

تحليل وتصنيف مصادر التوافقيات في نظم القدرة الكهربائية - دراسة مرجعية

The Harmonic Sources in Electrical Power Systems Analysis & Classification- Reference Study

بقلم: د.م. إحسان محمد مطيع بوادقجي

محتويات البحث:

1-كلمات مفتاحية Keywords

2-مقدمة Introduction

3-المحولات Transformers

4-التجهيزات القوسية Arcing Devices

5-التقويم أحادي الطور Single Phase Rectification

6-الآلات الدوارة Rotating Machines

7-المشكلة والهدف The Problem & The Target

8-الملخص Abstract

9-المراجع References

1-كلمات مفتاحية Keywords

جودة الطاقة، التوافقيات، أنواع التوافقيات، مرشحات سلبية، مرشحات فعالة، معامل التشوه الكلي للتيار، الرتب التوافقية.

Power Quality, Harmonics, Harmonics Types, Passive Filters, Active Filters, THD, Harmonics Orders.

2-مقدمة Introduction

يرجع السبب الرئيس لمشاكل التوافقيات على أنظمة الطاقة الكهربائية إلى الزيادة الهائلة في الأحمال غير الخطية والناجمة عن التطور التقني، مثل استخدام الدارات والتجهيزات الالكترونية الاستطاعية وخاصة في مراحل الربط والتحويل من AC إلى DC، أو في الأحمال المغذاة من أنظمة الطاقة والمستخدمه للعناصر

الإلكترونية أو المتحكمات المدعمة بالمعالجات الصغيرة، حيث تولد تلك التجهيزات توافقيات بسبب الأحمال التي تمر عبر أنظمة الطاقة.

وقبل ظهور أنصاف النواقل الاستطاعية كانت المصادر الرئيسة لتشويه شكل الموجة هو وجود الأفران القوسية، والأثر المتراكم للمصابيح الفلوريساننتية وبسبب الانتشار المحدود للمحولات والآلات الكهربائية. وبشكل عام تصدر التوافقيات عن التجهيزات التالية:

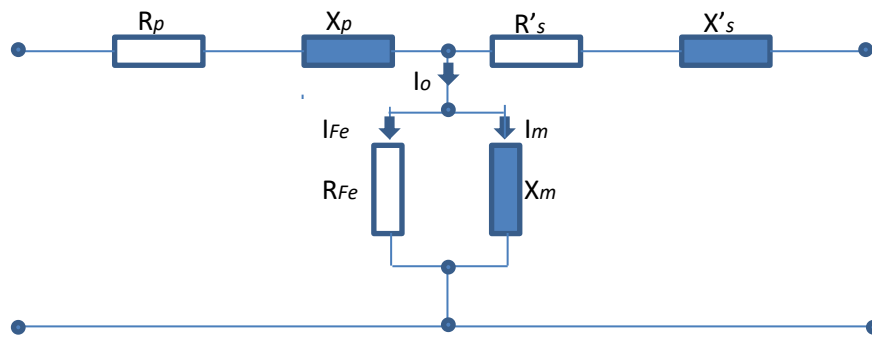
- القالبات Converters
- التجهيزات ذات العناصر نصف الناقلة Devices which includes semi-conductor elements
- المولدات Generators
- المحركات Motors
- المحولات Transformers
- مصابيح الانفراغ الغازية Lighting equipment working by gas discharge principle
- الأنظمة الكهروضوئية Photovoltaic system
- الحواسيب Computers
- الخواثق الإلكترونية Electronic ballasts
- مغذيات الطاقة عديمة الانقطاع Uninterruptable power supplies
- مغذيات الطاقة التقطعية Switching power supplies
- آلات اللحام Welding machines
- دارات التحكم Control circuits
- القالبات الترددية Frequency converters
- معوضات الاستطاعة الردية الساكنة Static VAR compensators
- معوضات الاستطاعة الردية الديناميكية Dynamic VAR compensators
- الأفران القوسية Arc furnaces
- أنظمة نقل التوتر العالي المستمر HVDC transmission systems
- أنظمة الاتصالات الكهربائية Electrical communication systems

3- المحولات Transformers

إن تغذية الملفات التي تحيط بنوى حديدية بالطاقة الكهربائية سوف تولد توافقيات في تلك الأنظمة، فالمحولات الكهربائية خير مثال عليها، حيث تعد المحولات العناصر الأهم في نظام الطاقة، كما أنها أقدم العناصر غير

الخطية المعروفة، وبسبب الخواص المغناطيسية اللاخطية لنواة المحولة تنتج التوافقيات كلما وصلت لدرجة الإشباع.

وتعطى الدارة المكافئة للمحولة كما في الشكل (1) حيث تعبران R_p و X_p عن المقاومة وتسريب المفاعلة للدارة الابتدائية، أما R'_s و X'_s تعبران عن المقاومة وتسريب المفاعلة للدارة الثانوية والمنسوبتان للدارة الابتدائية على الترتيب. أما $R-Fe$ فهي مقاومة تفرعية تمثل المفاقد الحديدية والتيار $I-Fe$ يمثل تيار تلك المفاقد، وعلى التفرع مع هذه المقاومة توجد X_m والتي تعبر عن مفاعلة المغنطة ويمر فيها التيار I_m .



الشكل (1) الدارة المكافئة للمحولة

2-1- الصفات المميزة عند التهيج الطبيعي Normal Excitation Characteristics

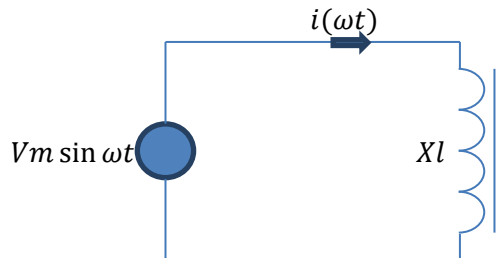
عند حالة اللاحمل تكون الدارة الابتدائية في المحولة عملياً بحالة توازن ناتج عن القوة المحركة الكهربائية العكسية، حيث إن أثر مقاومة وتسريب المفاعلة للملفات مهملة عند التيارات المنخفضة، ولذلك وعند أية لحظة ستعطى قيمة التوتر المطبق V/I من منبع جيبي بالعلاقة الآتية:

$$v_1 = e_1 = -Em \sin \omega t = N_1 \frac{d\phi}{dt}$$

ومن العلاقة السابقة نحصل على علاقة التدفق الرئيس كالتالي:

$$\phi = - \int \frac{e_1}{N_1} dt = \frac{Em}{N_1 \omega} \cos \omega t = \phi_m \cos \omega t$$

والشكل (2) يبين الدارة الكهربائية المكافئة لابتدائية المحولة عند الشرط السابق.



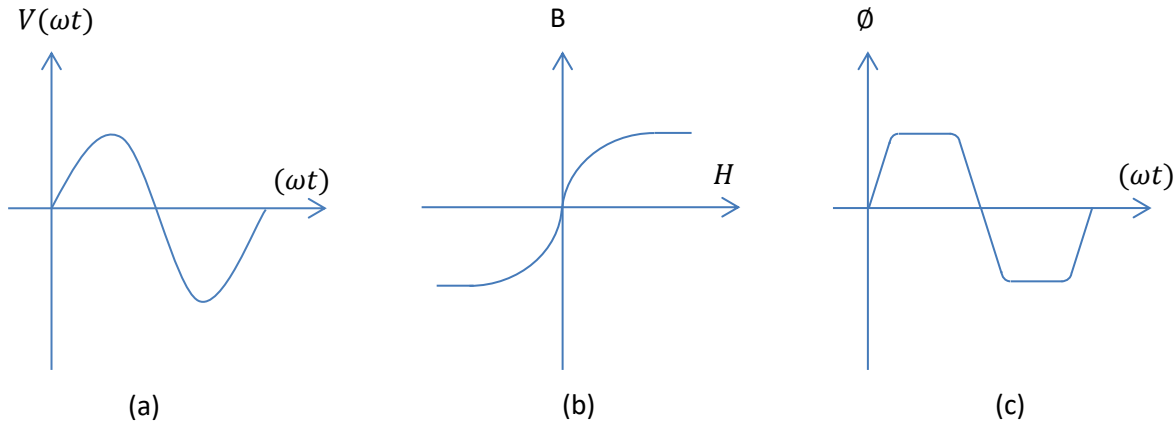
الشكل (2) الدارة الكهربائية المكافئة لابتدائية المحولة

والشكل (3) يبين:

أشكال الموجات لتوتر التغذية الجيبي (a)

وللتيار الابتدائي (b)

وللتدفق المغناطيسي (c).



الشكل (3): أشكال الموجات لتوتر التغذية الجيبي (a)

وللتيار الابتدائي (b) وللتدفق المغناطيسي (c).

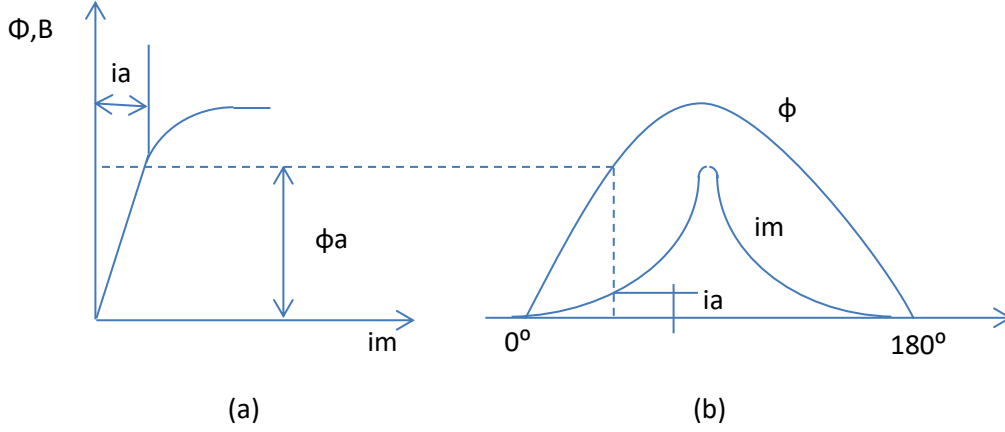
ففي المثال السابق يولد التوتر الابتدائي الجيبي تدفق جيبي أيضاً عند اللا حمل، أما التيار فلن يكون جيبياً تماماً لأن علاقة التدفق متناسبة مع تيار المغنطة بشكل لا خطي كما سيتم شرحه بالفقرة التالية.

2-2- تعيين شكل موجة التيار Determination of the Current Wave Shape

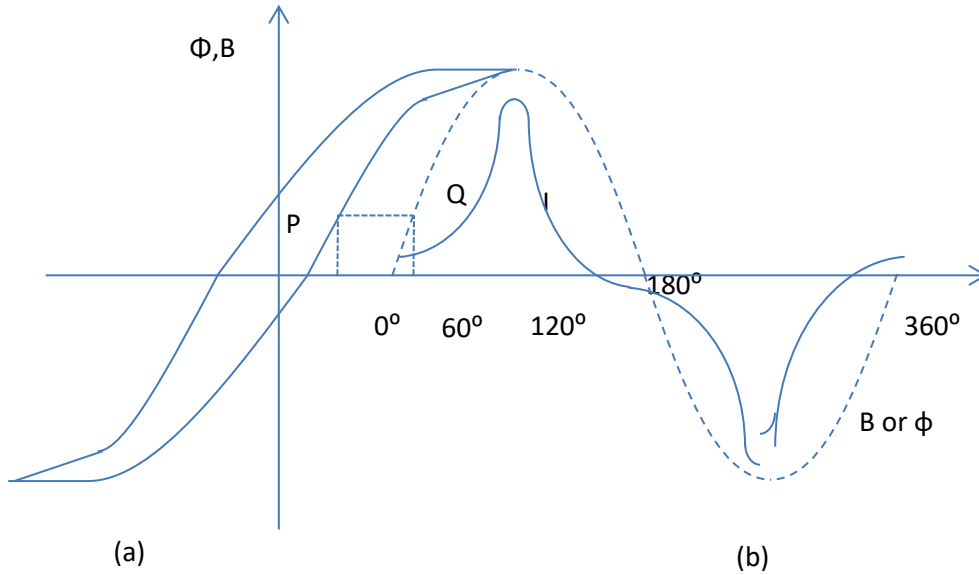
في الحالة المثالية التي تكون فيها النواة الحديدية للمحولة بدون مفاقد البطء (العروة المغناطيسية) فإن التدفق وتيار المغنطة اللازم لتوليد هذا التدفق يتعلقان ببعضهما تبعاً لمنحني المغنطة للفولاذ المستخدم في صفائح نواة المحولة.

وكما هو مبين في الشكل (4) حيث تمثل Φ التدفق الجيبي اللازم لتوازن التوتر على الابتدائي وعلى نفس المنحني (a) نجد العلاقة بين تيار المغنطة وبين الزمن حيث عند كل قيمة لـ Φ نجد أن شكل الموجة الناتج يبتعد عن الشكل الجيبي، وعلى أية حال عند العمل على قيمة قريبة من التوتر الإسمي فإن قيمة تيار المغنطة للمحولة ستكون فقط من 1% إلى 2% من التيار الإسمي لها ودون ظهور أية مشاكل.

أما عندما تؤخذ مفايد البطء بعين الاعتبار كما في المنحنى (b) الذي يمثل العلاقة بين تيار المغنطة غير الجيبي وما يناظره عند أية نقطة من موجة كثافة التدفق، والجزء المرتفع من العروة قد استخدم للجزء المرتفع من موجة كثافة التدفق المتزامن معه.



الشكل (4): التدفق الجيبي (a) والعلاقة بين تيار المغنطة وكثافة التدفق (b)



الشكل (4)

وترتفع عادة توافقيات تيار المغنطة إلى أعلى مستوياتها في ساعات الصباح الأولى حيث الحمولة على الشبكة خفيفة والتوتر بقيمة عالية.

2-3- التهيج الزائد المتناظر Symmetrical Over Excitation

تصمم المحولات عادة لأسباب اقتصادية بحيث تستخدم المواصفات المغناطيسية لمواد النواة بالشكل الأمثل، هذا يعني أن المحول التقليدي يستخدم فولاذ ذو ذرات موجهة يمكن أن يعمل بكثافة تدفق مغناطيسي أعظمي وفي حالة ثابتة قد تصل إلى 1.6-1.7 Tesla، وإذا وصلت قيمة الكثافة إلى 1.9-2.0 Tesla فإنها ستولد إشباع معتبر.

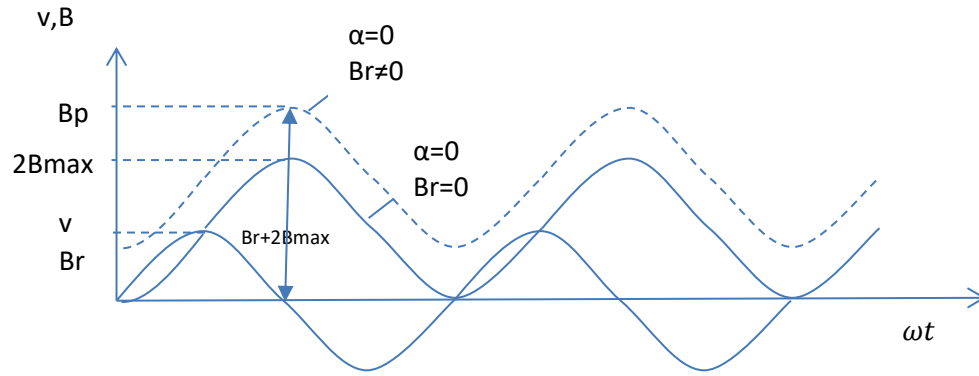
إن تيار المغنطة المتناظر والمصاحب للمحولات ذات القلب الواحد والمشبع يتم إهماله عادة، وإذا افترض أن كل التوافقيات ثلاثية الرتبة تـضمحل، فإن التوافقيات المتولدة ستكون من الرتب 5،7،11،13،17،19،..... وهكذا، وتمثل بالشكل $6K \pm 1$ ، حيث K عدد صحيح.

وفي أنظمة المقومات التقليدية سداسية النبضات يتم عادة ترشيح تلك التوافقيات من قضبان التجميع الحاملة للتيار المتناوب حالما تكون بالضبط بنفس الرتبة من التوافقيات المتولدة نظرياً من قالب سداسية النبضات. أما عند استخدام قالب باثني عشر نبضة فإن التوافقيات النظرية المتولدة ستكون من الرتب $12K \pm 1$ حيث K عدد صحيح، عندئذ في هذه الحالة ستولد التوافقيات من الرتبة الخامسة والسابعة عند وصول محولة القالب إلى حالة الإشباع وستمر عبر نظام الطاقة (الشبكة) ولن يتم ترشيحها.

2-4- توافقيات التيار الفجائي Inrush Current Harmonics

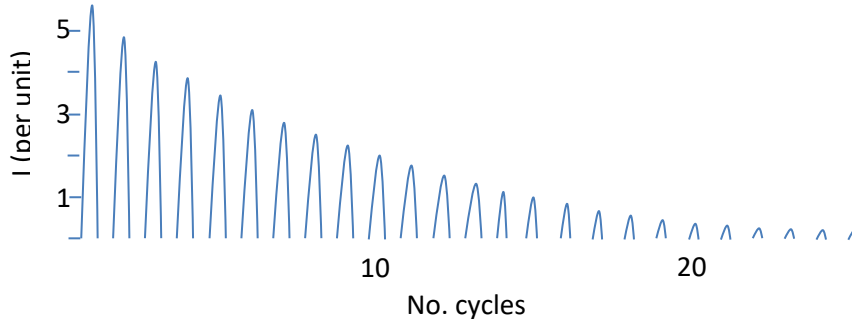
عند فصل المحولة عن التغذية الكهربائية فإنه يمكن أن يبقى في النواة كثافة خطوط مغناطيسية بمطال +Br أو -Br أو عند بعض الظروف تكون مساوية للصفر ولا يوجد أية مغناطيسية متبقية في النواة، وعند إعادة تغذية المحولة فإن كثافة التدفق المغناطيسي والمبينة على الشكل (5) يمكن أن تصل إلى مستويات القمة بـ $2B_{max}$ أو $Br + 2B_{max}$ (غالباً ثلاثة أضعاف التدفق أثناء العمل).

وفي المحولات ذات التصميم العادي يمكن أن تتولد قيم لكثافة التدفق المغناطيسي تصل حتى 3.4 أو 4.7 تسلا، وإذا ما تم مقارنة تلك القيم مع قيمة كثافة التدفق المغناطيسي عند الإشباع التي تصل إلى حدود 2.05 تسلا، فإنه يمكن توقع هذه الحالة نتيجة التهيج الزائد المتناظر، ويمكن ملاحظة أن نواة المحولة ستتجه إلى مستويات الإشباع العالية ولذلك سيتولد قيم عالية للأمبر-لفة في النواة، وهذا الأثر يؤدي لزيادة تيارات المغنطة لقيم تصل حتى 5-10 أضعاف القيم الإسمية المبينة في الشكل (5) أدناه.



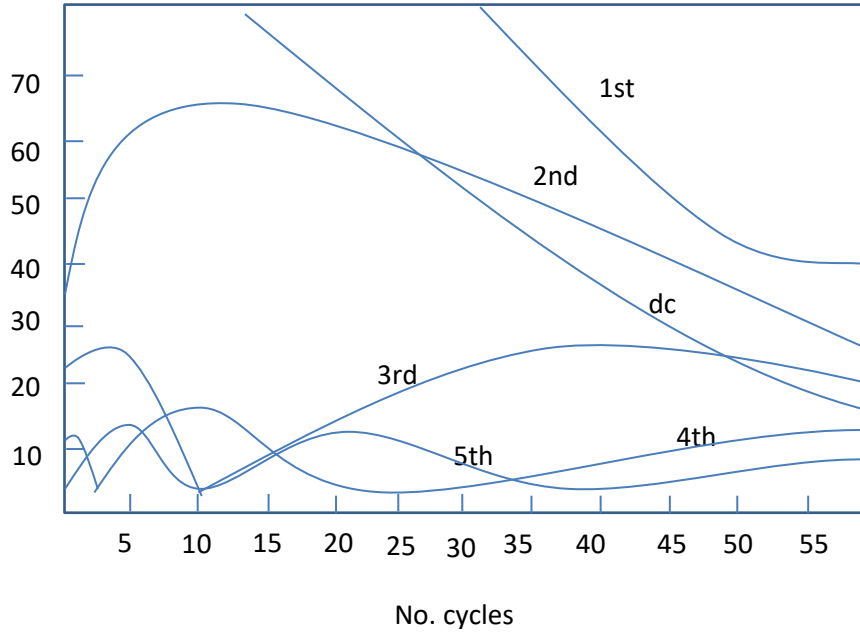
الشكل (5) مستويات كثافة التدفق المغناطيسي

إن تناقص التيار الفجائي عند التشغيل مع الزمن يتبع بشكل أساسي مقاومة ملفات الابتدائي وبالتالي في المحولات الكبيرة يمكن لهذا التيار أن يستمر بحالته العالية ثوان كثيرة بسبب مقاومتها المنخفضة نسبياً كما هو مبين في الشكل (6).



الشكل (6) شكل تناقص التيار الفجائي عند التشغيل

والتوافقيات المصاحبة للتيار الفجائي تنتوع في الترتيب من مركبة dc حتى التوافقية الخامسة وتتناقص مطالاتها بعد الدورة 45 من موجة التغذية كما في الشكل رقم (7).



الشكل (7) التوافقيات المصاحبة للتيار الفجائي

2-5- التوافقيات ثلاثية الرتب في المحولات Triplex Harmonics in Transformers

بفرض أن:

1: تمثل القيمة الفعالة لمركبة توافقية تيار حمل متوازن وغير خطي

1: ω تمثل التردد الزاوي للتردد الأساسي

فإن القيمة اللحظية للمركبة الأساسية لتيار الحمل لكل طور من الأطوار الثلاثة a,b,c تساوي إلى:

$$ia(\omega t) = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t)$$

$$ib(\omega t) = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t - 2\pi/3)$$

$$ic(\omega t) = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t + 2\pi/3)$$

وإن القيمة اللحظية للمركبة التوافقية من الرتبة n لتيار لكل طور من الأطوار الثلاثة a,b,c تساوي إلى:

$$ian(\omega t) = \sqrt{2}I_1 \sin(n\omega t)$$

$$ibn(\omega t) = \sqrt{2}I_1 \sin(n\omega t - 2\pi n/3)$$

$$icn(\omega t) = \sqrt{2}I_1 \sin(n\omega t + 2\pi n/3)$$

وبالنظر للمعادلات السابقة يمكن ملاحظة التوافقيات ثلاثية الرتب موصوفة بالمعادلة التالية وبافتراض أن

k=1, 2, 3, وأن القيمة اللحظية للمركبات التوافقية ذات الترتيب (3, 6, 9,) وهي:

$$ia_{3k}(\omega t) = ib_{3k}(\omega t) = ic_{3k}(\omega t) = \sqrt{2} I_{3k} \sin(3k\omega t)$$

وكما نرى من العلاقة السابقة وعند توازن الأحمال وشروط الشبكة فإن قيم تيارات الأطوار الثلاثة لمركبات التوافقيات ثلاثية الرتب تكون متساوية.

2-6- مجموعات التوصيل للمحولات والتوافقيات

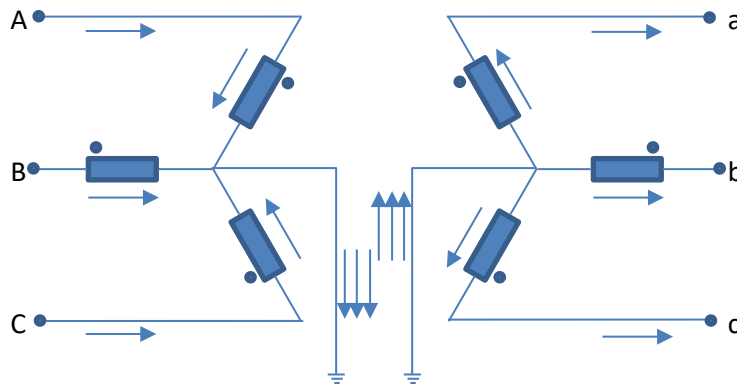
Connection Groups of the Transformers and the Harmonics

تمر تيارات التوافقيات عبر المولدات وخطوط النقل ومفاعلات المحولات مسببة هبوط توتر توافقي، وبالتالي فإن توافقيات تيارات المغنطة يمكن حجزها بأخذ الحيلة أثناء مرحلة التصميم للمحولات.

(a) التوصيل النجمي للمحولات Star-Connected Transformers:

(1) وصل نقطة النجم في المحولة مع الأرضي:

عندئذ سيكون التيار المار عبر الناقل الحيادي مساوياً للصفر لأن مجموع تيارات المركبة الأساسية المتوازنة والخاصة بالأطوار الثلاثة تساوي الصفر، وهذه الحالة لا تتحقق في التوافقيات ثلاثية الرتب، وأن مجموع التيارات للأطوار الثلاثة ستمر عبر الناقل الحيادي كما هو مبين في الشكل (8).



الشكل (8) وصل نقطة النجم في المحولة مع الأرضي

حيث تسبب تلك التوافقيات زيادة حرارة الناقل الحيادي وبالتالي خلال حساب مقطع الناقل الحيادي يجب الأخذ بعين الاعتبار تلك التوافقيات.

أما باقي التوافقيات من الرتب 5, 7, 11, 13, تملك فرق في الطور قدره 120^0 بحيث يكون مجموع مركباتها عند نقطة النجم تساوي الصفر.

وكما يبدو واضحاً فيما إذا تم وصل نقطة النجم مع الخط الأرضي فإن التوافقيات ثلاثية الرتب ستمر إلى الدارة الثانوية وبالتالي الشبكة.

(2) فصل نقطة النجم في المحولة عن الأرضي:

في هذه الحالة ستولد تيارات المغنطة التوافقيات ثلاثية الرتب ولكنها لن تمر للدائرة الثانوية طالما نقطة النجم في الدارة الابتدائية معزولة عن الأرضي.

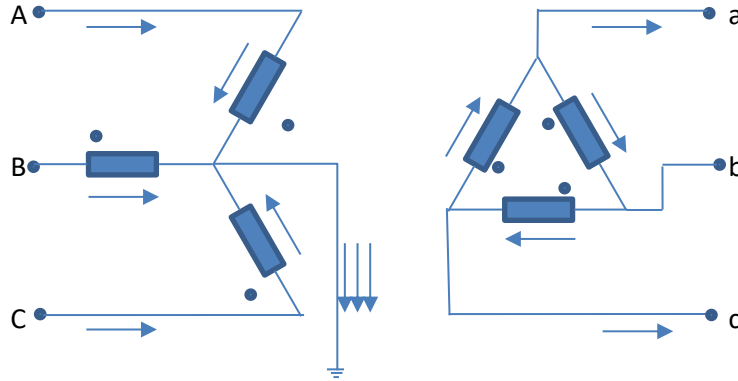
(b) التوصيل المثلثي للمحولات Delta-Connected Transformers:

(1) الدارة الابتدائية موصولة بشكل نجمي:

في هذه الحالة ستولد تيارات المغنطة التوافقيات ثلاثية الرتب ولكنها لن تمر للدائرة الثانوية أما باقي التوافقيات ستعبر إلى الشبكة.

(2) الدارة الثانوية موصولة بشكل مثلثي:

بما أن التيار الكلي عند نقاط العقد للوصل المثلثي تساوي الصفر كما في الشكل (9)، فإن التوافقيات ثلاثية الرتب لن تعبر إلى الشبكة.



الشكل (9) الدارة الابتدائية موصولة بشكل نجمي والثانوية مثلثي

ونلخص ما سبق كما يلي، مهما يكن:

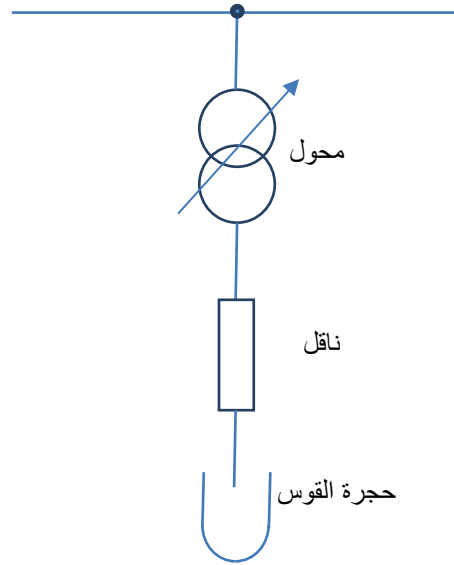
- طبيعة وصل مجموعات ملفات الدارة الابتدائية والثانوية.
- طريقة وصل أو فصل نقطة النجم للدارة الابتدائية والثانوية إلى أو عن الخط الأرضي.
- نوع النواة في المحولة.

فإن مركبات التوافقيات 1, 5, 7, 11, 13,..... ستكون موجودة على الشبكة، ولتخفيف أثر التوافقيات ثلاثية الرتب على الشبكة يجب عدم وصل الابتدائي مع الأرضي أو يجب أن يكون توصيل أحد الملفات في المحولة بشكل مثلثي.

أما إذا كان هناك حمل غير خطي وغير متوازن فإنه مهما كان تصميم المحولة فإن التوافقيات ثلاثية الرتب ستمر عبر الشبكة.

4- التجهيزات القوسية Arcing Devices

إن مميزة الفولت أمبير للأقواس الكهربائية تعد غير خطية بشكل كبير، وبتتبع عملية حدوث القوس الكهربائي نلاحظ هبوط في التوتر نتيجة تيار القصر الذي تتحدد قيمته فقط بقيمة ممانعة الشبكة المغذية. وتعد أجهزة أفران القوس الكهربائي وأجهزة الإنارة ذات الانفراج الغازي مع الخواص المغناطيسية من أهم المصادر المولدة للتوافقيات، والشكل (10) يبين الدارة المبسطة لفرن يعمل بالقوس الكهربائي.



الشكل (10) الدارة المبسطة لفرن يعمل بالقوس الكهربائي

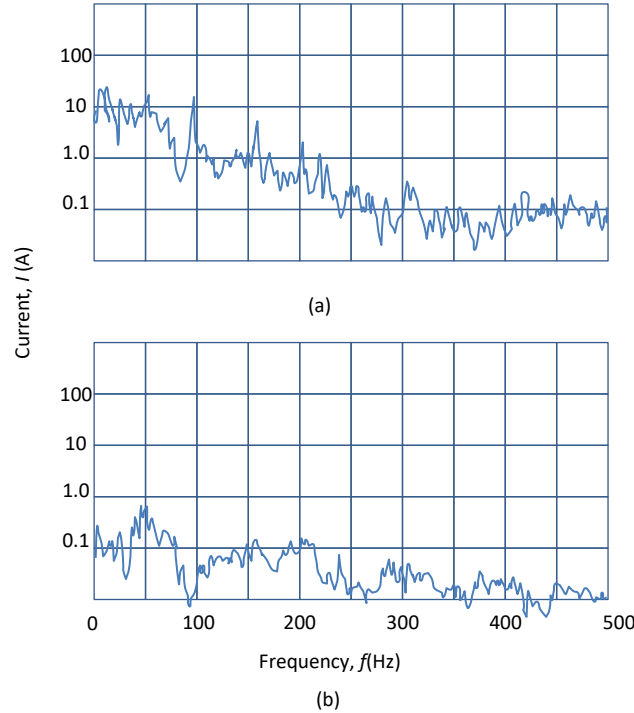
3-1- الأفران القوسية Arc Furnaces

تمتد مجالات الأفران القوسية من الوحدات الصغيرة ذات طاقة صهر عدة أطنان باستطاعة 2-3 MVA إلى الوحدات الكبيرة ذات طاقة صهر تصل حتى 400 طن وباستطاعة 100 MVA.

تتولد التوافقيات عن الأفران القوسية الكهربائية بأشكال وقيم لا يمكن توقعها بسبب تغيير نسبة وأنواع المواد المدخلة في عملية الصهر، وبالتالي فإن تيار القوس غير خطي بشكل كبير مما يظهر طيف واسع من الترددات التوافقية ذات الترتيب التوافقي الصحيح 1, 3, 5, وترتيب غير صحيح (كسري).

ومما سبق نجد أن أسوأ التشوهات في الموجة تحدث عن أحمال أفران الصهر القوسية الكهربائية، ويزيد هذه الحالة سوءاً عملية انصهار وحركة قطب القوس بحد ذاته والمواد المصهورة كل ذلك يجعل تموج تيار القوس الكهربائي يتغير من دورة صهر لأخرى، وهناك اختلاف كبير في التوافقيات المتولدة بين مراحل الصهر ومراحل

التنقية، وكلما ازدادت كمية المواد المصهورة ضمن وعاء الصهر ازداد استقرار القوس وكذلك استقرار التيار مع تشويهِه أقل بكثير، يبين الشكل (11) التغيرات غير الطبيعية للقيمة المنتجة للتيار القوسي في طور دورة الصهر في الفرن ويبين الجدول (1) قيم عدة رتب من التوافقيات الموافقة لطورين من أطوار العمل في الفرن القوسي، وتلك القيم المبينة في الجدول لا يمكن تعميمها على كل الأفران.



الشكل (11) التغيرات غير الطبيعية للقيمة المنتجة للتيار القوسي

التوافقية	في الصهر الأولي	في التنقية
2	7.7	0.0
3	5.8	2.0
4	2.5	0.0
5	4.2	2.1
7	3.1	–

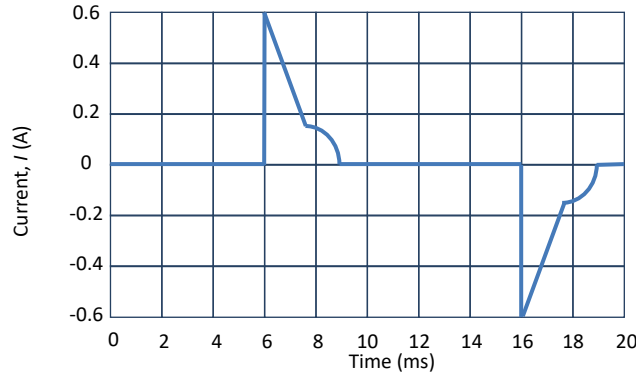
الجدول (1) قيم عدة رتب من التوافقيات الناتجة عن أفران الصهر القوسية

من الواضح في الجدول أن كلاً من التوافقيات الفردية والزوجية يمكن أن تظهر في حالة الفرن القوسي الكهربائي، وبالتالي تعد الأفران القوسية أحمال قاسية على نظام التغذية حيث تتوفر بوجودها كافة مشاكل عدم التوازن الطوري، الخفقان، التوافقيات، التحميل الصدمي، بالإضافة إلى الطنين.

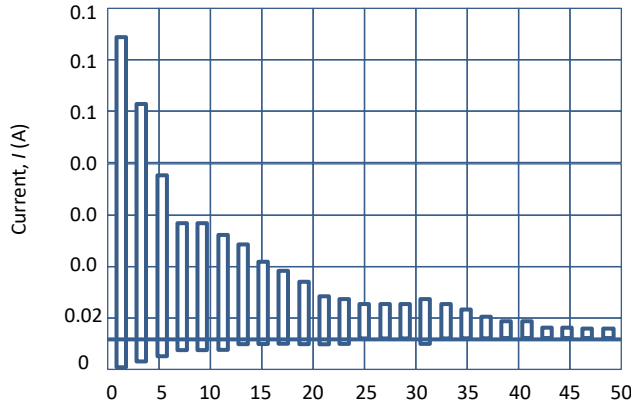
وبالعودة للمنحنيات في الشكل (11) نجد أن الفرن القوسي يمثل حمل بعامل استطاعة منخفض وبتأرجح تيار ردي غير اعتيادي يسبب هبوطات في التوتر عبر المفاعلة الردية لنظام التغذية المتناوب مسبباً تغيرات غير اعتيادية في التوتر على مرابط نظام التغذية، وتؤدي تلك التغيرات إلى تغيرات في إضاءة أجهزة الإنارة المتوهجة ويرجع ذلك إلى ظاهرة ما يعرف بالخفقان والمبينة أساساً على حساسية العين البشرية لملاحظة إضاءة المصابيح المتوهجة.

3-2- مصابيح الانفراغ الغازية Discharge-Type Lighting

تعد أجهزة الإنارة المعتمدة على مبدأ الانفراغ الغازي أحمال غير خطية بشكل كبير وهي تعطي ارتفاع معتبر بقيم تيارات التوافقيات الفردية وتتوضح هذه الظاهرة جلياً في الشكل (12) والشكل (13) حيث يبينان شكل موجة التيار والطيف التوافقي لمصباح انفراغ غازي ذو مردود عالي.



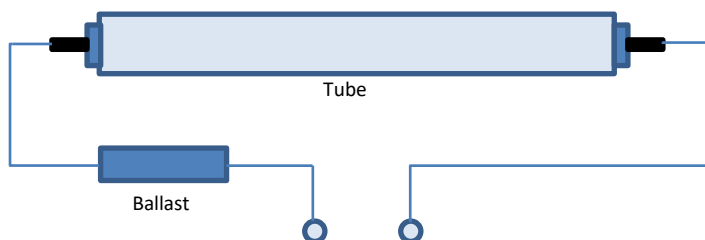
الشكل (12) شكل موجة التيار لمصباح انفراغ غازي



الشكل (13) شكل الطيف التوافقي لمصباح انفراغ غازي

فالأثر سيكون هاماً خصوصاً في حالة استخدام المصابيح الفلوريسانتيّة وسيعطى التركيز الأكبر لهذه الأنواع من المصابيح، وكما هو معروف تستدعي الحاجة لاستخدام خوانق مع تلك المصابيح لكبح التيار ضمن إمكانيات الأنبوب الفلوريسانتي.

وتبدي تلك المصابيح ميزة فولت - أمبير غير خطية بسبب خواص مقاومتها السالبة، والشكل (14) يبين مكونات جهاز إنارة يستخدم ملف خانق في دارته.



الشكل (14) جهاز إنارة فلوريسانتي يستخدم ملف خانق

كما أن الخوانق المستخدمة في أجهزة الإنارة والموصولة مع المصابيح يمكن أن تنتج أيضاً تشوهات كبيرة بسبب التوافقيات بالإضافة إلى إنتاج تيارات التوافقية الثالثة في الناقل الحيادي، وأن الخوانق الحديثة ذات الإقلاع السريع تولد تشوهات أقل بكثير من سابقتها ويمكن أن تحتوي أيضاً مرشحات لتلك الغاية تؤخذ بالاعتبار أثناء التصميم والتنفيذ.

والجدول (2) يبين الطيف التوافقي المتولد عن مصباح فلوريسانتي مزود بخانق مغناطيسي، حيث تمثل قيم التيارات التوافقية كنسبة مئوية من المركبة الأساسية.

	رتبة التوافقية										
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
% I_n/I_1	100	19.9	7.4	3.2	2.4	1.8	0.8	0.4	0.1	0.2	0.1

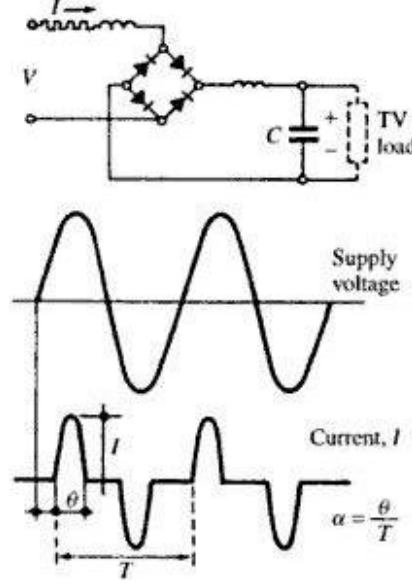
الجدول (2): الطيف التوافقي الناتج عن مصباح فلوريسانت مزود بخانق مغناطيسي

تكون عادة دارات الإنارة ذات مسافات طويلة وتنوع قليل جداً في الأحمال، فعند بوجود مكثفات تصحيح عامل الاستطاعة الإفرادية في أجهزة الإنارة تلك يمكن أن تتشكل دارة LC معقدة نوعاً ما تصل لشروط وظروف الطنين.

5-التقويم أحادي الطور Single Phase Rectification

4-1- مغذيات طاقة التيار المستمر D.C. Power Supplies

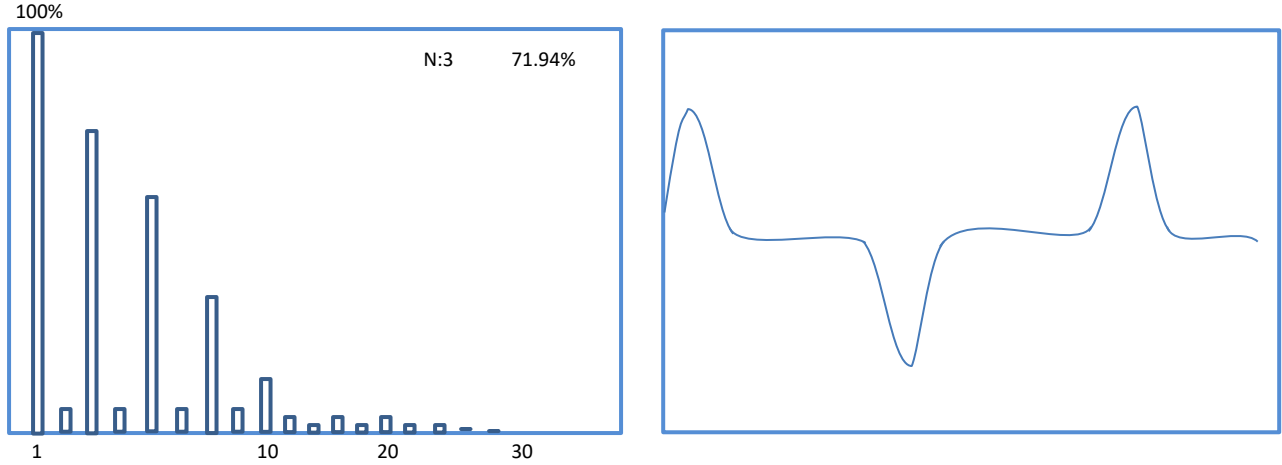
إن العديد من التجهيزات المنزلية والتجارية تحتاج تيار مستمر لعملها، حيث أصبح المقوم أحادي الطور المفرد المنبع الأكثر شيوعاً لتغذية تلك التجهيزات لأنها ذات كلفة منخفضة وحساسيتها ضعيفة تجاه تغيرات توتر التغذية وتحت ظروف التشغيل الطبيعية، كما هو مبين في الشكل (15).



الشكل (15) المقوم أحادي الطور

تستخدم الأجهزة الحديثة مفهوم وحدات التغذية التقطيعية (Switch-Mode Power Supply Units) حيث يوصل فيها دخل المقوم مباشرة للمنبع المتناوب كما في الشكل (15) وبكل الأحوال يتم تحويل التوتر المقوم في هذه الحالة إلى توتر متناوب عند ترددات عالية ثم يقوم مرة ثانية، تؤمن هذه العملية تصميم مدمج لدرجة كبيرة وتشغيل فعّال مع السماح بتغيرات واسعة في توتر الدخل. وأجهزة الحاسبات الشخصية ومعظم الأجهزة المكتبية بالإضافة إلى الخوانق الالكترونية الخاصة بأنظمة الإنارة الفلوريسانتيّة الحديثة تعتمد على هذا المبدأ. وكنماذج من الأجهزة أحادية الطور التي تشبه التيار أجهزة الاستقبال التلفزيونية، الحواسيب الشخصية، وأفران الميكروويف.

والشكل (16) يبين شكل الموجة الناتج عن جهاز مجموعة تلفزيونية 23 بوصة وطيفها التوافقي (كنسبة مئوية من المركبة الأساسية) مقاسة بجهاز محلل توافقيات حيث يتضح أن التوافقيات الرئيسة حسب الأهمية هي الثالثة 72%، الخامسة 60%، السابعة 40%، والتاسعة 22.6% من مطال التردد الأساسي.



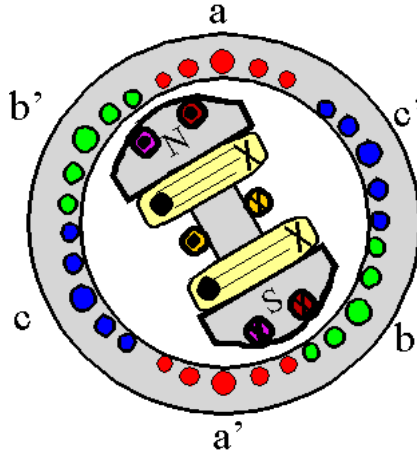
الشكل (16) يبين شكل موجة مجموعة تلفزيونية وطيفها التوافقي

6- توافقيات الآلات الدوارة Rotating Machine Harmonics

تولد الآلات الدوارة توافقيات بسبب توزيع الحقل المغناطيسي للأقطاب الساكنة، حيث تتعلق النفاذية المغناطيسية بشكل المجاري وبإشباع الدارة الرئيسة، وكنتيجة لصغر عدم التناظر للقسم الثابت أو لمجاري القسم الدوار نتيجة لعدم التماثل الطفيف في فتحات الجزء الثابت أو الدوار للآلة، أو عدم الانتظام الطفيف في أنماط الملفات ثلاثية الأطوار للآلة دوارة، يمكن أن تتولد التيارات التوافقية. وتعمل تلك التيارات على تحريض قوة محرك كهربائية (EMF) في ملفات الثابت عند تردد يساوي نسبة السرعة/طول الموجة.

وتتولد التوافقيات في الآلة كتابع للسرعة نتيجة توزيع القوى المحركة المغناطيسية فيها، وتتولد تيارات توافقية إضافية عند حالة إشباع النواة.

والتوافقيات المتولدة في المولدات التزامنية لن تؤخذ بالاعتبار إذا كانت استطاعة المولد الإسمية أقل من 1000 kVA.

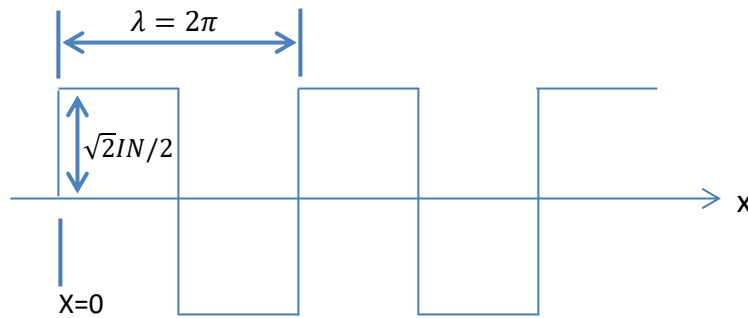


الشكل (17) يبين مقطع في بنية الآلة الدوارة

5-1- التوتر التوافقي المتولد عن الآلات المتزامنة

Voltage Harmonics Produced by Synchronous Machines

إذا كان التدفق المغناطيسي لنظام الحقل موزعاً بشكل جيبي دقيق حول الثغرة الهوائية فإن القوة المحركة الكهربائية المتولدة عند كل خطوة ملف كامل من ملفات الدائر ستساوي إلى $2\pi f\Phi \sin wt$ فولت /لفة، حيث Φ تمثل التدفق الكلي للقطب و f تمثل التردد المتعلق بالسرعة وبعدد أزواج الأقطاب، وبكل الأحوال فإن التدفق لن يتوزع بانتظام تام وخاصة في الآلات ذات القطب الساكن. ويبين الشكل (18) القوة المحركة المغناطيسية وتوزع التدفق في طور واحد لملفات بخطة كاملة متعددة الأطوار بمجرى واحد لكل قطب في كل طور مع فرضية ثغرة هوائية ثابتة وعدم وجود إشباع في الحديد



الشكل (18) القوة المحركة المغناطيسية وتوزع التدفق

وتمثيل توزيع المجال المغناطيسي في المجال الترددي للشكل السابق يعطى بالعلاقة:

$$F(X) = \frac{2\sqrt{2}IN}{\pi} \left[\sin \frac{2\pi x}{\lambda} + \frac{1}{3} \sin \left(3 \frac{2\pi x}{\lambda} \right) + \frac{1}{5} \sin \left(5 \frac{2\pi x}{\lambda} \right) + \dots \right]$$

لذلك فإن التوزيع التربيعي للقوة المحركة المغناطيسية يتناهي إلى مركبات أساسية وتوافقية، ويكون مطال التوافقية ذات الرتبة n^{th} مساوياً إلى $1/n$ مرة للخطوة القطبية الأساسية.

وبشكل عام للتيارات المتناوبة يكون التردد الزاوي مساوياً إلى $w=2\pi f$ وتصبح المعادلة بالشكل الآتي:

$$F(X) = \frac{2\sqrt{2IN}}{\pi} \sin(\omega t) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(n \frac{2\pi x}{\lambda}\right), \text{ for } n \text{ odd}$$

ولذلك يمكن التعبير عن توزيع الحقل غير الجيبي كسلسلة توافقية كما يلي:

$$F(X) = F_1 \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) + F_3 \sin\left(\frac{3 \times 2\pi x}{\lambda}\right) + F_5 \sin\left(\frac{5 \times 2\pi x}{\lambda}\right) + \dots$$

ويمكن اعتبار أن الآلة يمكن أن تحوي 2p أقطاب أساسية مع 6p, 10p,2np أقطاب توافقية

وجميعها جيبيية بشكل مستقل وتولد قوى محرك كهربائية في الملفات المرافقة، ويعبر عنها بالعلاقة:

$$E_{(t)} = E_1 \sin \omega t + E_3 \sin \omega t + E_5 \sin \omega t + \dots$$

7- المشكلة والهدف The Problem & The Target

ومما سبق يتضح أن وجود تلك التوافقيات تسبب مشاكل جمّة في نظم الطاقة الكهربائية وفي التجهيزات الحساسة المرتبطة بهذه النظم، ومن تلك المشاكل للتوافقيات آثار سلبية متعددة وتتمثل بعضها في زيادة المفايد النحاسية والحديدية في المحركات والمحولات والكابلات بسبب التأثير القشري Skin Effect، وارتفاع قيم التيارات عالية التردد، وهو ما يقود إلى تسخين زائد، انخفاض الكفاءة، وقصر العمر التشغيلي للمعدات، وتتسبب أيضاً بإجهادات عالية على نظم العزل الكهربائي للمحولات والكابلات تؤدي إلى انهيار العزل وحدوث دارات قصر، يزداد معها احتمالات الأعطال والحرائق في المنشآت الصناعية، وتتسبب التوافقيات في تشويه الموجة الجيبية مما يؤثر على أداء المعدات الحساسة مثل أنظمة التحكم، الحواسيب الصناعية، وأجهزة القياس، وقد تتسبب في أعطال متكررة أو تشغيل خاطئ للقواطع والريليات، كما تؤثر التوافقيات في قيم عامل الاستطاعة (PF) Power Factor إذ يؤدي وجود مكونات تيارية عالية التوافقيات إلى خفض معامل القدرة الكلي حتى مع وجود تعويض سعوي، مما يرفع التيارات المسحوبة من الشبكة ويزيد الفقد في الخطوط.

وينتج أيضاً في الأنظمة الكهربائية التي تحتوي على أحمال غير خطية مرور تيارات غير جيبيية تتسبب في حقن توافقيات متعددة الرتب في خطوط التوزيع ثلاثية الطور، وفي الموصل المحايد وترفع درجة حرارته وتخفض كفاءة التوصيل فيه.

وللتوافقيات آثار اقتصادية سلبية، حيث يرتبط تشوه موجتي التوتر والتيار بزيادة استهلاك الطاقة غير الفعالة Reactive Power، وتعاضم تكاليف الصيانة، وتوقعات غير مخططة لخطوط الإنتاج نتيجة تلف

أو توقف معدات إلكترونية حساسة. يشكّل هذا الأمر مبرراً رئيساً لاستثمارات إضافية في حلول تحسين جودة الطاقة/ القدرة والحد والتخفيف من آثار التوافقيات في المصانع والمنشآت ذوات الاستهلاك الكبير للطاقة الكهربائية.

ومما تقدم لابد من وجود حلول ناجعة تخفف أو تلغي تلك الآثار السلبية على النظم الكهربائية، وقد دأب العملاء والباحثون في هذا المجال إلى دراسة تلك الظاهرة وتحليلها هندسياً ورياضياً وتوصلوا إلى حلول عديدة على مدى عقود سابقة، ولا تزال الأبحاث والدراسات مستمرة ليومنا هذا لتطوير أنظمة حديثة تدخل فيها الإلكترونيات الصناعية الاستطاعية مع شرائح المتحكمات الصغيرة Micro-Controllers Chips وإدخال الذكاء الصناعي مع تلك الحلول مما ساعد الشركات بإنتاج أجهزة متطورة لفلتره ولتخفيف أو إلغاء أثر التوافقيات في النظم الكهربائية نذكر منها:

- | | |
|---|---|
| ○ Passive harmonic filter | مرشح توافقي سلبي |
| ○ Single-tuned passive filter | مرشح سلبي أحادي الضبط |
| ○ Multi-tuned passive filter | مرشح سلبي متعدد الضبط |
| ○ C-type passive filter | مرشح سلبي من النوع C |
| ○ High-pass passive filter | مرشح سلبي عالي التمرير |
| ○ Broadband passive filter | مرشح سلبي عريض النطاق |
| ○ Shunt active power filter (SAPF) | مرشح طاقة فعال تفرعي |
| ○ Series active power filter (SeAPF) | مرشح طاقة فعال تسلسلي |
| ○ Hybrid active power filter (HAPF) | مرشح طاقة فعال هجين |
| ○ Distribution static compensator (DSTATCOM) | معوض ثابت للتوزيع |
| ○ Unified power quality conditioner (UPQC) | مُحسّن جودة طاقة موحد |
| ○ Dynamic voltage restorer (DVR – series active filter-based) | منظم جهد ديناميكي (DVR – قائم على مرشح فعال تسلسلي) |

8- الملخص Abstract

تُعرّف التوافقيات (Harmonics) على أنها مكوّنات أو موجات تيارية وتوترية ذات ترددات من مضاعفات التردد الأساسي وتظهر في الشبكات الصناعية التي تحتوي على أحمال كهربائية غير خطية (Non-Linear Loads)، حيث تتسبب في تشويه شكل الموجة الجيبية الأساسية بشكل تؤثر فيه سلباً على أداء التجهيزات والأحمال الكهربائية في النظام الكهربائي والتي تتطلب لعملها موجة جيبية نقية (Pure Sine)

(Wave)، وهو مطلب أساسي في موضوع جودة الطاقة الكهربائية في الأنظمة الكهربائية المختلفة من توليد ونقل وتوزيع واستهلاك وفق المعايير الدولية في هذا الحقل (International Requirement of Power Quality). تضمن البحث عدة نقاط تتعلق بالتوافقيات مثل المقدمة وتفصيل في التجهيزات التي تعدّ مصادر هامة للتوافقيات، مع بعض النماذج الرياضية للتوافقيات والرتب التوافقية السائدة وأنواع التوافقيات، والتعرف على أهم التجهيزات التي تتأثر سلباً بالتوافقيات، ثم الآثار التقنية والاقتصادية المترتبة على التجهيزات والأنظمة بأنواعها وعلى المنشأة المتضررة بالتوافقيات بشكل عام، ثم عرض حلول لتخفيف آثارها أو إلغائها على الأنظمة والتجهيزات المتصلة بالنظام الكهربائي المدروس.

9- المراجع References

- J. Arrilaga, N. R. Watson, S. Chen, (2001), Power System Quality Assessment, WILEY
- C. Sankaran, (2002), Power Quality, CRC Pres
- Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, H. Wayne Beaty, (1996), Electrical Power System Quality, Mc Graw-Hill
- C. Kocatepe, M. Uzunoğlu, R. Yumurtacı, A. Karakaş, O. Arıkan, (Kasım 2003), Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi
- C. Kocatepe, N. Umurkan, F. Atar, R. Yumurtacı, M. Uzunoğlu, A. Karakaş, O. Arıkan,
- M. Baysal, (Ocak 2006), Enerji Kalitesi ve Harmonikler, EMO Yayın No. EG/2006/1