوافقيتين الخامسة و السابعة.

- تبديل المكثفات في مرشحي التوافقيتين الخامسة والسابعة بمكثفات أخرى ذات جهد مقنن أعلى.

- وضع خطة لدراسة وتنفيذ مرشح للتوافقية الرابعة, وذلك لتقليل التيارات التوافقية المارة بمرشح التوافقية الخامسة واستعمال مقاومة إخماد مع مرشح التوافقية السابعة توصل على التوالي.

2- للحد من تأثير جهد الاسترجاع الانتقالي على المكثفات الموجودة بمرشحات محطة التعويض فإنه يمكن استعمال قواطع دائرة ذو جهد مقنن أعلى من 30KV, وذلك لتحسين الحالة العابرة للجهد بعد فصل القاطع للمرشح, وعلى سبيل المثال استخدام قاطع دائرة ذو جهد مقنن 72KV .

3- يجب مراعاة تشغيل الأفران وفقا لتصميم دورة تشغيل الأفران والمصممة عليها محطة التعويض.

4- الاهتمام بصيانة المرشحات التي لا تعمل وتوفير قطع الغيار اللازمة لإجراء عمليات الصيانة.

5- استعمال المرشحات الفعالة مع المرشحات الحالية, وذلك لتحسين خاصية التعويض وترشيح التوافقيات.

6- استعمال مرشح إمرار للترددات العالية أو نوع (C) بدلا من مرشح إمرار نطاقي, وذلك لترشيح التوافقية الثانية, وفي نفس الوقت ترشيح التوافقيات الوسطية, وكذلك للتخلص من المشاكل التي تسببها حالات رنين التوازي بين المرشحات.

7- توفير جهاز لقياس التوافقيات يعطي زاوية الطور لكل توافقية بالمجمع.

8- المزيد من الدراسات التحليلية والرياضية خاصة بالتوافقيات, وعمل محاكاة للحالات التي يكون فيها أكثر من فرن متصل بالشبكة.

## المراجع

- [1] م.وحيد مصطفى أحمد, الاستخدام الاقتصادي للطاقة الكهربائية , دار الكتب العلمية للنشر و التوزيع, القاهرة, 2005م.
- [2] أرشيف للشركة الليبية للحديد والصلب الخاص بمحطة تعويض الأفران(TS16) , 1986م.
- [3] د. عبدالقادر الصادق عكي, د. موسى محمد موسى, "نظم هندسة الإتصالات (الجزء الأول أسس ومبادئ)", كلية الهندسة جامعة الفاتح, منشورات ELGA, 1996.
- [4] National Electric Code – NEC – 1996, National Fire Protection Association.
- [5] CEI/IEC1000-2-1:1990, "Electromagnetic Compatibility", Part 2:Environment, Sect.1:Description of the environment-Electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and signalling in public power supply systems. First Edition,1990-05.
- [6] Colin. Bayliss "Transmission And Distribution Electrical Engineering", second edition , Newnes, 1996.
- [7] C.Collombet, J.M.Lupin and J.Schonek,Cahier technique no.152,"Harmonic Disturbances In Networks ,And Their Treatment", 2000.
- [8] NFPA 70B Recommended Practice for Electrical Equipment Maintenance, Chapter 24,National Fire Protection Association,Quincy MA,1994.
- [9] British electricity international, "Modern Power Station Practice–EHV Transmission " , volume (K), third edition , copy write 1992.
- [10] L.Morán, J.Dixon, J.Espinoza, R.Wallace, "Using Active Power Filters To Improve Power Quality", Chile.
- [11] D.Rivas, L.Morán, J.Dixon and J.Espinoza," Improving Passive Filter Compensation Performance With Active Techniques", IEEE Trans.Ind.Electron, VOL.50,NO.1, FEBRUARY 2003.
- [12] [www.HVDC.ca](http://www.HVDC.ca)

## الملاحق

الملحق (1) :-

قيمة الجهد ونقاط التشغيل عند خطوات مختلفة لمحول الفرز

رقم الخطوة	قيمة الجهد على الملف الثانوي (V)	نقاط التشغيل		
		MW	MVAR	P.F
17	580	45.0	30.0	0.82
16	556	43.0	32.0	0.80
15	532.2	41.0	35.2	0.76
14	508.4	38.0	38.0	0.707
13	484.5	35.5	35.5	0.707
12	460.7	32.5	32.5	0.707
11	436.9	30.0	30.0	0.707
10	413.1	26.5	26.5	0.707
9	389.2	24.0	24.0	0.707
8	365.4	21.0	21.0	0.707
7	341.6	18.0	18.0	0.707
6	317.7	16.0	16.0	0.707
5	293.9	14.0	14.0	0.707
4	270.1	11.5	11.5	0.707
3	246.2	9.0	9.0	0.707
2	222.4	8.0	8.0	0.707
1	198.6	7.0	7.0	0.707

الملحق (2) :-



الملحق (3) :-

حدود التشويه في الجهد الموضوعة من طرف IEEE

Bus Voltage at PCC	Individual $V_h\%$	Voltage THD%
$V < 69 \text{ KV}$	3	5
$69 \leq V < 161 \text{ KV}$	1.5	2.5
$V \geq 161 \text{ KV}$	1	1.5

حدود التشويه التوافقي للجهد NORSEK E-001/2

	$V_h\%$	THD <sub>v</sub> %	IEC 61000-2-4
HV (> 1KV) bus bars	6	8	Class 2
LV (< 1KV) bus bars	8	10	Class 3

حدود التشويه للجهد في الشبكات منخفضة الجهد IEC 61000-2-2

Odd Harmonics		Even Harmonics		Triplen Harmonics	
h	% $V_h$	h	% $V_h$	h	% $V_h$
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1.5
11	3.5	6	0.5	15	0.3
13	3	8	0.5	$\geq 21$	0.2
17	2	10	0.5		
19	1.5	$\geq 12$	0.2		
23	1.5				
25	1.5				
$\geq 29$	X				

THD<sub>v</sub> ≤ 8% for all harmonics up to 40.  
 $X=0.2+12.5/h$  . for  $h=29, 31, 35, 37, \dots$   $V_h=0.63, 0.60, 0.56, 0.54 \%$

IEC 61000-2-4 الصناعية للجهود في البيئات class 2

IEC 61000-2-4 class 2					
Odd Harmonics		Even Harmonics		Triplen Harmonics	
h	% V <sub>h</sub>	h	% V <sub>h</sub>	h	% V <sub>h</sub>
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1.5
11	3.5	6	0.5	15	0.3
13	3	8	0.5	≥21	0.2
17	2	10	0.5		
19	1.5	≥12	0.2		
23	1.5				
25	1.5				
≥29	X				

X=0.2+12.5/h .  
for h=29, 31,35 and 37 V<sub>h</sub>=0.63, 0.60, 0.56 and 0.54 %

IEC 61000-2-4 class 3					
Odd Harmonics		Even Harmonics		Triplen Harmonics	
h	% V <sub>h</sub>	h	% V <sub>h</sub>	h	% V <sub>h</sub>
5	8	2	3	3	6
7	7	4	1.5	9	2.5
11	5	6≥	1	15	2
13	4.5			21	1.75
17	4			≥27	1
19	4				
23	3.5				
25	3.5				
≥29	y				

y=5√11/h.  
for h=29, 31,35 and 37 V<sub>h</sub>=3.1, 3.0, 2.8 and 2.7 %

IEC 61000-3-2 / D أقصى تيارات توافقية مسموحة للتصنيف

h	3	5	7	9	11	13	15...39
Max I <sub>h</sub> , A	2.30	1.14	0.77	0.40	0.33	0.21	0.15...15/h
Equipment input current ≤ 16 A per phase							

IEEE (120 V through 69 KV) حدود تشوه التيار في أنظمة التوزيع

Max Harmonic Current Distortion in % of I <sub>L</sub> Individual Harmonic Order (Odd Harmonic)						
I <sub>sc</sub> /I <sub>L</sub>	<11	11≤h≤17	17≤h≤23	23≤h≤35	35≤h	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

الملحق (4) :-

الملحق (5) :-

الملحق (6) :-



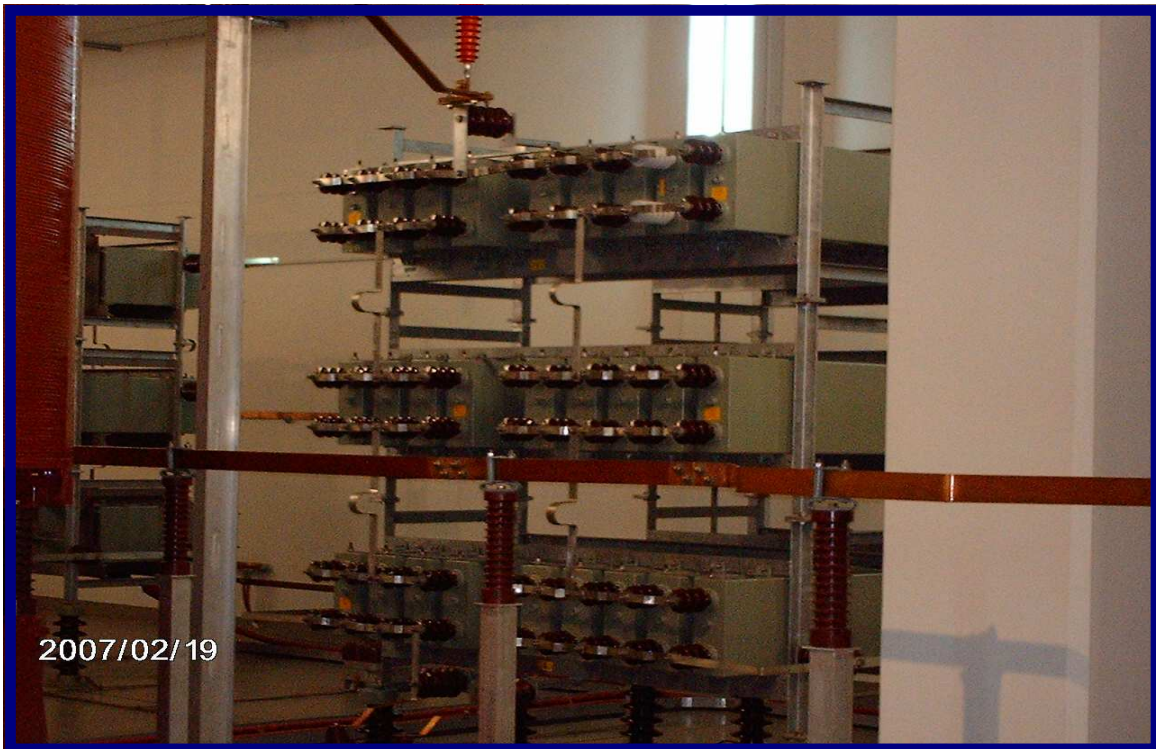
الصورة توضح لوحة التحكم والمراقبة لمحطة التعويض



الصورة توضح المقاومة المستخدمة لعمل قصر بين مرشحي التوافقيتين الثانية والثالثة



الصورة توضح مرشحي التوافقيتين الثانية و الثالثة



الصورة توضح توصيل مكثفات مرشح التوافقية الثانية

الملحق (8) :-



الصورة توضح مرشحي التوافقيتين الخامسة والسابعة



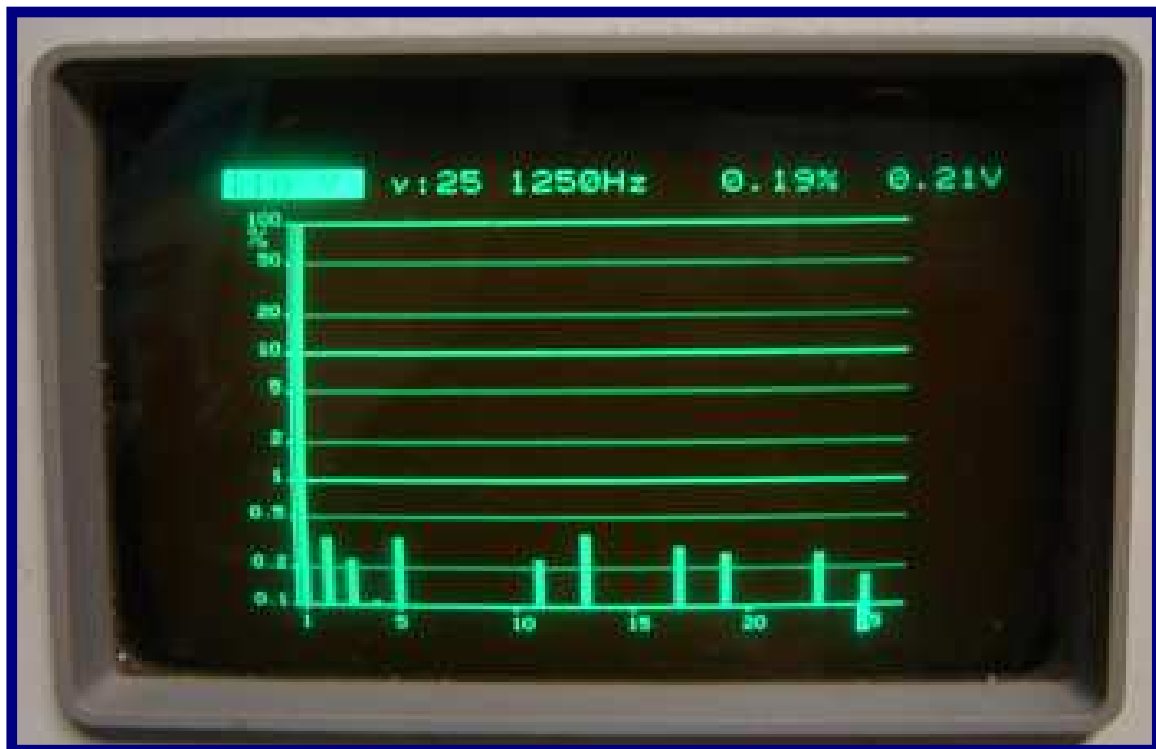
الصورة توضح المكثفات المستخدمة في مرشحات التوافقيات الثانية والثالثة والسابعة



الملحق (9) :-



الصورة توضح جهاز قياس التوافقيات ( Power Line Harmonic Analyzer )

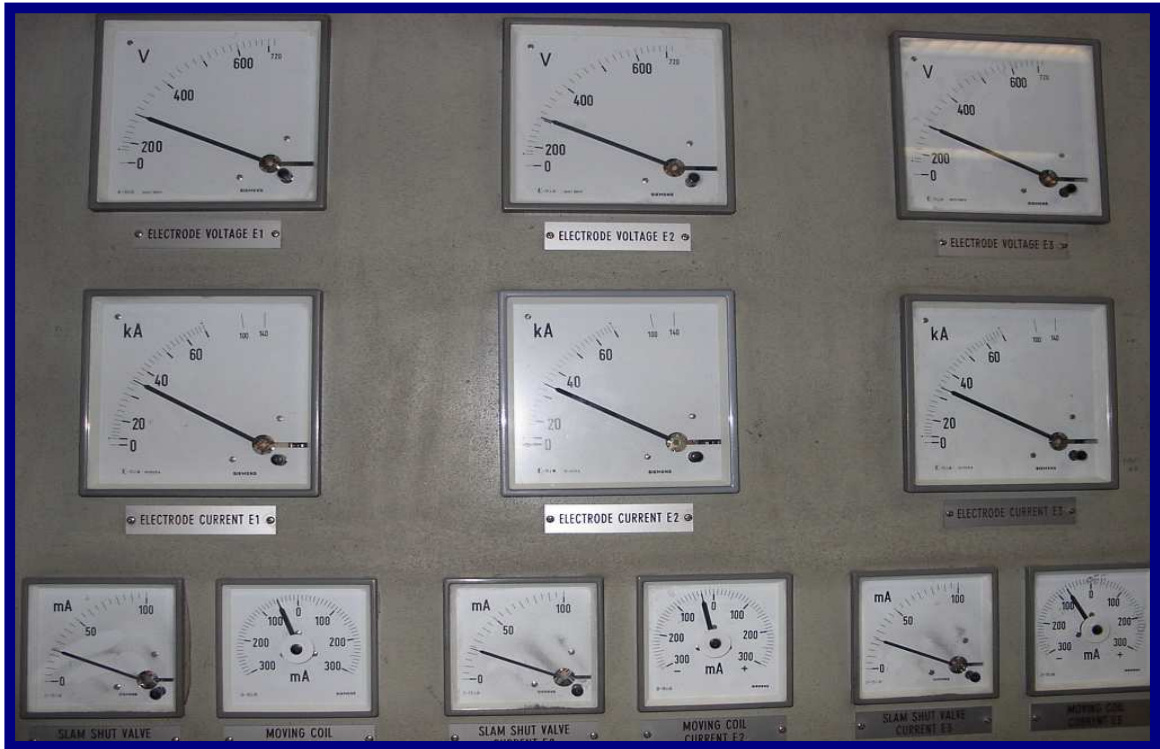


الصورة توضح قياس مقدار التوافقيات باستخدام الجهاز

الملحق (10) :-



الصورة توضح قياس الجهد والتيار للملف الابتدائي لمحور الفرن



الصورة توضح قياس الجهد والتيار للملف الثانوي لمحور الفرن



الصورة توضح فرن صهر بالقوس الكهربائي