

يتقدم مجلس إدارة
موقع و منتديات نظم القوى الكهربائية و شبكات النقل
بتقديم آسمى آيات الشكر و العرفان
للدكتورة / كاميليا يوسف – حفظها الله
على إهدائها هذا الكتاب لأعضاء المنتديات و للمهندسين العرب
و ندعو الله أن يديم عليها الصحة و العافية و أن يجعل هذا العمل فى ميزان
حسناتها يوم لا ينفع مال و لا بنون
عن مجلس الإدارة
م / سيد سعد

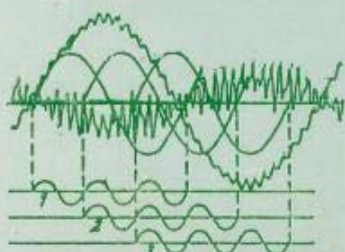
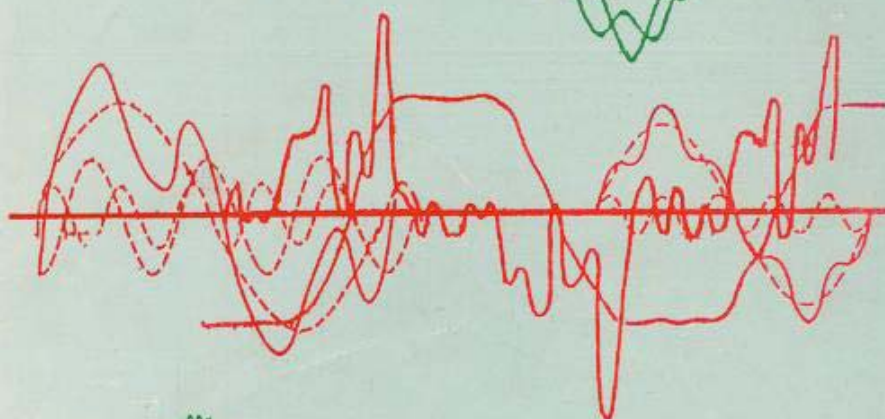
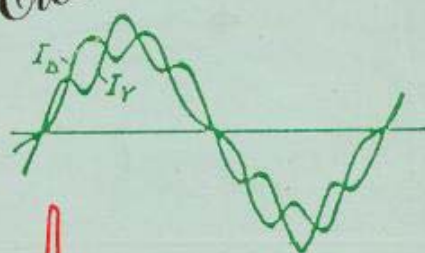
<http://www.sayedsaad.com/montada>

دكتور مهندس
كاميليا يوسف محمد

التوافقيات

في الشبكات الكهربائية

*The Harmonics
In Electrical Networks*



التوافقيات

في الشبكات الكهربائية

*The Harmonics
In Electrical Networks*

دكتور مهندس

كاميليا يوسف محمد

١٩٩٤	ابريل	طبعة اولى
١٩٩٨	مارس	طبعة ثانية
٢٠٠١	مايو	طبعة ثالثة
٢٠٠٥	مارس	طبعة رابعة

تصميم الغلاف :

م / أحمد طه هاشم

بسم الله الرحمن الرحيم

- ب -

بسم الله الرحمن الرحيم

مقدمة

ادى التقدم السريع فى استخدام الكترونيات القوى ، فى الصناعة ، والتزايد المستمر للاعمال الصناعية غير الخطية الى تشوه الموجات الكهربائية بصورة ملحوظة ، وقد اطلق بعض الباحثين على تشوه الموجات بالموجات الكهربائية "الملوثة" اى تلوث الموجة النقية بالتوافقيات .

وقد تعرض الكتاب الى التعريف بالتوافقيات وتحليل الموجات - مصادر وتأثير التوافقيات - حسابات المعاوقة الكلية للشبكة - الحدود القياسية لقيم التوافقيات بالشبكات الكهربائية - قياس التوافقيات - المرشحات وتصميماتها .

ولايفوتنى ان اتقدم بالشكر للسيد المهندس / أحمد مصطفى المفتى رئيس مجلس الادارة والعضو المنتدب على موافقة سيادته لاجراء هذا العمل لحيز الوجود . وقد وافق سيادته على طباعة الكتاب على نفقة الشركة بمطبعة العدل التى قامت بجهد مشرف فى طباعته واخراجه على هذا النحو .

الحمد لله الذى اعاننى على عمل هذا الكتاب ، والذى يهم جموع المهندسين ، وارجو من الله سبحانه وتعالى ان اكون قد وفقت فى ذلك .

وفقنا الله جميعاً إلى ما فيه خير بلدنا وصلى اللهم على سيدنا محمد وعلى صحبه وسلم .

د. كاميليا يوسف محمد

ابريل ١٩٩٤

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ج -

المفهرس

رقم الصفحة	الموضوع
١	المقدمة
١	الباب الأول
١	التوافقيات فى الشبكات الكهربائية
٢	تحليل "فورير" لموجات التيار والجهد
١٣	معادلة الجهد باستخدام تحليل "فورير"
١٣	معادلة التيار باستخدام تحليل "فورير"
١٧	القيم الفعالة لموجات التيار غير الجيبية
١٧	التوافقيات وجذر متوسط المربعات
١٨	التوافقيات والقيم المتوسطة
١٨	القدرة الفعالة لموجة تيار غير جيبية
١٩	التشوه بالتوافقيات
٢١	تأثير ملف المحاثه على شكل منحني التيار
٢٢	تأثير المكثف على شكل منحني التيار
٢٥	امثلة على التوافقيات فى الدوائر احادية الوجة
٣٠	امثلة على التوافقيات فى الدوائر ثلاثية الواجه
٣٩	التوافقيات بالتيار المستمر
	طرق اخرى لتسجيل التوافقيات
٤٠	- دالة الاحتمال التجمعية
٤٠	- الرسم البيانى النسيجي
٤٧	تعريفات
٥٣	الباب الثانى
٥٣	مصادر التوافقيات
٥٧	الالات الدوارة
٥٧	الالات المتزامنة

- ٤ -

٥٩	المولدات المتزامنة
٦٢	المحركات التآثيرية
٦٤	محولات القدرة
٧١	محولات الجهد والتيار
٧١	افران القوس الكهربى
٧٨	الاستعمالات المنزلية
٨٠	مصابيح الفلورسنت
٨٥	وسائل النقل الكهربائى
٨٦	السخانات التآثيرية
٨٦	اللحام الكهربى
٨٩	مبنى الأعمال الحاسبية
٩٣	مبدلات القدرة الاستاتيكية
١٠٥	الثيريزتور
١١١	مبدلات ذات قدرات كبيرة
١٢٩	المبدلات ذات القدرات المتوسطة
١٤١	المبدلات ذات القدرات الصغيرة
١٤٤	المبدل الدورى
١٥٣	الباب الثالث
١٥٣	تأثير التوافقيات
١٥٤	اولاً : تأثير التوافقيات على مكونات الشبكة الكهربائية
١٦٣	١ - تأثير التوافقيات على الآلات الدوارة
١٦٦	٢ - تأثير التوافقيات على المعدات الاستاتيكية للقدرة
١٦٦	أ - تأثير التوافقيات على خطوط النقل الكهربى
١٦٨	ب - تأثير التوافقيات على محولات القدرة
١٦٨	ج - تأثير التوافقيات على مكثفات القدرة
١٦٩	ء - تأثير التوافقيات على أنظمة التحكم التامجى
١٧٠	هـ - تأثير التوافقيات على أنظمة الوقاية

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ه -

١٧٣	و - تأثير التوافقيات على بعض الاجهزة المكتبية والمنزلية
١٧٤	س - تأثير التوافقيات على اجهزة قياس القدرة
١٧٥	ص - تأثير التوافقيات على معامل القدرة
١٧٧	ثانياً : تأثير التوافقيات على نظم الاتصالات
١٨٧	الباب الرابع
١٨٧	البيانات الاساسية للشبكة الكهربائية
١٨٧	١ - الكابلات
١٩٣	٢ - الخطوط الهوائية
١٩٥	٣ - المحولات
١٩٨	٤ - بيانات المصدر او المنفعة
١٩٨	٥ - المكثفات
٢٠٢	٦ - المفاعلات
٢٠٢	٧ - المحركات
٢٠٣	٨ - المولدات الموضعية
٢١٤	الباب الخامس
٢١٤	الحدود القياسية لقيم التوافقيات بالشبكة الكهربائية
٢١٤	١ - عامل تشوه الجهد
٢٢١	٢ - عامل تشوه التيار
٢٣٣	٣ - تداخل التليفونات
٢٣٤	الباب السادس
٢٣٤	قياس التوافقيات
٢٣٨	مرشحات التحليل الطيفي
٢٤٣	الطيف النظري وقياسات التوافقيات
٢٤٣	١ - محلات المرشحات المنفصلة
٢٤٤	٢ - محلات التوازي
٢٤٤	الطرق الرقمية للتحليل الطيفي
٢٤٧	تمثيل بيانات التوافقيات

- و -

٢٥٢	الاختبارات النوعية طبقاً للمواصفات القياسية
٢٦١	الباب السابع
٢٦١	المرشحات
٢٦٢	مرشح فض التوليف
٢٦٤	مرشحات التوافقيات
٢٧١	معييار تصميم المرشح
٢٧٤	مرشحات التوليف
٢٧٤	أ - مرشح التوليف الاحادى
٢٧٨	ب - مرشح التوليف المزدوج
٢٨١	مرشحات الاخماد
٢٩١	العلاقة بين مستوى قصر الشبكة وقدرة مصدر التوافقيات
٢٩٢	تصميم مرشح توالى
٢٩٦	خصائص مكونات المرشح
٢٩٧	تكاليف المرشحات
٣٠٧	العلاقة بين معاوقة المدخل والتردد لشبكة تحتوى على مرشح
٣١٩	المراجع

- ١ -

الباب الأول

التوافقيات فى الشبكات الكهربائية

مقدمة :

بدأ العلماء فى التفكير فى مشاكل التوافقيات كمصدر متاعب للشبكات الكهربائية منذ أواخر عقد ١٩٢٠ ، وذلك عندما توصلوا الى وجود تشوهات فى موجات الجهد والتيار بخطوط النقل الكهربى ، وتركز التفكير على الآلات المتزامنة والتأثيرية كمصدر للتوافقيات وتأثيرها على خطوط التليفونات بالإضافة الى الانهيارات الحادثة فى مكثفات القدرة .

وقد سجلت الملاحظات الآتية على الابحاث الأولية لخط نقل ٢٢٠ ك.ف بطول ٢٥٠

ميل :

١ - وجد ان القوة الدافعة الكهربائية (*emf*) ، عند جانب ارسال (*Sending end*) والمحتوية على توافقية ثالثة بقيمة ٧ ٪ ، تصبح قيمة التوافقية الثالثة ٥٣ ٪ ، عند جانب الاستقبال (*Receiving end*) .

٢ - تقل التوافقية الثالثة ، عند جانب الاستقبال ، وفى حالة الحمل الكلى من ٥٣ ٪ الى ٢٩ ٪ .

٣ - يكون معامل القدرة ٠,٨٤٨ ، للموجات المحتوية على توافقيات ، عند الجانب المتصل مع المولدات ، (يكون معامل قدرة الموجات الجيبية النقية ٩٦ ٪) .

٤ - يكون معامل القدرة ٠,٨٢ ، عند الحمل ، إذا كانت الموجة جيبية نقية عند ارسال .

٥ - تلاحظ على المحركات التأثيرية ، المركبة فى ذلك الوقت (حوالى ١٩٣٠) ان بها اهتزازات (*Vibrations*) ، وتصدر أصوات خشنة دورية (*Periodic rasping sounds*) .

ومنذ ذلك الحين بدأ الاهتمام بدراسة مصادر ومشاكل وكيفية التغلب على التوافقيات بالشبكات الكهربائية .

وقد تطورت صناعة الآلات المتزامنة والتأثيرية تطوراً كبيراً للتغلب على حدوث

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢ -

توافقيات بالشبكات الكهربائية وقد أمكن تقليل التوافقيات وأحياناً إلغاؤها عن طريق المجموعة الاتجاهية (Vector group) لمحولات القدرة والتي تقلل مركبات التتابعية الصفرية للتوافقيات (Zero-sequence harmonics) والتي تعتبر كمرشحات في مسارين (Two-way) لحماية شبكتي المصدر وتغذية الاحمال .

في الخمسين سنة الماضية ، استخدمت اليكترونيات القوى (Power electronics) بتوسع في أغراض مختلفة منها :

- أجهزة التحكم في صناعات متعددة مثل : التعدين - تشغيل وتشكيل المعادن - التكرير - النسيج ...

- أجهزة التحكم لتشغيل أفران القوس الكهربى سواء بالمقاومات أو الاشعة تحت الحمراء .

- أجهزة التحكم فى المحركات .

- الحاسبات الآلية وأجهزة تحليل البيانات ...

وتتسبب إلكترونيات القوى فى زيادة كبيرة فى الاحمال غير الخطية (Non-linear) الموصلة على الشبكة الكهربائية ، ومن خصائص هذه الاحمال أنها تستهلك تيارات مشوهة بدرجة ملحوظة ، أى أنها تحتوى على توافقيات ، تؤدي إلى تشوه فى شكل موجات الجهود .

ويصاحب وجود التوافقيات احتمال حدوث رنين (Resonance) فى الدائرة الكهربائية خاصة اذا وجدت فى الشبكة مكثفات تعويض ، والتي تؤدي بدورها إلى تكبير التوافقيات لدرجة خطيرة ، مما قد ينشأ عنه زيادة فى التحميل على الآلات الدوارة ومكثفات التعويض الموصلة على الشبكة الكهربائية وتؤثر هذه التوافقيات على أجهزة الاستقبال المركزية لاشارات التحكم عن بعد للشبكة كما أنها تؤدي إلى زيادة المفقودات وسخونة الآلات وانهايار العزل الكهربى للمعدات والكابلات ...

ويختلف تأثير التوافقيات تبعاً للنقاط الآتية :

- طبيعة مصادر التوافقيات بالشبكة .

- أماكن المعدات المصدرة للتوافقيات على الشبكة الكهربائية .

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢ -

- خصائص الشبكة الكهربائية ومكوناتها .

تحليل "فورير" لموجات التيار والجهد

يفترض أن تكون التيارات والجهود المترددة المتولدة ، من الناحية النظرية ، عبارة عن موجات جيبية نقية (*Pure sine waveform*) ، وذلك لتبسيط العمليات الحسابية ، كما يتم من الناحية العملية تصميم المولدات للحصول على موجات جيبية مثالية بقدر الامكان ، وقد وجد رغم احتياطات التصميم ان الموجات تحتوى على بعض التوافقيات الفردية (*odd harmonics*) وتصبح الموجه مشوهة وعندئذ تعرف بالموجة المركبة (*Complex wave*) ، ويمكن اهمال هذه التوافقيات اذا كانت موجودة بقيم صغيرة جداً ، وتحدث التشوهات فى موجات الدوائر المحتوية على معدات لخطية مثل : الموحدات (*Rectifiers*) ، لمبات التفريغ (*Discharge lamps*) ، القلب الحديدى المشبع (*Saturated iron core*)

وتعتبر موجات التيارات والجهود المترددة (*a.c*) دوال دورية (*Periodic*) فى الزمن ، كما فى الأشكال (١-١) ، (١-٢) ، (١-٣) ، ويعبر عنها بالمعادلة $y = f(t)$. وتتغير الاشارة (من الموجب الى السالب او العكس) للتيار والجهد المتردد عدة مرات خلال الدورة الواحدة (*cycle*) ، كما يكون عدد مرات التغيير فى الاشارة عادة زوجياً ، واقل عدد هو ٢ .

وتكون الدالة y موجة مترددة نقية اذا تحققت المعادلة الآتية

$$\int_0^T y dt = 0$$

اى ان المساحة تحت المنحنى الموجب والسالب خلال الدورة تساوى صفر وتكون خصائص الموجة النقية كالاتى :

$$T_1 = T_2 = T / 2$$

$$y(t + T / 2) = -y(t)$$

أى أن الجزء السالب للموجة يماثل الجزء الموجب ومزاح إلى اليسار أو الى اليمين بالقيمة $T/2$

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٤ -

حيث :

T_1 : الفترة الموجبة لدورة واحدة

T_2 : الفترة السالبة لدورة واحدة

T : طول فترة الدورة

f : التردد ويساوى $(1/T)$

وتكون الصورة العامة للدالة الدورية (Periodic function) المركبة ، غير جيبيية ، كالآتى :

$$y = f(x)$$

ويشترط ان تكون الزاوية المرحلية للدورة تساوى 2π لامكانية كتابتها رياضياً على شكل دالة مثلثية (Trigonometrical) ، كما فى شكل (١-٢) ، (١-٣) وتحلل الدالة الدورية باستخدام تحليل فوريير (Fourier) إلى

$$y = f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin (nx + \Phi_n) \dots\dots\dots [1] .$$

حيث a_0 = قيمة مركبة التيار المستمر (d.c component)

a_n = قيمة مركبات التوافقيات .

n = درجة التوافقية .

a_1 = قيمة المركبة الأساسية (Fundamental component)

a_2 = قيمة مركبة التوافقية الثانية (2nd harmonic component)

a_3 =

ويلاحظ ان a_0 كمية غير دورية (not periodic)

ويكون تردد التوافقية رقم n يساوى n مرة من التردد الأساسى ، أى ان

$$f_n = nf$$

حيث

f_n تردد التوافقية n

f تردد الشبكة الكهربائية .

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٥ -

ويوضح شكل (١-٤) موجة أساسية وموجات التوافقيات الثالثة والخامسة والسابعة
بينما يوضح شكل (١-٥) الموجة الأساسية وموجات التوافقيات الثانية والثالثة والخامسة
وتردداتها وتكتب المعادلة رقم [1] على إحدى الصور الآتية :

$$y = f(x) = B_0 + B_1 \cos nx + B_2 \cos nx + \\ + A_1 \sin nx + A_2 \sin nx + [2]$$

or

$$y = f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} B_n \cos nx + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin nx [3]$$

or

$$y = f(x) = B_0 + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cos nx + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin nx [4]$$

حيث :

$$A_n = a_n \cos \Phi_n$$

$$B_n = a_n \sin \Phi_n$$

$$\tan \Phi_n = \frac{B_n}{A_n}$$

ويستخدم تحليل "فورير" لتحليل موجات التيار والجهد لتحديد التوافقيات بهما وعند
استخدام المعادلة رقم [4] وبالتعويض بالآتي

$$x = \omega t$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \text{Fundamental angular frequency}$$

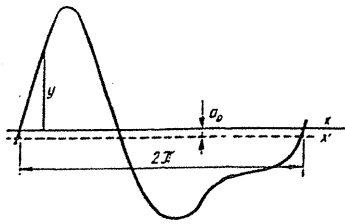
$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

$$B_o = \frac{1}{T} \int_0^T y(t) dt$$

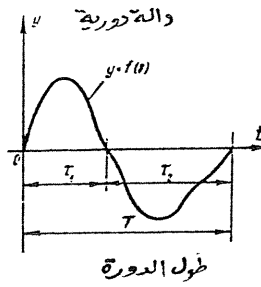
نحصل على

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٦ -



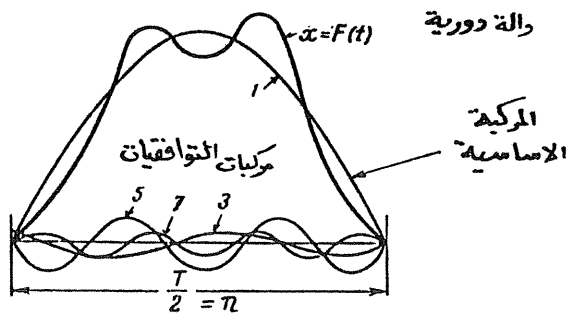
شكل (١-٢)



شكل (١-١)



شكل (١-٣)



شكل (١-٤)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- v -

$$f(t) = B_0 + B_1 \cos \omega t + B_2 \cos 2\omega t + \dots + A_1 \sin \omega t + A_2 \sin 2\omega t + \dots$$

$$f(t) = B_0 + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cos n\omega t + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin n\omega t$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \sin n\omega t dt$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \cos n\omega t dt$$

وتكون B_0 مساوية للمساحة تحت الموجة ، موضوع التحليل ، مقسومة على فترة الدورة ، ويعنى آخر أن B_0 هي القيمة المتوسطة (average) للدالة وتكون المركبة الاساسية للموجة تساوى

$$\text{Fundamental component} = B_1 \cos \omega t + A_1 \sin \omega t$$

ومركبات التوافقيات للدرجة n تساوى

$$n^{\text{th}} - \text{harmonic component} = B_n \cos n\omega t + A_n \sin n\omega t$$

ويمكن تصنيف الموجات بشكل عام . إلى :

أ - الموجة الموضحة بشكل (١-٦) والتي يكون نصفها الاول صورة مرآوية (mirror image) للنصف الثانى للموجة وتخضع للمعادلة

$$-f(x) = f(x+\pi)$$

تتحقق هذه المعادلة بالشرطين التاليين :

$$- \sin nx = \sin (nx + n\pi) = (-1)^n \sin nx$$

$$- \cos nx = \cos (nx + n\pi) = (-1)^n \cos nx$$

وتتحقق المعادلتين السابقتين ايضاً ، عندما تكون n عدد فردى (odd) وعلى ذلك فان المنحنى بشكل (١-٦) أ منحنى دورى يحتوى فقط على توافقيات فردية .

ب - الموجة الموضحة بشكل (١-٦) ب ، والتي تكون متماثلة حول نقطة الاصل للمحاور وتخضع للمعادلتين الآتيتين :

$$f(-x) = -f(x) \quad \text{and}$$

$$f(2\pi - x) = -f(x)$$

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٨ -

وتتحقق هاتين المعادلتين فقط اذا كانت الموجة الاساسية (المعادلة رقم ٤) تحتوى على المركبات الجيبية فقط (*sine*) سواء كانت فردية (*odd*) او زوجية (*even*) .

وعلى ذلك فان المنحنى بشكل (١-٦) ب منحني دورى يحتوى فقط على مركبات التوافقيات الجيبية (*sine harmonic*) .

ج - الموجة الموضحة بشكل (١-٦) ج والتي تكون متماثلة حول نقطة الاصل للمحاور وايضاً متماثلة عند الموضع $x = \pi/2$ (او نصف الموجة الاول صورة مرآوية للنصف الثانى) . ويكون هذا المنحنى دورى ويحتوى على مركبات التوافقيات الجيبية الفردية (*odd sine harmonics*) .

وتعرف الاشكال الموضحة بشكل (١-٦) أ، ب، ج بالموجات المشوهة (*distorted waves*) او بالموجات المركبة (*Complex waves*) والتي تحلل الى عدة موجات جيبية نقية لها ترددات وقيم مختلفة ويكون للموجة الرئيسية نفس تردد الموجة المركبة وتسمى بالموجة الاساسية (*Fundamental*) وباقي الموجات تمثل مركبات التوافقيات التي تحتويها الموجة المركبة .

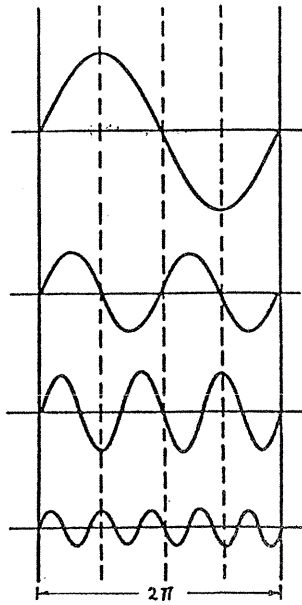
يوضح شكل (١-٧) أمثلة لتحليل بعض الموجات المركبة الى موجة أساسية ومركبات التوافقيات ، فمثلاً فى شكل (١-٧) أ ، ب تتكون الموجة الرئيسية المركبة من موجة أساسية ومركبة التوافقية الثانية ويلاحظ فى شكل (١-٧) ب ان مركبة التوافقية الثانية تتأخر عن الموجة الاساسية بزاوية ٥٠° وتكون موجتا النصف دورة مختلفتان فى كل من الموجتين بشكل (١-٧) أ، ب . كما تظهر موجة مركبة فى شكل (١-٧) ج ، د وهى عبارة عن موجة أساسية ومركبة التوافقية الثالثة ، وتتأخر مركبة التوافقية الثالثة بزاوية ٣٠° عن الموجة الاساسية وذلك بشكل (١-٧) د . ويوضح شكل (١-٧) هـ موجة مركبة عبارة عن موجة أساسية ومركبة التوافقية الخامسة ، كما نجد فى شكل (١-٧) و موجة مركبة من موجة أساسية ومركبتى التوافقية الثالثة والخامسة .

نستخلص من ذلك أن الموجة المركبة تتركب من مركبة اساسية ومركبات التوافقيات الفردية (*odd*) اذا كان نصفاً الموجة المركبة (الموجب والسالب) متماثلتين (*identical*) ، بينما اذا كان نصفاً الموجة المركبة مختلفتين ، فانها تحتوى على مركبة اساسية ومركبات التوافقيات الزوجية (*even*) فقط .

كما فى النظام الاحادى الوجه ، تحدث التوافقيات فى النظام الثلاثى الوجة ولكن

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٩ -



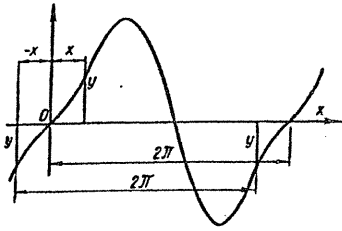
الموجة الاساسية
وترددتها $f = 50 \text{ Hz}$

مركبة التوافقية الثانية
وترددتها $f_2 = 2f = 100 \text{ Hz}$

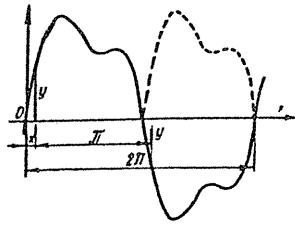
مركبة التوافقية الثالثة
وترددتها $f_3 = 3f = 150 \text{ Hz}$

مركبة التوافقية الخامسة
وترددتها $f_5 = 5f = 250 \text{ Hz}$

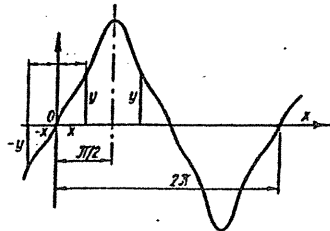
شكل (٥-١)



ب،



د،

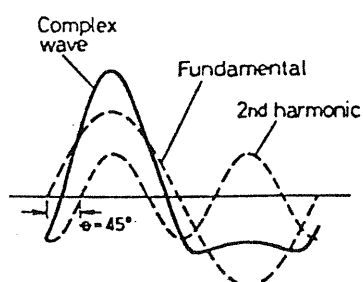


ج،

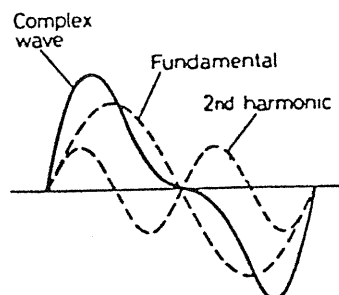
شكل (٦-١)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

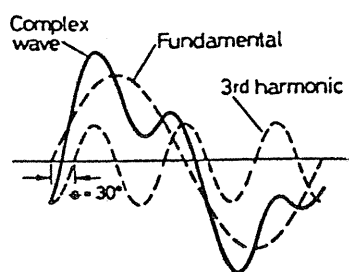
- ١٠ -



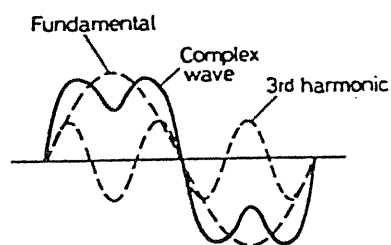
(ب)



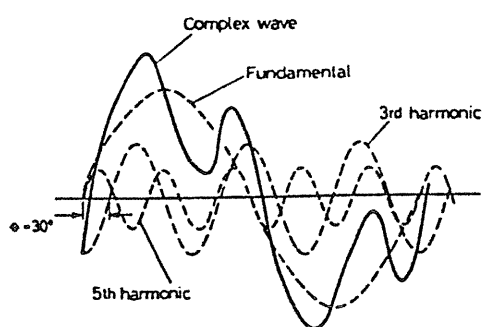
(ا)



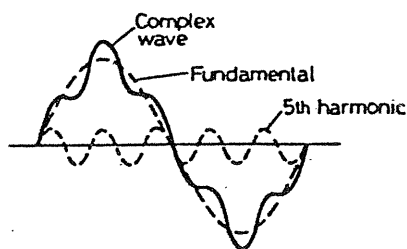
(س)



(ح)



(و)



(هـ)

شكل (٧-١)

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١١ -

لاحتوى على توافقيات زوجية ، وغالباً تكون التوافقيات الفردية مضاعفات الثلاثة (الثالثة ، التاسعة) ولكن الأكثر شيوعاً هي التوافقية الثالثة ، وكمثال نجد فى شكل (١-٨) الموجات الاساسية للثلاثة أوجه A, B, C لنظام ثلاثى الواجه ، وتوجد زاوية اختلاف 120° بين كل وجهين ، وكل موجة تحتوى على التوافقية الثالثة ولا توجد زاوية اختلاف بين موجات التوافقية الثالثة للثلاثة أوجه ، وعلى ذلك تكون موجات التوافقية الثالثة متساوية وفى اتفاق مرحلى للثلاثة أوجه لنظام متزن .

ويكون النظام الثلاثى الواجه ، عادة ، اما متصل على شكل نجمة (Star) ، (ثلاثة اسلاك Three wire) ، أو نجمة تحتوى على أربعة أسلاك (Four-wire) أو أخيراً متصل على شكل دلتا (Delta) .

ويوضح شكل (١-٩) أ توصيلة نجمة / ثلاثة أسلاك لنظام ثلاثى الواجه جهد كل وجه عبارة عن مركبة اساسية ومركبة التوافقية الثالثة .

وحيث ان مركبة التوافقية الثالثة فى كل وجه تكون متساوية وفى اتفاق مرحلى مع بعضها فان فارق الجهد للتوافقية الثالثة بين أى وجهين يساوى صفر ، فمثلاً لحساب فرق الجهد بين الوجهين A, B فان الجهد الناتج من وجود المركبة الاساسية يكون

$$V_{AB} = V_A - V_B = 1.73 V_A$$

والجهد الناتج من وجود مركبة التوافقية الثالثة يكون

$$V_{AB3} = V_{A3} - V_{B3} = 0$$

لان V_{B3} , V_{A3} متساويان فى القيمة وفى اتفاق مرحلى .

معنى ذلك ان فى التوصيل نجمة / ثلاثة أسلاك يكون الجهد بين أى وجهين (جهد الخط) عبارة عن المركبة الاساسية فقط ، ولا تظهر مركبة التوافقية الثالثة فى جهد الخط (Line voltage) ، كما لا تظهر جميع التوافقيات الفردية التى تقبل القسمة على ثلاثة .

نجد فى النظام ثلاثى الواجه الموصل نجمة / اربعة أسلاك أن التوافقية الثالثة الموجودة فى النظام ، تظهر فى جهد الوجه (Phase voltage) ، وتؤدى إلى ظهور مركبة التوافقية الثالثة للتيار والتى تكمل مسارها فى توصيلة النجمة للحمل الموصل على مصدر التغذية أو من خلال سعوية الارضى للشبكة ، كما فى شكل (١-٩) ب . واذا كان

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٢ -

الحمل متزنًا فإن المركبة الأساسية للتيار لا تتسبب في مرور تيار في سلك التعادل (*Neutral wire*) ، بينما تكون مركبة التوافقية الثالثة للتيار في الثلاثة أوجه في اتفاق مرحلي مع بعضها لذلك يمر بسلك التعادل تيار تصل قيمته الى ثلاثة امثال مركبة التوافقية الثالثة للتيار المار بالوجه .

في شكل (٩-١) ب اذا كانت قيمة سعوية الارضى كبيرة ، فإنها تؤدي إلى حالة الرنين (*resonance*) ، وذلك اذا كان التردد الطبيعي (*Natural frequency*) للنظام نتيجة توزيع التيار بالشكل ، ثلاثة امثال تردد النظام (*System frequency*) او مضاعفاتها .

فإذا كان النظام الثلاثي الوجه موصلاً على شكل دلتا (*delta*) ، كما في شكل (١٠-١) أ وكانت موجة الجهد تحتوي على التوافقية الثالثة ، وحيث انها متساوية القيمة وفي اتفاق مرحلي مع بعضها ، في الثلاثة أوجه ، فانها تتسبب في مرور تيار التوافقية الثالثة داخل الدلتا ولا يظهر تأثيرها على اطراف مخرج الجهد ، وذلك في حالة اتزان النظام فقط ، ويؤدي مرور التوافقية الثالثة داخل الدلتا الى :

- زيادة المفقودات .

- سخونة الملفات .

- تشوه المجال المغناطيسي الرئيسي .

اما إذا أخذنا في الاعتبار توصيلة الزجراج (*Zigzag*) الموضحة في شكل (١٠-١) ب ، على ان تكون الجهود الاساسية للجزئين المكونين لكل وجه بينهما زاوية 60° ، وعلى ذلك فإن التوافقية الثالثة ، تبعاً لشكل (١٠-١) ب ، تكون مزاحة بزاوية $90^\circ \times 3 = 180^\circ$ وعلى ذلك فان كل منهما في اتجاه مضاد مع الاخرى وتلغيها فلا تظهر في الدائرة الخارجية ، وبذلك فان هذه التوصيلة تناسب التأريض المباشر لنقطة التعادل .

وفي المحولات ذات التشبع المعتدل (*Moderate saturation*) فان التوافقيات الخامسة و السابعة تحدث تأثير بالقلب وتشوه تيارات المغنطة وتمر هذه التيارات بالشبكة الكهربائية ، وتشكل كل توافقية نظام ثلاثي الوجه ، وعلى سبيل المثال اذا وصلت ملفات متصلة نجمة مع ملفات متصلة دلتا او زجراج فان جهود هذه النظم تكون في اتجاه مضاد وبناء على ذلك فانه من الممكن حدوث تعويض لتيارات التوافقيات العاليه للشبكة

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١٣ -

الخارجية المتصلة بالملفات عن طريق توصيل ازواج من المحولات المتعددة ذات التوصيلات المختلفة ، فمثلاً يوضح شكل (١١-١) أ توصيلة ملفات نجمة وأخرى دلتا ، بينما يوضح شكل (١١-١) ب تيارات المغنطة بالتوصيلتين نجمة (I_y) والدلتا (I_Δ) ، وكذلك مجموع التيارين ($I_{Y+\Delta}$) بالشبكة والذي يكون غالباً خالياً من أى توافقيات .

ونستخلص من ذلك فى حالات التوصيل المختلفة للملفات ثلاثية الاوجه (النجمة - الدلتا - الزجراج) لنظام ثلاثى الاوجه ، لا تظهر مركبة التوافقية الثالثة فى جهود الخط بينما يمكن ان تظهر باقى التوافقيات الاخرى او بعضها .

معادلة الجهد باستخدام تحليل "فورير"

من المعادلة رقم (I) يمكن كتابة معادلة الجهد باستخدام تحليل فورير كالاتى :

$$v = V_0 + V_{1m} \sin(\omega t + \phi_1) + V_{2m} \sin(2\omega t + \phi_2) + \dots$$

$$= V_0 + \sum_{n=1}^n V_{nm} \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (5)$$

حيث

V_0 = المركبة الثابتة للجهد (Constant voltage component)

وتساوى متوسط قيمة الجهد (mean) للدورة .

V_{nm} = قيمة الذروة (Peak) لموجة جهد التوافقية من الدرجة n .

n = درجة التوافقية

ϕ_n = زاوية البداية والتي تعتمد على قيمة المركبة عند نقطة بداية الزمن ($t=0$)

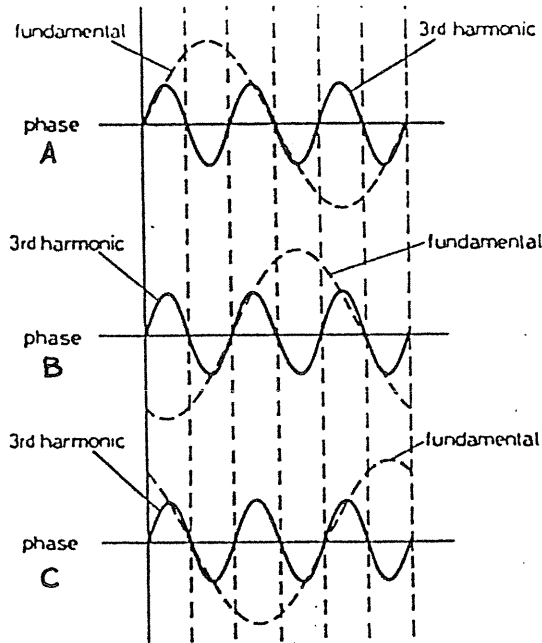
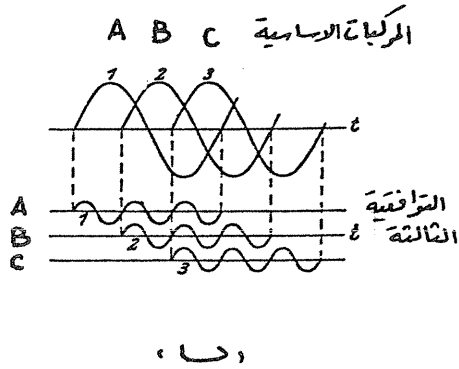
معادلة التيار باستخدام تحليل "فورير"

من المعادلة رقم [1] يمكن كتابة معادلة التيار باستخدام تحليل فورير كالاتى

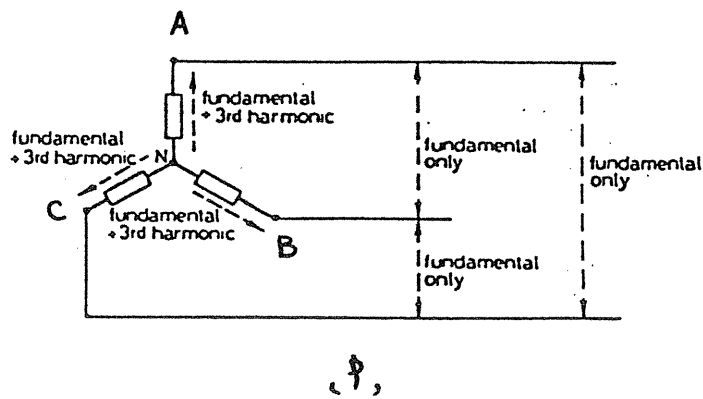
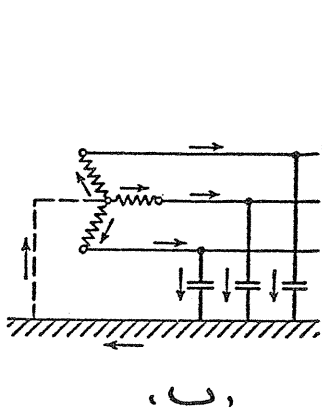
$$i = I_0 + \sum_{n=1}^n I_{nm} \sin(n\omega t + \phi_n - \psi_n) \quad (6)$$

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٤ -

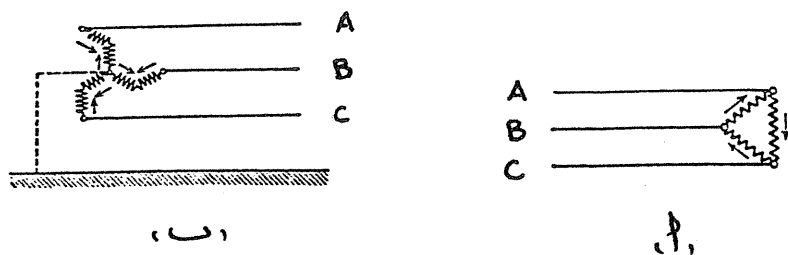


شكل (٨-١)

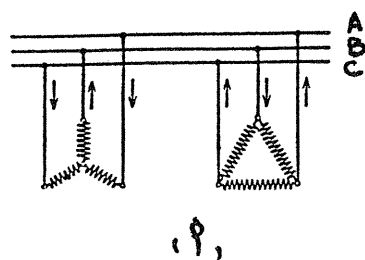
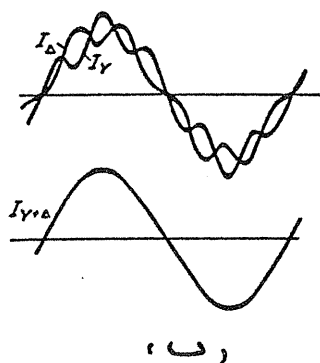


شكل (٩-١)
« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١٥ -



شكل (١-١٠)



شكل (١-١١)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١٦ -

حيث :

I_0 = المركبة الثابتة للتيار والتي نحصل عليها باستخدام المركبة الثابتة للجهد V_0

I_{nm} = قيمة الذروة (Peak) لموجة تيار التوافقية من الدرجة n .

Ψ_n = زاوية الازاحة بين مركبة الجهد والتيار للدرجة n .

وباستخدام دائرة مبسطة كما في شكل (١٢-١) أ وقد تم تمثيل الحمل بالمقاومتين R_1 , R_2 والملف L والمكثف C فان :

$$I_0 = \frac{V_0}{R_0}$$

حيث R_0 المقاومة المكافئة للدائرة ، ومن الشكل (١٢-١) أ فان

$$R_0 = R_1 + R_2$$

وتكون قيمة الذروة لموجة تيار التوافقيات

$$I_{nm} = \frac{V_{nm}}{Z_n}$$

حيث :

Z_n معاوقة التيار عند التردد الزاوي $n\omega$.

وتكون زاوية الازاحة Ψ_n

$$\tan \Psi_n = \frac{X_n}{R_n}$$

$$Z_n = R_n + j X_n$$

باستخدام الدائرة بالشكل (١٢-١) أ فان

$$R_n = R_1 + \frac{R_2 \left[\frac{1}{n\omega C} \right]^2}{R_2^2 + \left[\frac{1}{n\omega C} \right]^2}$$

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١٧ -

$$X_n = n\omega L \frac{R_2^2 \left[\frac{I}{n\omega c} \right]}{R_2^2 + \left[\frac{I}{n\omega c} \right]^2}$$

القيم الفعالة لموجات التيار غير الجيبية

The effective values of nonsinusoidal currents

تكون المعادلة العامة للقيمة الفعالة للتيار هي جذر متوسط المربعات (root - mean - square) كالآتي

$$I = \frac{1}{T} \sqrt{\int_0^T i^2 dt}$$

ويقسمة أقصى تيار I_m على القيمة الفعالة للتيار I نحصل على عامل القيمة أى أن

$$K_A = \frac{I_m}{I} = \text{Amplitude factor}$$

أما للموجة الجيبية للتيار فيكون هذا العامل مساوياً $\sqrt{2}$ بينما لايساوى $\sqrt{2}$ للموجة غير الجيبية .

Harmonics and r.m.s values التوافقيات وجذر متوسط المربعات

من المعادلة رقم [1] تكون قيمة جذر متوسط المربعات فى حالة وجود التوافقيات

$$r.m.s \text{ value} = \sqrt{a_0^2 + \frac{a_1^2}{2} + \frac{a_2^2}{2} + \dots}$$

وتكون قيمة جذر متوسط مربعات الجهود V باستخدام المعادلة رقم [5] هي

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٨ -

$$r.m.s \text{ value of voltage} = \sqrt{V_0^2 + \frac{V_1^2}{2} + \frac{V_2^2}{2} + \dots}$$

حيث $\frac{V_{1m}}{\sqrt{2}}$ قيمة جذر متوسط المربعات للمركبة الاساسية للجهد

$\frac{V_{2m}}{\sqrt{2}}$ قيمة جذر متوسط المربعات للتوافقية الثانية للجهد

وتكون قيمة جذر متوسط مربعات التيار i باستخدام المعادلة رقم [6]

$$r.m.s \text{ value of current} = \sqrt{I_0^2 + \frac{I_{1m}^2}{2} + \frac{I_{2m}^2}{2} + \dots}$$

التوافقيات والقيم المتوسطة Harmonics and mean values

وتكون القيمة المتوسطة للتيار كالاتى

$$I_{mean} = \frac{2}{\pi} \left[I_{1m} + \frac{I_{3m} \cos \Psi_3}{3} + \dots + \frac{I_{nm} \cos \Psi_n}{n} \right]$$

ويوضح شكل (١٢-١) تمثيلاً للموجة الاساسية والتوافقية الثالثة والزاوية Ψ_3 بينهما.

القدرة الفعالة لموجة تيار غير جيبية

The active power of a nonsinusoidal current

تستخدم معادلة مماثلة لمعادلة القدرة الفعالة لموجة التيار الجيبية وهى :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T v i dt$$

حيث v, i القيم الخطية للتيار والجهد

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٩ -

$$or \quad P = V_0 I_0 + \sum_{n=1}^n V_n I_n \cos \Psi_n$$

التشوه بالتوافقيات Harmonics distortion

يعرف تشوه التوافقيات الكلى والذي يرمز له بالرموز THD كالاتى

The total harmonic distortion is defined as :

$$\frac{\text{r.m.s value of all harmonics}}{\text{r.m.s value of the fundamental}} \times 100$$

وبتحليل التيار i تبعاً للمعادلة الآتية

$$i = I_0 + I_{1m} \sin \omega t + I_{2m} \sin 2\omega t + I_{3m} \sin 3\omega t + \dots$$

ويكون التيار الناتج من التوافقيات

$$= I_{2m} \sin 2\omega t + I_{3m} \sin 3\omega t + \dots$$

ويكون جذر متوسط المربعات rms للتوافقيات يساوى

$$= \sqrt{(1/2) I_{2m}^2 + (1/2) I_{3m}^2 + (1/2) I_{4m}^2 + \dots} \quad [7]$$

حيث I_{2m}, I_{3m}, I_{4m} اقصى قيمة لتيار التوافقيات

$$\text{r.m.s value of the fundamental} = \frac{I_{1m}}{\sqrt{2}} = \sqrt{(1/2) I_{1m}^2} \quad (8)$$

وبقسمة المعادلة (7) على المعادلة (8) نحصل على التشوه الكلى للتوافقيات فى موجة

التيار والذي يساوى

$$THD (i) = \sqrt{\left[\left(\frac{I_{2m}}{I_{1m}} \right)^2 + \left(\frac{I_{3m}}{I_{1m}} \right)^2 + \left(\frac{I_{4m}}{I_{1m}} \right)^2 + \dots \right]} \times 100 = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} i_n^2}}{i_1} \times 100\%$$

ولحساب جهد التوافقيات نفرض ان معاوقة دائرة التوافقيات (tuned circuit) عند اى

تردد هى

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٠ -

$$Z = \frac{L/C}{R + j[\omega L - 1/\omega C]}$$

ويحدث توليف للدائرة عند التردد الاساسى وتكون معاوقتها عند الرنين هي

$$Z_r = \frac{L}{CR}$$

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \text{ اى عندما}$$

ويكون أقصى جهد حادث على الدائرة عند حالة الرنين هو

$$V_{1m} = I_{1m} Z_r$$

ويرمز للتردد الزاوى الاساسى Fundamental angular frequency بـ ω_o ويكون

تردد التوافقيات $n\omega_o$ حيث $n = 2, 3, 4, \dots$ ويمكن أهمل مقاومة دائرة التوليف في

حالة تردد التوافقيات بالمقارنة بمحاثة الدائرة ولذلك فان معاوقة التوافقيات تساوى :

$$Z_n \cong \frac{L/C}{j(n\omega_o L - \frac{1}{n\omega_o C})}$$

عندما

$$\omega_o L = \frac{1}{\omega_o C}$$

$$Z_n = \frac{L/C}{j\omega_o L (n - \frac{1}{n})}$$

وبقسمة كل من البسط والمقام على R نحصل على

$$Z_n = \frac{L/CR}{j(\omega_o \frac{L}{R}) (n - \frac{1}{n})} = \frac{Z_r}{jQ (n - \frac{1}{n})}$$

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢١ -

Where

$$Z_r = \frac{L}{CR}$$

$$Q = \omega_0 \frac{L}{R}$$

$$\frac{Z_n}{Z_r} = \frac{n}{jQ(n^2 - 1)}$$

ويكون أقصى جهد خلال دائرة التوليف لمركبات التوافقيات n .

$$V_{nm} = I_{nm} Z_n$$

وعلى ذلك فإن التشوه الكلي لتوافقيات الجهد يساوي

$$THD(v) = \sqrt{\left[\left(\frac{v_{2m}}{v_{1m}}\right)^2 + \left(\frac{v_{3m}}{v_{1m}}\right)^2 + \left(\frac{v_{4m}}{v_{1m}}\right)^2 + \dots\right]} \times 100 = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} v_n^2}}{v_1} \times 100\%$$

تأثير ملف المحاثية على شكل منحنى التيار

The effect of inductance coil on shape of the current curve

لو اعتبرنا تمثيلاً لمصدر تغذية كما في شكل (١٣-١) أ والحمل عبارة عن ملف محاثية وتكون القيمة الفعالة للجهد المسلط على الملف هي :

$$v = \sqrt{v_1^2 + v_3^2 + v_5^2 + \dots v_n^2}$$

وعادة تكون منحنيات الجهد المتردد متماثلة بالنسبة للزمن لذلك لا تظهر التوافقيات الزوجية.

وتكون القيمة الفعالة لكل توافقية تيار كالاتي :

$$I_n = \frac{V_n}{n\omega L}$$

وتكون القيمة الفعالة للتيار المار بالملف :

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٢ -

$$I = \sqrt{\left[\left(\frac{V_1}{\omega L}\right)^2 + \left(\frac{V_3}{3\omega L}\right)^2 + \left(\frac{V_5}{5\omega L}\right)^2 + \dots\right]}$$

or

$$I = \frac{1}{\omega L} \sqrt{V_1^2 + \frac{V_3^2}{9} + \frac{V_5^2}{25}}$$

ويوضح شكل (١٣-١) ب منحنى الجهد v والتيار i بالملف L ويلاحظ ان منحنى التيار اقل تشوهاً من منحنى الجهد وذلك نتيجة لان تأثير التوافقيات يتناقص مع زيادة درجة التوافقية برغم احتواء معادلة التيار I على نفس عدد التوافقيات فى معادلة الجهد V تأثير المكثف على شكل منحنى التيار

The effect of capacitor on shape of the current curve

يوضح شكل (١٤-١) أ تمثيل مكثف مع مصدر التغذية ، وتكون القيمة الفعالة لتيار التوافقية كالاتى :

$$I_n = V_n n\omega C$$

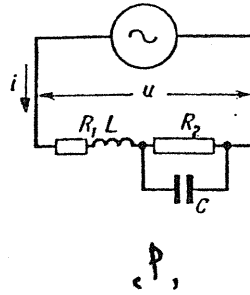
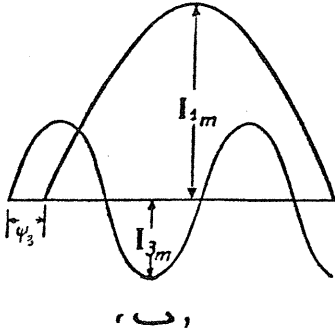
ويتعين التيار المار بالمكثف من المعادلة :

$$I = \omega c \sqrt{V_1^2 + 9 V_3^2 + 25 V_5^2 + \dots}$$

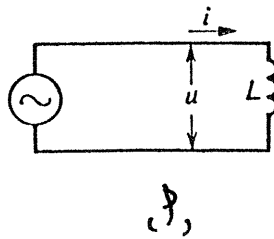
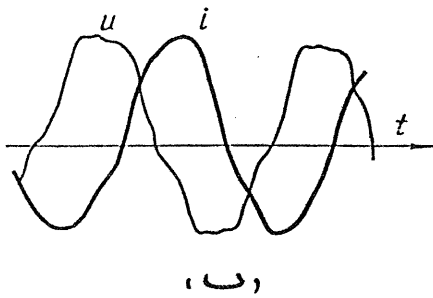
ويوضح شكل (١٤-١) ب موجة التيار i وموجة الجهد v للمكثف ، ويلاحظ تشوه اكبر لموجة التيار نتيجة ان المحاثه السعوية (Capacitive reactance) تقل كلما زادت درجة التوافقية .

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

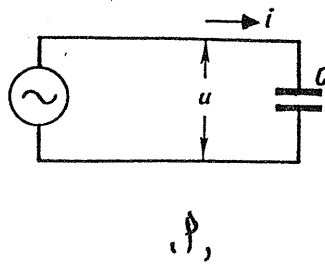
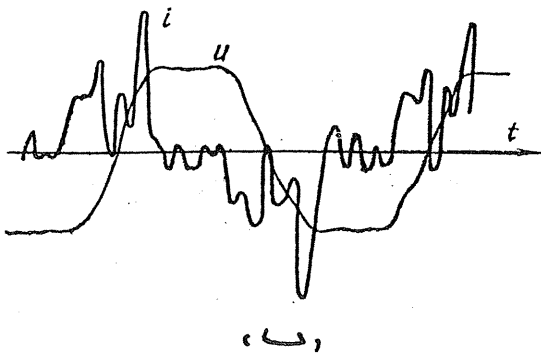
- ٢٣ -



شكل (١-١٢)



شكل (١-١٣)



شكل (١-١٤)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٤ -

جدول (١-١)

أمثلة لمصادر التوافقيات بالشبكات الكهربائية :

الاجهزة المسببة للتوافقيات	درجات التوافقيات	حده تردد التوافقيات دورة / ثانية
أ - الآلات الدوارة <i>Rotating machines</i> ١ - عضو التبديل والفرش <i>Commutator and brushes</i> ٢ - الاسنان والمجاري <i>Teeth and Slots</i> ٣ - منحنى المجال المشوه <i>Distorted field curve</i> ٤ - عدم تماثل الملفات <i>Dissymmetry of the winding</i>	القطع / زوج أقطاب (segments/pole pair) المجاري/زوج أقطاب ± 1 ... ٧, ٥, ٣ جزء من المركبة الاساسية	٣٠٠ - ٥٠٠ ٢٠٠٠ - ٢٥٠ ١٠٠٠ - ١٥٠ ٣٠ - ٥
ب - المبدلات والموحدات <i>Rectifiers and Converters</i> ١ - دائرة التيار المستمر <i>D.C circuit</i> ٢ - دائرة التيار المتردد <i>A.C circuit</i>	 , ٦, ٤, ٢ ... , ٧, ٥, ٣	١٠٠٠ - ١٠٠ ١٠٠٠ - ١٥٠
ج - الدوائر غير الخطية <i>Circuit of nonlinear characteristic</i> ١ - التخلفية والتشبع المغناطيسى <i>Magnetic saturation and hysteresis</i> ٢ - الاقواس الشرارات <i>Arcs and sparks</i> ٣ - تفريغ شحنة الهاله <i>Corona discharge</i> ٤ - اشباه الموصلات <i>Semiconductors</i>	... ٧, ٥, ٣ ... , ٧, ٥, ٣ ... ٧, ٥, ٣ ... , ٧, ٥, ٣	١٠٠٠ - ١٥٠ ٥٠٠٠ - ١٥٠ ١٠٠٠ - ١٥٠ ١٠٠٠ - ١٥٠

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٥ -

أمثلة على

التوافقيات في الدوائر أحادية الوجه

Harmonics In Single Phase Circuit

مثال ١ :

سلط جهد على طرفى مكثف سعته $20\mu F$ ويخضع للمعادلة الآتية

$$e = 150 \sin 314 t + 50 \sin 942 t$$

احسب

– القيمة اللحظية لتيار الشحن *Instantaneous value of the charging current*

– قيمة جذر متوسط المربعات لتيار الشحن

The r.m.s value of the charging current

الحل :

يلاحظ من معادلة الجهد انها عبارة عن مركبة اساسية ترددها $f = 50 \text{ Hz}$ والمركبة الاخرى مركبة التوافقية الثالثة وتردها $f_3 = 150 \text{ Hz}$ أى ان :

$$e = 150 \sin (2\pi \times 50)t + 50 \sin (2\pi \times 150)t$$

$$= E_{1m} \sin (2\pi f) t + E_{3m} \sin (2\pi f_3)t$$

$$= E_{1m} \sin(\omega t) + E_{3m} \sin (3\omega t)$$

ولحساب أقصى قيمة لتيار المركبة الاساسية فان

$$\omega = 2 \pi f = 2 \pi \times 50$$

$$X_{C1} = \frac{1}{\omega C} = \frac{10^6}{2\pi \times 50 \times 20} = 159 \Omega$$

$$I_{1m} = \frac{E_{1m}}{X_{C1}} = \frac{150}{159} = 0.943 \text{ A}$$

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٦ -

ولحساب أقصى قيمة لتيار مركبة التوافقية الثالثة فان :

$$\omega_3 = 3\omega = 2\pi f_3 = 2\pi \times 150$$

$$X_{C3} = \frac{1}{3\omega C} = \frac{10^6}{2\pi \times 150 \times 20} = 53 \Omega$$

$$I_{3m} = \frac{E_{3m}}{X_{C3}} = \frac{50}{53} = 0.943 A$$

وحيث أن التيار بالكثف يتقدم على الجهد بزاوية $\pi/2$ فان القيمة اللحظية لتيار الشحن تكون

$$i = 0.943 \sin(314t + \pi/2) + 0.943 \sin(942t + \pi/2)$$

وتكون قيمة جذر متوسط المربعات لتيار الشحن كالآتي

$$r.m.s \text{ value} = \sqrt{\left(\frac{I_{1m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_{3m}}{\sqrt{2}}\right)^2} = 0.943 A$$

مثال ٢ :

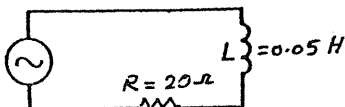
دائرة مكونة من مقاومة وملف . سلط عليها جهداً يخضع للمعادلة

$$e = 230 \sin 314t + 50 \sin(942t + \pi/3) + 20 \sin(1570t + 5\pi/6)$$

احسب

- التيار والقدرة الكلية ومعامل القدرة

الحل :



تنقسم معادلة الجهد الى مركبة اساسية ومركبتى التوافقية الثالثة والخامسة كالآتي

$$e = E_{1m} \sin(2\pi f)t + E_{3m} \sin\{2\pi \times 3f)t + \pi/3\} + E_{5m} \sin\{(2\pi \times 5f)t + 5\pi/6\}$$

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٧ -

وتحسب معاوقات المركبات كالآتى :

$$\begin{aligned} Z_1 &= R + jx_1 = R + j\omega L \\ &= 20 + j(314 \times 0.05) \\ &= 20 + j15.7 = 25.4 \angle 38.1^\circ \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_3 &= R + jx_3 \\ &= 20 + j3\omega L \\ &= 20 + j47.1 = 55.5 \angle 67^\circ \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_5 &= R + jx_5 \\ &= 20 + j5\omega L \\ &= 20 + j78.5 = 81 \angle 75.7^\circ \Omega \end{aligned}$$

وباستخدام هذه المعاوقات ومعادلة الجهد نحصل على معادلة التيار الآتية

$$\begin{aligned} i &= \frac{230}{25.4} \sin(314t - 38.1^\circ) + \frac{50}{25.5} \sin(942t + 60^\circ - 67^\circ) + \frac{20}{81} \\ &\sin(1570t + 150^\circ - 75.7^\circ) \\ &= 9.06 \sin(314t - 38.1^\circ) + 0.9 \sin(942t - 7^\circ) + 0.25 \sin(1570 + 74.3^\circ) \end{aligned}$$

وتكون قيمة r.m.s للتيار كالآتى :

$$\begin{aligned} r.m.s \text{ current} &= \sqrt{\left(\frac{I_{1m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_{3m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_{5m}}{\sqrt{2}}\right)^2} \\ &= 6.44 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\text{القدرة الكلية} = I^2 R = 829 \text{ watt}$$

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٨ -

وقيمة $r.m.s$ للجهد كالاتى

$$r.m.s \text{ voltage} = \sqrt{\left(\frac{E_{1m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{E_{3m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{E_{5m}}{\sqrt{2}}\right)^2}$$

$$= 167 \text{ Volt}$$

$$\text{معامل القدرة} = \frac{\text{Watts}}{\text{VA}} = \frac{829}{167 \times 6.44} = 0.771$$

مثال ٣ :

اوجد جذر متوسط المربعات (rms) لموجة تيار مركبة باستخدام الطريقة التخطيطية ($graphic method$) اذا كانت قيم جذر متوسط مربعات مركبات التيار هي $I_1 = 100 \text{ A}$, $I_2 = 50 \text{ A}$, $I_3 = 50 \text{ A}$, $I_5 = 25 \text{ A}$

الحل :

يوضح شكل (١٥-١) الطريقة التخطيطية للحصول على جذر متوسط المربعات للتيار I والذي يساوى 125 A .

مثال ٤ :

اوجد جذر متوسط المربعات (rms) لموجة جهد مركبة باستخدام الطريقة التخطيطية اذا كانت قيم جذر متوسط مربعات مركبات الجهد هي

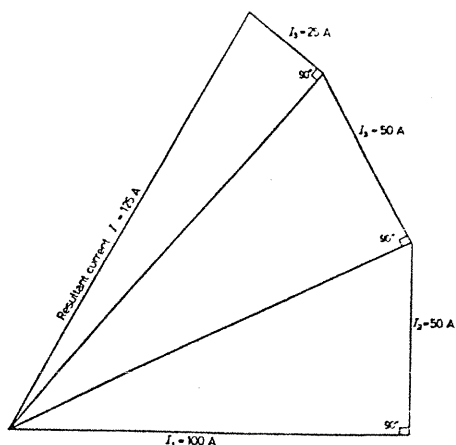
$$V_0 = 6V , V_1 = 10V , V_3 = 3V , V_5 = 1.5V.$$

الحل :

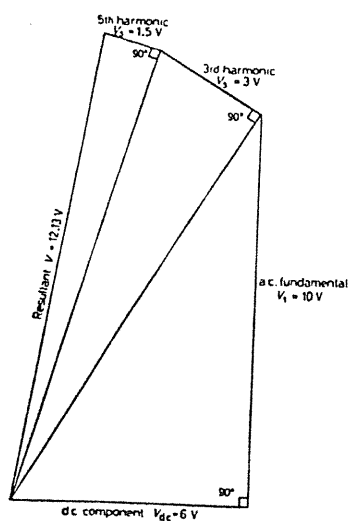
يوضح شكل (١٥-١) ب الرسم الخطى للحصول على جذر متوسط المربعات للجهد V والذي يساوى $12.13V$.

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٩ -



٢٩



٢٩

شكل (١٥-١)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٣٠ -

أمثلة على

التوافقيات في الدوائر ثلاثية الأوجه

Harmonics In 3-phase circuits

مثال ه :

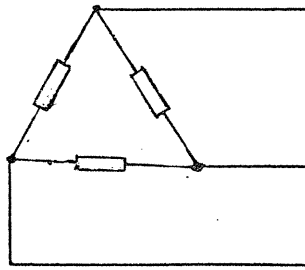
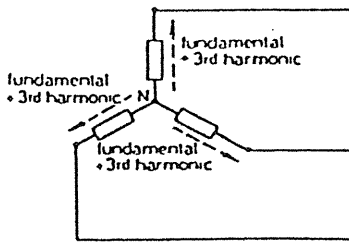
مولد ثلاثي الأوجه ، القوة الدافعة الكهربائية emf لكل وجه تساوى 230 V وتحتوى على مركبة التوافقية الثالثة بنسبة 12% ومركبة التوافقية الخامسة بنسبة 8% .

احسب جهد الخط (rms) فى حالتى

- التوصيل نجمة (Y)

- التوصيل دلتا (Δ)

الحل



لو فرضنا أن V_1 هو rms لجهد الوجه فان :

$$V_3 = 0.12 V_1$$

مركبة التوافقية الثالثة

$$V_5 = 0.08 V_1$$

مركبة التوافقية الخامسة

$$\therefore 230 = V_1^2 + (0.12V_1)^2 + (0.08 V_1)^2 = 1.0104 V_1^2$$

$$V_1 = 227.6\text{ V}$$

$$V_3 = 0.12 \times 227.6 = 27.31\text{ V}$$

$$V_5 = 0.08 \times 227.6 = 18.21\text{ V}$$

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٣١ -

فى حالة التوصيل نجمة

$$\text{قيمة } (rms) \text{ لجهد الخط (المركبة الاساسية)} = \sqrt{3} \times 227.6 = 394.2 \text{ V}$$

$$\text{قيمة } (rms) \text{ المركبة التوافقية الثالثة لجهد الخط} = 0$$

$$\text{قيمة } (rms) \text{ لمركبة التوافقية الخامسة لجهد الخط} = \sqrt{3} \times 18.21 = 31.54 \text{ V}$$

$$\text{قيمة } (rms) \text{ لجهد الخط} = \sqrt{(394.2)^2 + (31.54)^2} = 395.46 \text{ V}$$

فى حالة التوصيل دلتا :

لا توجد أيضاً مركبة التوافقية الثالثة فى جهد الخط

$$\begin{aligned} \text{قيمة } rms \text{ لجهد الخط} &= \sqrt{227.6^2 + 18.21^2} \\ &= 228.33 \text{ V} \end{aligned}$$

مثال ٦ :

مولد ثلاثى الأوجه 50 Hz توصيل دلتا (Δ) - خصائص ملفات عضو الاستنتاج (armature winding) لكل وجه كالاتى $r = 0.025 \Omega$, $L = 0.4 \text{ mH}$ تحتوى موجة القوة الدافعة الكهربائية (emf) فى حالة اللاحمل على مركبات التوافقيات الثالثة والتاسعة والخامسة عشر كنسبة من الموجة الاساسية والتى تساوى 4% , 2% , 1.5% على التوالى - قيمة القوة الدافعة الكهربائية تساوى 850 V احسب التيار الدائرى (Circulating current) فى حالة اللاحمل .

الحل :

نحسب أولاً قيمة الممانعة (reactance) لكل وجه عند التردد الاساسى وتردد التوافقيات

عند التردد الاساسى

$$X_1 = \omega L = 314 \times 0.4 \times 10^{-3} = 0.126 \Omega$$

عند تردد التوافقية الثالثة

$$X_3 = 3 \omega L = 3 \times 0.126 = 0.378 \Omega$$

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٣٢ -

عند تردد التوافقية التاسعة

$$X_9 = 9 \omega L = 9 \times 0.126 = 1.134 \Omega$$

عند تردد التوافقية الخامسة عشر

$$X_{15} = 15 \omega L = 15 \times 0.126 = 1.89 \Omega$$

$$Z_3 = \sqrt{R^2 + X_3^2} = \sqrt{0.025^2 + 0.378^2} = 0.378 \Omega$$

$$Z_9 = \sqrt{R^2 + X_9^2} = \sqrt{0.025^2 + 1.134^2} = 1.134 \Omega$$

$$Z_{15} = \sqrt{R^2 + X_{15}^2} = \sqrt{0.025^2 + 1.89^2} = 1.89 \Omega$$

$$E_{3m} = 0.04 \times 850 = 34 V$$

$$E_{9m} = 0.02 \times 850 = 17 V$$

$$E_{15m} = 0.015 \times 850 = 12.7 V$$

ويكون التيار الدائري في حالة اللاحمل

$$I_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\left(\frac{E_{3m}}{Z_3}\right)^2 + \left(\frac{E_{9m}}{Z_9}\right)^2 + \left(\frac{E_{15m}}{Z_{15}}\right)^2}$$

$$= 64.8 A$$

مثال ٧ :

مولد - ثلاثي الأوجه - 50 Hz , 750 kw , 2200 v يحتوى جهد الوجه على مركبة التوافقية الثالثة بنسبة 5% .

احسب التيار الدائري (circulating current) عند الجهد المقنن اذا وصل المولد على شكل دلتا (Δ) قيمة المقاومة لكل وجه 0.25Ω ، قيمة الممانعة لكل وجه 0.7Ω .

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٣٣ -

ثم احسب الفقد نتيجة التيار الدائري كنسبة من الحمل الكلى .

الحل

فى حالة التوصيل دلتا ، فان القوة الدافعة الكهربائية للتوافقية الثالثة تسبب مرور التيار الدائري داخل الدلتا .

$$\text{مركبة التوافقية الثالثة للجهد / الوجه} = 0.05 \times 2200 = 110 \text{ V}$$

$$\text{ممانعة التوافقية الثالثة / الوجه} = 3 \times 0.7 = 2.1 \Omega$$

$$\text{معاوقة التوافقية الثالثة / الوجه} = \sqrt{0.25^2 + 2.1^2} = 2.115 \Omega$$

$$\text{التيار الدائري نتيجة التوافقية الثالثة} = \frac{110}{2.115} = 52.01 \text{ A}$$

$$\text{مفقودات النحاس فى الثلاثة أوجه} = 3 I^2 R$$

$$= 3 \times 52.01^2 \times 0.25 = 2028.8 \text{ watt}$$

$$\text{نسبة الفقد بالنسبة للحمل الكلى} = \frac{2028.8}{750000} \times 100 = 0.27 \%$$

ملاحظات :

يلاحظ الآتى من الامثلة العددية السابقة :

- أن موجات المدخل عبارة عن دالة فى الزمن - وتحسب قيم مركبات التوافقيات تبعاً لدرجة التوافقية ، ويمثل ذلك كما فى شكل (١-١٦) أ حيث تمثل التوافقيات بقيم موازية للمحور الرأسى عند درجات التوافقيات الموجودة .

- تبعاً لدرجات التوافقيات الموجودة فى موجة المدخل المشوهه ، تسجل قيم هذه التوافقيات ودرجاتها كما فى الاشكال (١-١٦) ب ، ج ، د ، هـ والتي تعرف بطريقة الطيف الترددى (Frequency spectrum) .

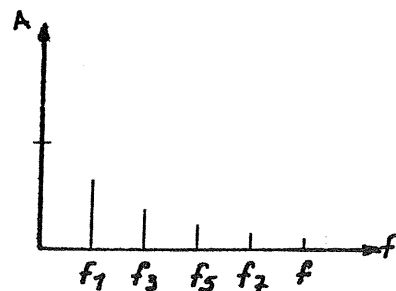
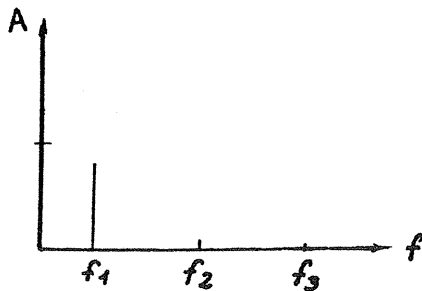
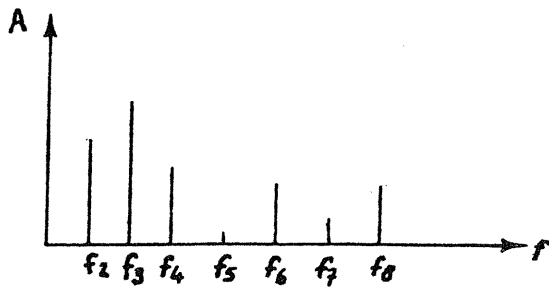
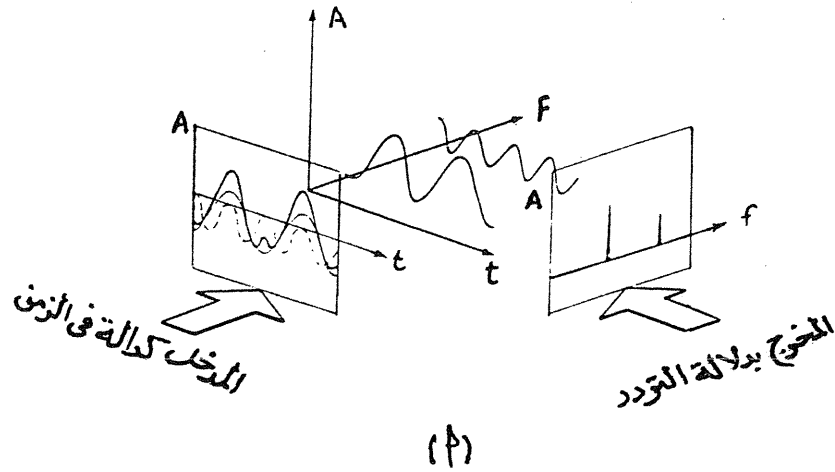
أمثلة عملية لموجات مشوهه تحتوى على توافقيات

١ - يكون الجهد الحادث (induced voltage) على المحرك التائىرى اللامتزامن (asynchronous induction motor) مشوهاً كما فى شكل (١-١٧) .

٢ - ويوضح شكل (١-١٨) موجتى الجهد والتيار لمحرك بمبدل أحادى الوجه للسكك الحديدية (Single phase railway Commutator motor) فى حالة الحمل الكامل .

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٤ -



(ح) تحتوي الموجة على التوافقيات الفردية (د) تحتوي الموجة على التوافقيات الثالثة

شكل (١٦-١)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٣٥ -

ويلاحظ احتواء الموجتين على توافقيات مسببة تشوه الموجات .

٣ - ويوضح شكل (١-١٩) منحنيات مولد تربيني (*Turbogenerator*) ذو عدد كبير من المجارى بالعضو الدوار (*Densely slotted motor*) . وتحتوى منحنيات الفيض (Φ) ، وجهد الوجه (ϵ) والجهد بين كل وجهين للمفات العضو الثابت (e) على توافقيات ذات ترددات عالية .

٤ - بينما نحصل على المنحنيات الموضحة بشكل (١-٢٠) لمولد تربيني بمجارى خشنة (*coarsely slotted turbogenerator*) عند حالة اللاحمل ، ويدعم هذا المولد بملفات بالعضو الثابت (*Favorable stator winding*) تعمل على حفظ موجة الجهد جيبيية على أطراف العضو الثابت (e) ، حتى فى حالة وجود تيارات (i) ذات موجة مشوهه كما فى شكل (١-٢١) ، وتكون موجة الجهد بين الاوجه للمفات العضو الثابت (e) وموجة الوجه (ϵ) مشوهتين ، اذا كانت ملفات العضو الثابت غير مدعمة (*unfavorable*) وهذا واضح فى شكل (١-٢٢) ويوضح شكل (١-٢٣) اذا كانت ملفات العضو الثابت اكثر تدعيماً .

٥ - باستخدام مولد ذى أقطاب بارزة (*salient - pole generator*) نحصل على المنحنيات الموضحة بشكل (١-٢٤) والتي تكون أكثر نقاءاً ولا تحتوى على تشوهات .

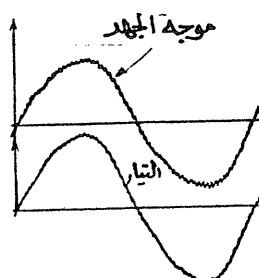
عموماً يلاحظ أنه يجب مراعاة العناية الفائقة عند تصميم المولدات حتى لا تحتوى موجات جهد المخرج على توافقيات ، وكذلك مراعاة نفس الشئ فى المحركات والتي تؤثر بدرجة كبيرة على الشبكة الكهربائية ويوضح شكل (١-٢٥) تشوه فى شكل موجتى الجهد (e) والتيار (i) لشبكة كهرباء صناعية اما شكل (١-٢٦) ، (١-٢٧) فيمثلان اشكال لموجتى الجهد والتيار لشبكتين مختلفتين بنظام ثلاثى الاوجه .

وتختلف درجات التوافقيات بكل منهما اعتماداً على طبيعة الاحمال .

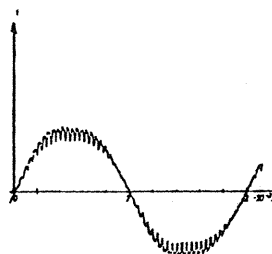
٦ - لو اعتبرنا مثلاً لاحمال مبنى سكنى مغذى من محول توزيع بجهد ٢٢٠ فولت وتم اخذ القياسات لمدة سبعة ايام (شكل (١-٢٨)) نلاحظ ان العلاقة بين القدرة الفعالة (*active power*) والزمن بشكل (١-٢٨) علاقة دورية ويعتبر المصدر الاكبر للقدرة الفعالة من السخانات وبعض أنواع الاضاءة ، كما يوضح شكل (١-٢٨) ب العلاقة بين القدرة غير الفعالة (*reactive power*) والزمن ويلاحظ انها علاقة متغيره عشوائية ذات تغيرات سريعة ، والمصدر الاكبر لهذه القدرة من التلارجات والمبات الفلورسنت ومحركات المصاعد .

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

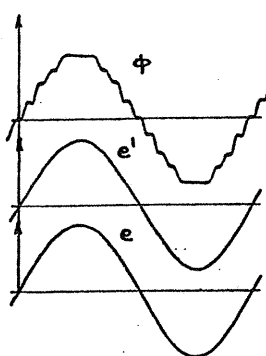
- ٢٦ -



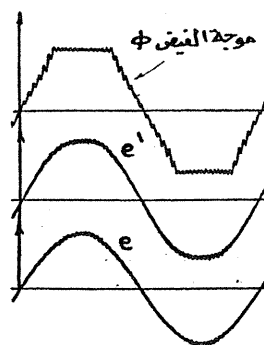
شكل (١-١٨)



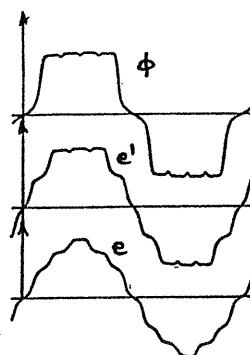
شكل (١-١٧)



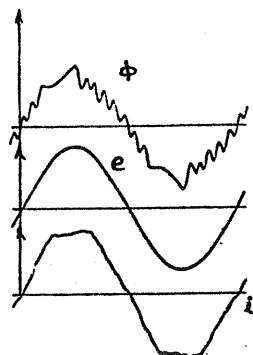
شكل (١-٢٠)



شكل (١-١٩)



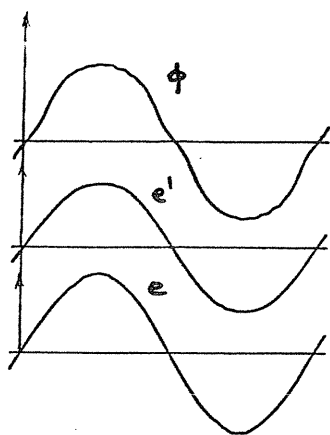
شكل (١-٢٢)



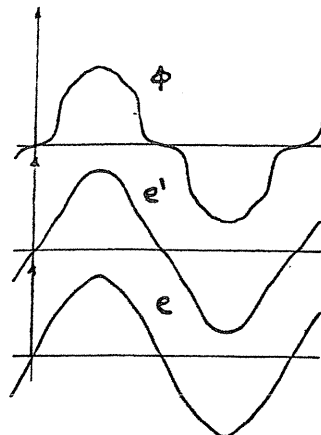
شكل (١-٢١)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

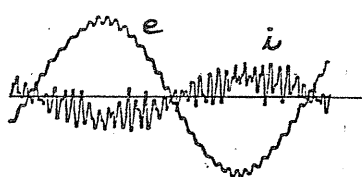
- ٢٧ -



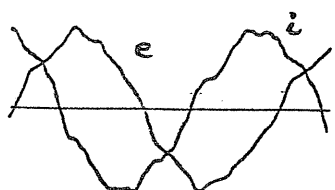
شكل (١-٢٤)



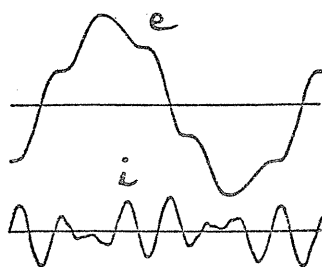
شكل (١-٢٥)



شكل (١-٢٦)

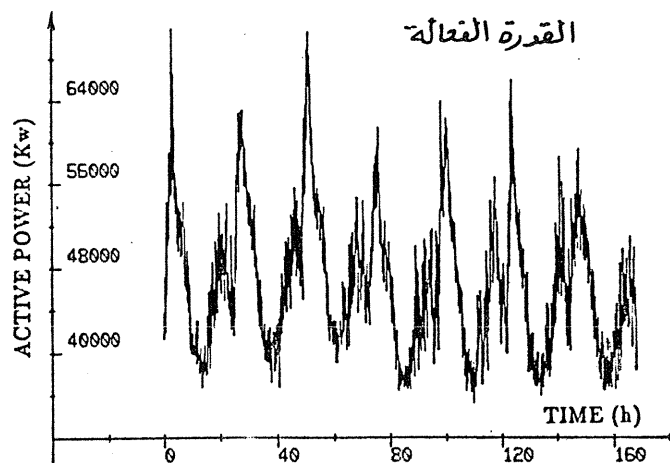


شكل (١-٢٧)

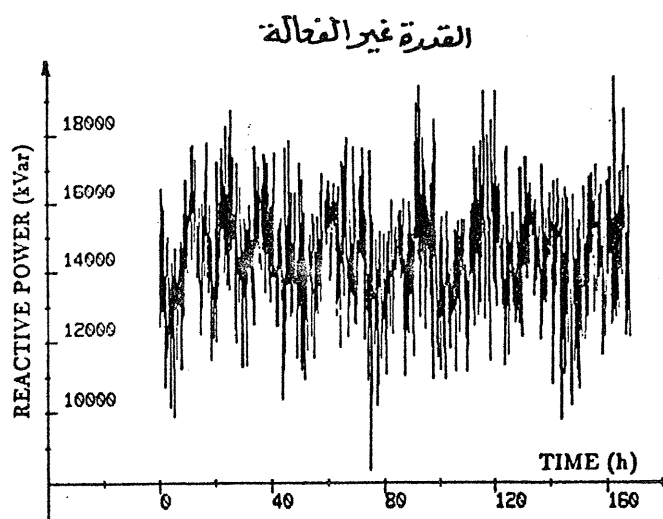


شكل (١-٢٨)
« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٣٨ -



(ب)



(ج)

شكل (١-٢٨)

« التوافقية في الشبكات الكهربائية »

- ٣٩ -

التوافقيات بالتيار المستمر D.C Harmonics

تستخدم الموحّدات (Rectifiers) والمبدلات (Convertors) لتحويل التيار المتردد (a.c) الى تيار مستمر (d.c) وتصنف المعدات الى مايتى :

- معدات استاتيكية (اشباه الموصلات Semiconductor) مثل موحّدات السليوم (Selenium) والسيليكون (Silicon) .

- موحّدات القوس الزئبقى Mercury - arc rectifiers

أو موحّدات البخار الزئبقى Mercury vapour rectifiers

- مبدلات دوارة Rotary converters

- مجموعة محرك / مولد Motoe - generator set

ويحتوى مخرج التيار المستمر (d.c) على توافقيات ، ويخضع المخرج لتحليل فوريير كالآتى .

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1} A_n \cos n\omega t + \sum_{n=1} B_n \sin n\omega t$$

ويوضح شكل (١-٢٩) موجة التيار المستمر $f(t)$ المحتوية على المركبة الاساسية A_0 ، والتوافقيات .

ويوضح شكل (١-٣٠) جهد مخرج مولد تيار مستمر (d.c generator) عند حالة اللاحمل (no load) ويعطى شكل (١-٣١) منحني الجهد لمبدل دوارة متزامن (synchronous converter) عند حالة الاحمال العادية ويلاحظ احتوائه على عدد كبير جداً من التموجات (ripples) مركبة على المركبة الاساسية .

وتحدث موحّدات القوس الزئبقى توافقيات عالية ، وخاصة اذا استخدمت لعدد قليل من الاوجه . حيث تعمل الموحّدات بتيارات مشطورية (chopped currents) على اطراف الانود (Anodes) ، وهذا يؤدي الى عدم استمرارية التأثير على جانبي الموحّدات ، ليس فقط على جانب التيار المستمر ولكن ايضاً على جانب الجهد المتردد لشبكة التغذية ثلاثية الاوجه ، شكل (١-٣٢) ، بينما يوضح شكل (١-٣٣) جهد المخرج لموحّد ثلاثى الاوجه باستخدام ٦ أنود (6-Anode 3-phase rectifier) ويلاحظ احتواء موجة الجهد على

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٤٠ -

عدد كبير من التموجات تكون عبارة عن مركبة التوافقية السادسة ومضاعفتها ، بينما يوضح شكل (١-٣٤) موجتى التيار والجهد جهة الشبكة (أى جهة $a.c$ للموحد) ، ويلاحظ شكل موجة التيار والتي بتحليلها يتضح احتواها على التوافقيات الخامسة والسابعة والحادية عشر والثالثة عشر .

طرق أخرى لتسجيل التوافقيات

١ - دالة الاحتمال التجمعية Cumulative probability Function

عندما لانرغب فى استخدام الزمن كدالة لتسجيل التوافقيات فيمكن ان نستخدم دالة الاحتمال التجمعية وذلك بتسجيل العلاقة بين النسبة المئوية لزمان كللى محدد وبين النسبة بين تيار درجة توافقية معينة وحدود تيار هذه التوافقية { اى النسبة I_n / I_{limit} وتعرف هذه النسبة بتيار التسوية (normalized current) } ثم يتم تحويل هذا المنحنى الى منحنى الاحتمال بحيث يتحول محور النسبة المئوية للزمن الكلى الى محور الاحتمال (Probability) وعندئذ يعرف هذا المنحنى بمنحنى الاحتمال . ويوضح شكل (١-٣٥) أ مثال لدالة الاحتمال التجمعية لتيار التوافقية الخامسة مقاسة لشبكة كهربائية جهد ٢٢٠ ك. ف بينما يوضح شكل (١-٣٥) ب منحنى الاحتمال للشكل الموضح بشكل (١-٣٥) أ وبذلك تصبح الدالة معبرة عن احتمالات ان قيمة التوافقية تتعدى مستوى محدد.

٢ - الرسم البيانى النسيجي Histogram

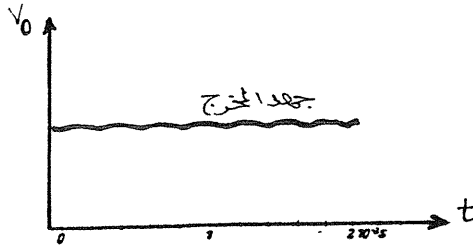
وهو يعنى رياضياً رسم بيانى مؤلف من سلسلة من المستطيلات ويستخدم لاعطاء دلالة لتغيير قيم توافقية معينة ، كما فى شكل (١-٣٦) والذي يوضح تيار التوافقية الخامسة والذي له قيمة محددة ٣, ٤ أمبير عند جهد ٢٢٠ ك. ف وبأخذ القياسات فى زمن محدد مع تقسيم هذه القياسات الى عدد من العينات (samples) وتحديد قيمة تيار التوافقية الخامسة بكل عينة ثم تسجيلها كما فى الشكل . وأحياناً يعرف محور الاحداثيات الرأسى بكثافة الاحتمال (Probability density) .

وفيما يلى توضيح لمعنى هذه المصطلحات

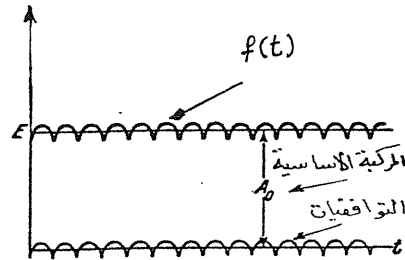
- بفرض أن $f(x)$ دالة مستمرة (Continous function) فى المتغير (x) فان معادلة توزيع الاحتمالية (probability distribution) للمتغير الاحصائى (x) هى :

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

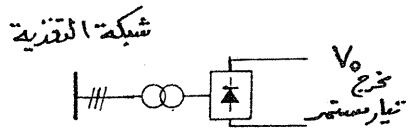
- ٤١ -



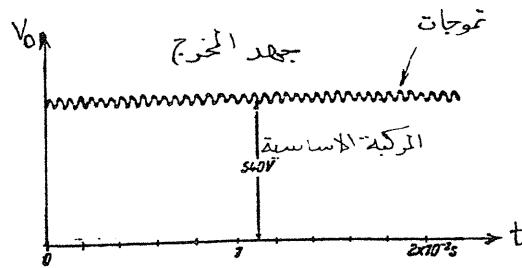
شكل (٣٠-١)



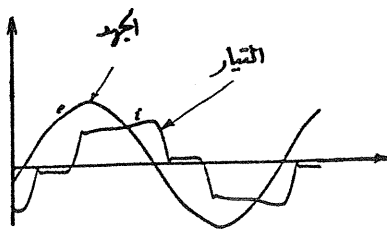
شكل (٢٩-١)



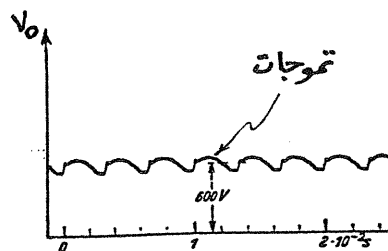
شكل (٣٢-١)



شكل (٣١-١)



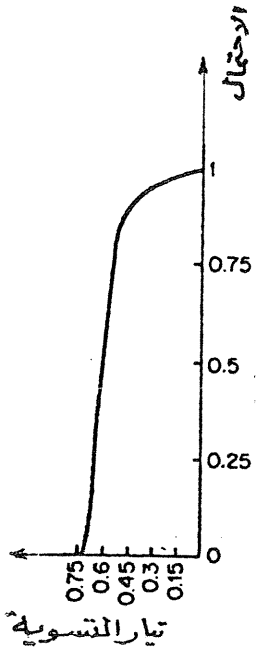
شكل (٣٤-١)



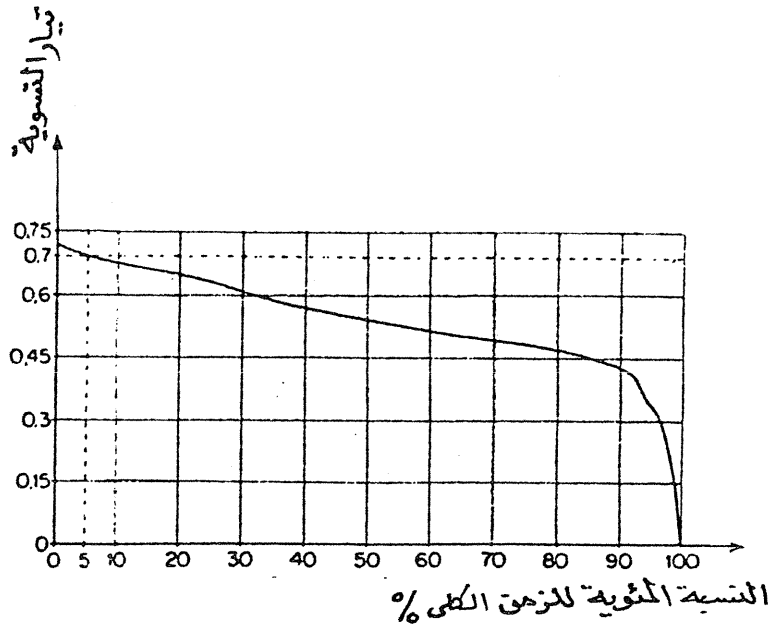
شكل (٣٣-١)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٤٢ -

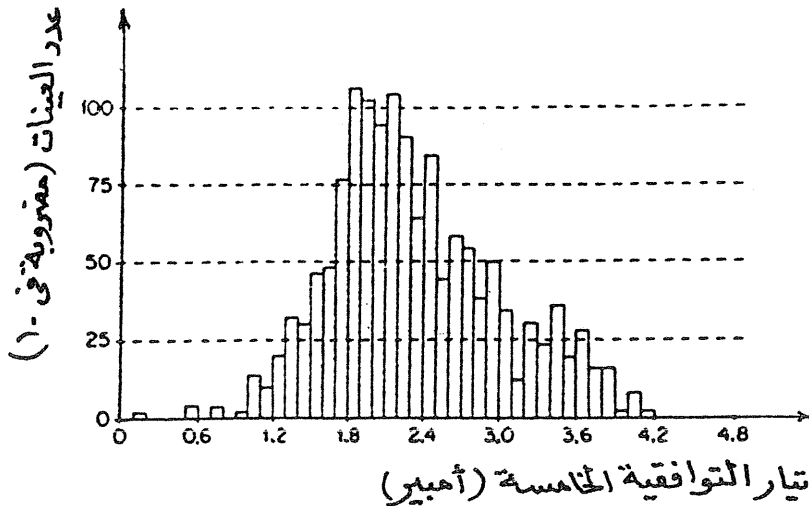


(ب)



(أ)

شكل (١-٣٥)



شكل (١-٣٦)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٤٢ -

$$f(x) dx = P(x - \frac{1}{2}dx \leq x \leq x + \frac{1}{2}dx)$$

حيث :

$f(x)$: دالة كثافة الاحتمال probability density function

او دالة الكثافة Density function

$f(x) dx$: تفاضل الاحتمال probability differential

وتحقق المعادلة احتمال وقوع x فى الفترة من $x - \frac{1}{2}dx$ إلى $x + \frac{1}{2}dx$ ويعرف المنحنى المستمر $y = f(x)$ بأنه منحنى كثافة الاحتمال او منحنى الاحتمال للتبسيط ، واذا كان المنحنى متماثلاً (Symmetrical) فان التوزيع يكون متماثلاً .

اذا كانت x لها قيم فى الفترة (a,b) فقط وكانت دالة الكثافة $\Phi(x)$ ، فان توزيعها يخضع للعلاقات الآتية

$$\begin{aligned} f(x) &= 0 & x < a \\ &= \Phi(x) & a \leq x \leq b \\ &= 0 & x > b \end{aligned}$$

وتكون خصائص الدالة $f(x)$ كالآتى

١ - ان $f(x) \geq 0$ لجميع قيم x ، اى لا يوجد اى معنى للإشارة السالبة للاحتمال .

٢ - ان $\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1$ ، ويعنى هذا ان المساحة تحت المنحنى تساوى الوحدة .

ويكون احتمال وقوع المتغير x فى الفترة (c,d) كالآتى

$$f(x) = P(c \leq x \leq d) = \int_c^d f(x) dx$$

ويعنى هذا ان المساحة محددة من $x = c$ الى $x = d$

ويعرف $f(x)$ بدالة التوزيع التجمعية cumulative distribution function

للمتغير x وأحياناً يعرف بدالة التوزيع distribution function

مثال ٨ :

دالة تخضع للمعادلات الآتية

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٤٤ -

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x < 2 \\ (1/18)(3+2x) & 2 \leq x \leq 4 \\ 0 & x > 4 \end{cases} \quad 1$$

أ - هل هي دالة كثافة الاحتمال ؟

ب - اوجد احتمال وقوع المتغير في الفترة $2 \leq x \leq 3$

الحل:

أ - لاثبات ان الدالة هي دالة كثافة الاحتمال فيجب تحقيق

$$f(x) \geq 0, \quad \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1$$

اولاً : واضح من المعادلات رقم 1 ان $f(x) \geq 0$ لجميع قيم x للفترة المعطاة .

ثانياً :

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = \int_{-\infty}^2 0 dx + \int_2^4 (1/18)(3+2x) dx + \int_4^{\infty} 0 dx = 1$$

ب - ولحساب الاحتمال المطلوب

$$P(2 \leq x \leq 3) = \int_2^3 (1/18)(3+2x) dx = 4/9$$

ولتطبيق ذلك على التوافقيات نستعرض المثال التالي :

يوضح شكل (١-٣٧) تسجيل للقدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة لاحمال سوپر ماركت في فترة زمنية ١٦٠ ساعة ، وتم تحليل التوافقيات الموجودة في الاحمال ووجد احتوائها على التوافقيات الثالثة والخامسة والسابعة بالاضافة الى المركبة الاساسية للتيار .

ويوضح شكل (١-٣٨) أ المركبة الاساسية للتيار كمتغير مع الزمن وتم تحويلها الى الرسم البياني النسيجي للمركبة الاساسية للتيار كمتغير مع كثافة الاحتمال وذلك بتحديد حدود معينة لقيمة تيار المركبة الاساسية . فمثلاً بفرض ان دالة المركبة الاساسية للتيار الموضحة بشكل (١-٣٨) أ هي $\Phi(I)$ ويراد معرفة كثافة الاحتمال لوقوع المتغير I في الحدود $200 \leq I < 210$ ومعرفة معادلة $\Phi(I)$ وباستخدام المعادلات رقم 1 يتم حساب

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٤٥ -

$$P(200 \leq I \leq 210) = \int_{200}^{210} \Phi(I) dI$$

ويوضح شكل (١-٣٨) ب ان هذه القيمة تساوى 0.0015... وهكذا لرسم باقى الرسم البيانى النسيجى .
بنفس الطريقة امكن رسم منحنيات التوافقيات الثالثة والخامسة والسابعة للتيار كما فى شكل (١-٣٩) .

تعريفات :

١ - نقطة الربط المشترك *Point of common coupling* ويرمز لها بالرموز (PCC)

تعرف نقطة الربط المشترك (مع مشتركين آخرين) بأنها نقطة الربط فى شبكة تغذية عامة ، وتكون قريبة من مصدر التغذية ويتأثر المشتركين بأية اضطرابات ناتجة من مشترك آخر متصل معهم على نقطة الربط .

يمكن ان تقع نقطة الربط المشترك فى أى مكان على شبكة التغذية ولكن عادة تكون هى نقطة الوصل بين المعاوقتين Z_A , Z_B فى شكل (١-٤٠) .

حيث :

Z_A : معاوقة المصدر او النظام (*System Impedance*) وهى المعاوقة من المصدر وحتى النقطة PCC المتصلة بمستهلكين آخرين

Z_B : معاوقة خدمة التوصيل (*Service connection Impedance*) . وهى معاوقة خدمة التوصيل من النقطة PCC (المتصلة مع مستهلكين آخرين) وحتى مكان تركيب العدادات عند المستهلكين .

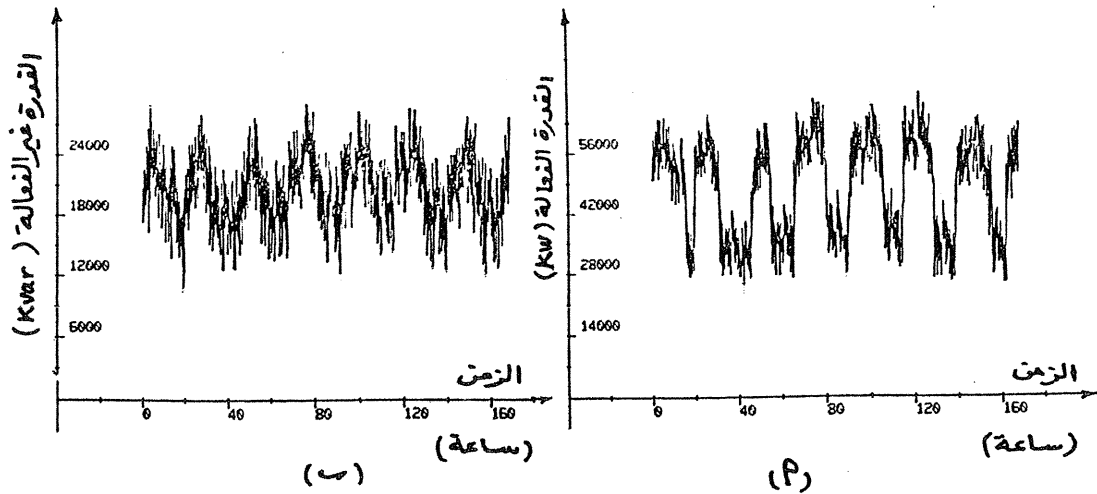
٢ - معاوقة التوصيلات المنزلية (Z_C) *House wiring Impedance*

هى معاوقة التوصيلات بين العدادات ومقبس المخرج *Socket - outlet* (لاحظ شكل (١-٤٠))

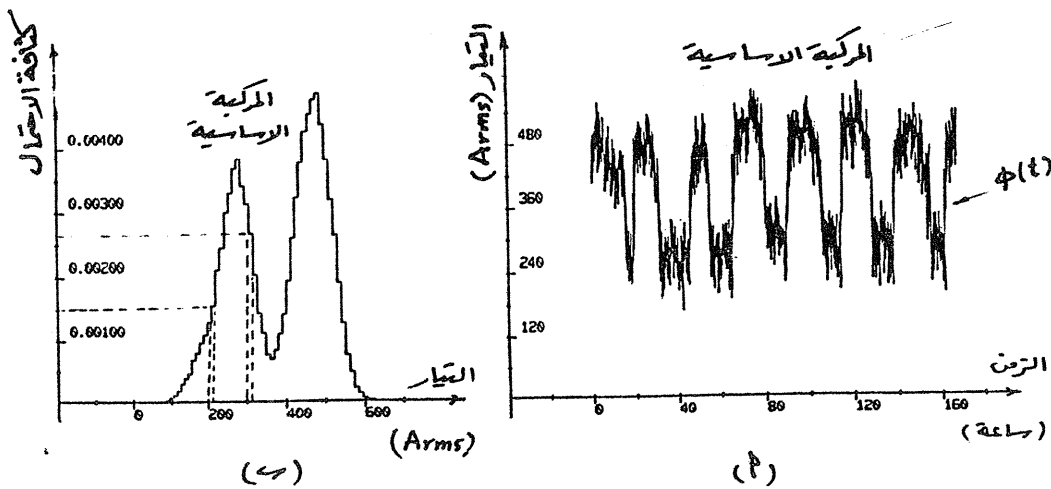
٣ - معاوقة المعدات المستخدمة (Z_D) *Appliance impedance*

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٤٦ -



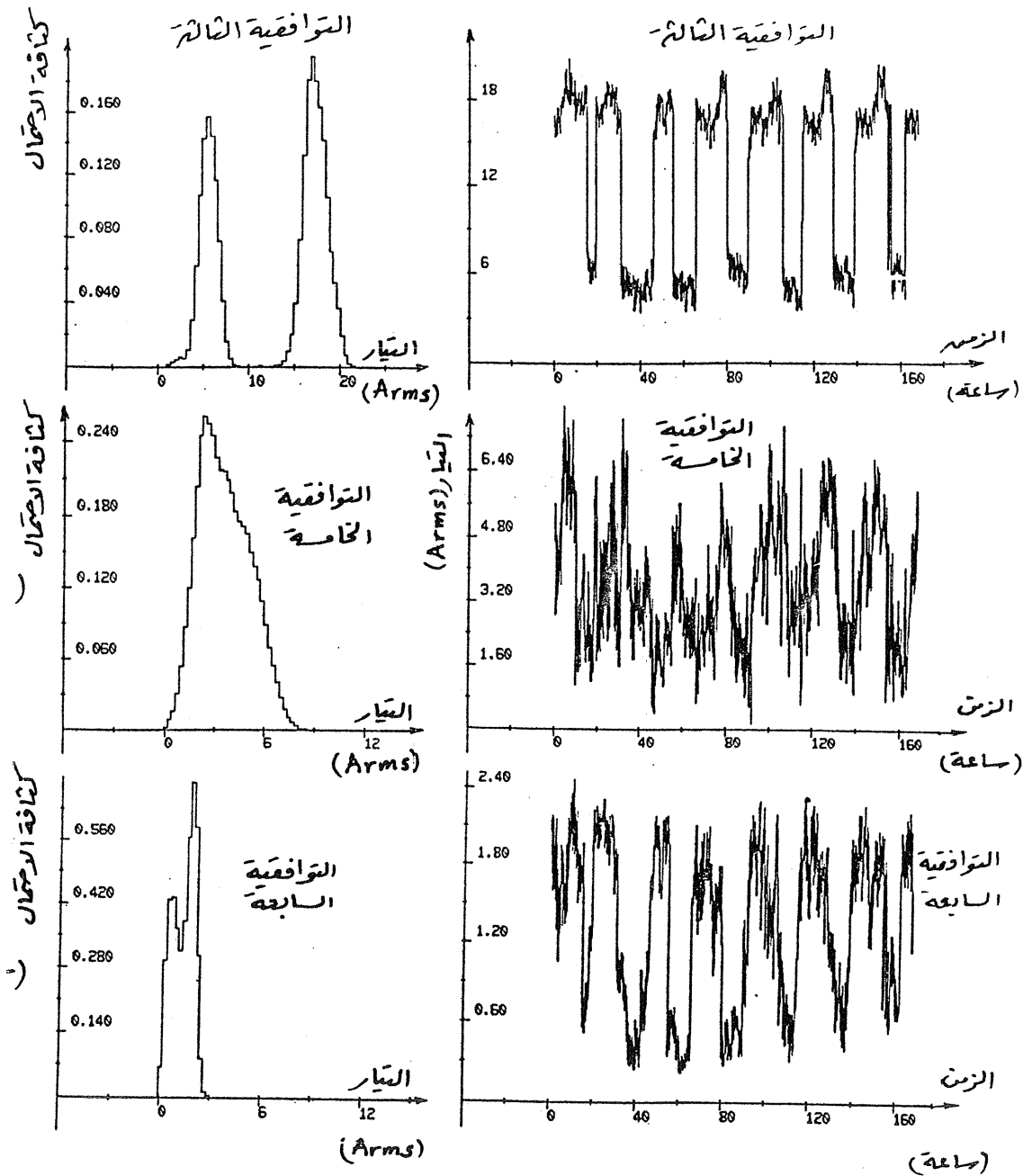
شكل (٣٧-١)



شكل (٣٨-١)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

-٤٧-



شكل (٣٩-١)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٤٨ -

هى مجموعة المعاقتين الآتيتين

- معاوقة الكابل المرن بين مقبس المخرج والمعدات المستخدمة .

- معاوقة الاسلاك الداخلية .

٤ - معاوقة الاسناد أو المرجع *Reference Impedance*

هى المعاوقة المستخدمة لحساب أو قياس الاضطرابات (*Disturbance*) الحادثة من المعدات المستخدمة .

٥ - المركبة الأساسية *Fundamental Component*

هى المركبة ذات الدرجة رقم 1 لكمية دورية تم تحليلها على شكل تحليل "فورير" .

٦ - مركبة التوافقية *Harmonic Component*

هى المركبة ذات الدرجة اكبر من 1 لكمية دورية تم تحليلها على شكل تحليل "فورير"

٧ - درجة التوافقية *Harmonic order*

هى عدد رقمى ناتج من خارج قسمة تردد التوافقية على التردد الاساسى (مثلاً التوافقية التى ترددها ضعف التردد الاساسى تعرف بالتوافقية الثانية وبذلك فان درجة التوافقية تساوى الرقم 2)

٨ - نسبة التوافقية *Harmonic ratio*

اذا اعتبرنا مركبة توافقية درجتها n لموجة مشوهة ، فان نسبة التوافقية هى النسبة بين قيمة جذر متوسط المربعات (rms) لمركبة هذه التوافقية الى قيمة (rms) للمركبة الاساسية لنفس الموجة (وعادة تكون نسبة مئوية) .

٩ - محتوى التوافقية *Harmonic content*

هى الكمية الناتجة من طرح المركبة الاساسية من الكمية المتغيرة .

١٠ - التشوه الكلى للتوافقية *Total harmonic distortion*

هو النسبة بين قيمة (rms) لمحتوى التوافقية وقيمة rms للمركبة الاساسية .

« التوافقيات فى الشكات الكهربائية »

- ٤٩ -

١١ - العامل الاساسى Fundamental factor

(لموجة مترددة غير جيبيية)

هو النسبة بين قيمة (rms) للمركبة الاساسية وقيمة (rms) للكمية المترددة .

١٢ - زاوية التوافقية The harmonic phase angle

هى الزاوية بين جهد وتيار التوافقية عند تردد هذه التوافقية وتفيد معرفة هذه الزاوية فى حالة وجود أكثر من مصدر مشترك للتوافقيات على نفس القضبان ونحتاج للتعقب او البحث عن كل مصدر لهذه التوافقيات وإذا امكن معرفة هذه الزاوية فيمكن تحديد اتجاه سريان قدرة التوافقية (Direction of harmonic power flow) وذلك باستخدام شكل رقم (١-٤١)

١٣ - الخاصية غير الخطية Non - linear charactaristic

الخاصية الخطية للعلاقة بين الجهد والتيار هى الخط المستقيم المتماثل فى الربع الاول وتحقق العلاقة $V = RI$. اما الخاصية غير الخطية فهى التى لا تحقق العلاقة $V = RI$ ، وتعتبر اغلب مكونات ودوائر التيار المستمر عناصر ذات خاصية غير خطية ، فنجد فى شكل (١-٤٢) أ أن المنحنى (a) لخاصية مصباح التوهج الحرارى (incandescent lamp) ، ومنحنى (b) يبين خاصية الديود (diode) ، بينما يوضح منحنى (c) خاصية صمام تفريغ (vacuum tube) وتمثل العناصر غير الخطية كما فى شكل (١-٤٢) ب .

كما نجد فى الاشكال (١-٤٣) ، (١-٤٤) ، (١-٤٥) أمثلة للحصول على منحنى العلاقة بين V, I لتوصيلات مختلفة لعناصر غير خطية . ففى شكل (١-٤٣) تم توصيل عنصرين على التوالى وتخضع الدائرة للمعادلة :

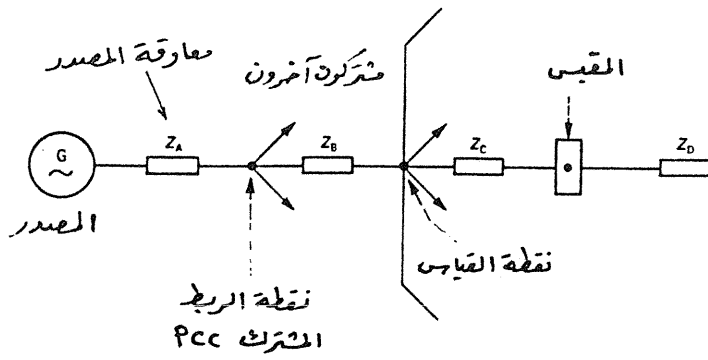
$$\begin{aligned} V &= I R_1(I) + I R_2(I) \\ &= V_1 + V_2 \end{aligned}$$

حيث $R_1(I)$ ، $R_2(I)$ عنصران يتغيران بتغير التيار

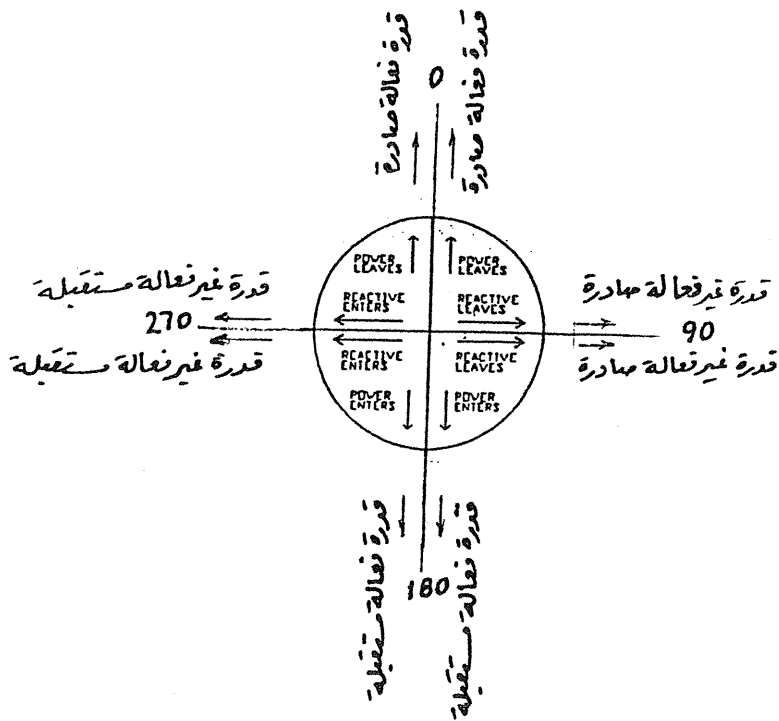
ويوضح شكل (١-٤٤) توصيل عنصرين على التوازي وتخضع الدائرة للمعادلة

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٥٠ -



شكل (٤٠-١)



شكل (٤١-١)

- ٥١ -

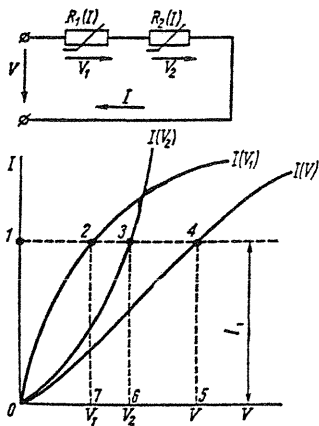
$$I = I_1 + I_2$$

بينما يوضح شكل (١٤٥) توليفة من عناصر غير خطية متصلة على التوالي والتوازي وتخضع الدائرة للمعادلتين

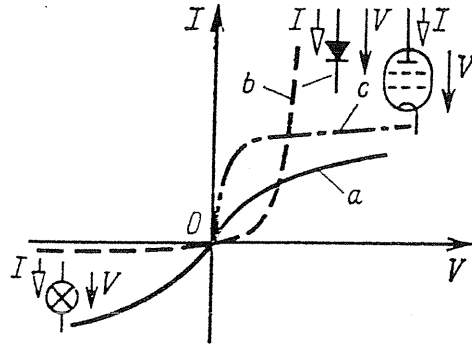
$$I_1 = I_2 + I_3$$

$$V = V_1 + V_2$$

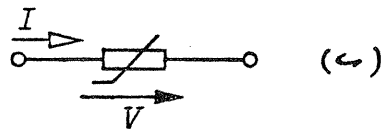
- ٥٢ -



شكل (١-٤٣)

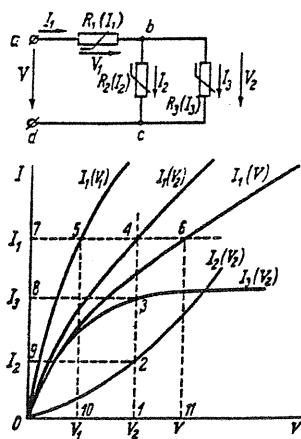


(P)

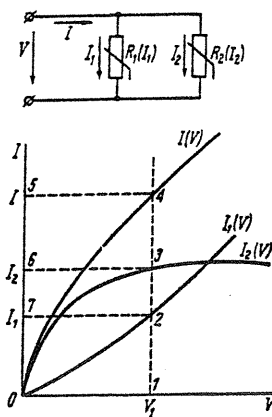


(C)

شكل (١-٤٤)



شكل (١-٤٥)



شكل (١-٤٦)

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٥٣ -

الباب الثانى

مصادر التوافقيات

Sources of Harmonics

تعتبر الاحمال غير الخطية هى المصدر الاساسى لتيار التوافقيات فى الشبكات الكهربائية ، والتي تسبب تغيرات فى الجهد (*Voltage variation*) خلال ممانعة (*reactance*) الشبكة الكهربائية وتكون مسئولة عن تشوه شكل الموجة الجيبية لجهد المصدر عند نقطة الربط المشترك (*point of common coupling*) ، ويؤدى التشوه فى الموجات الجيبية الى حدوث تيار التوافقيات فى المعدات الكهربائية الخاصة بالمشاركين الاخرين المتصلين على نفس نقطة الربط المشترك للشبكة .. كذلك تتسبب تيارات التوافقيات فى اضافة الفقد الفنى فى مكونات الشبكة

وتصنف مصادر التوافقيات الى مصادر اساسية او تقليدية ومصادر جديدة ، والتي ظهرت مع التطورات الحديثة للصناعات المختلفة .

أ - مصادر التوافقيات الأساسية *Established Harmonic Sources*

- ١ - وجود التموجات (*ripples*) فى موجات الجهد للآلات الدوارة .
- ٢ - التغير فى ممانعة (*reactance*) الثغرة الهوائية لخطوة القطب (*pole pitch*) فى الآلات المتزامنة .
- ٣ - تشوه موجة الفيض المغناطيسى فى الآلات المتزامنة نتيجة التغير المفاجئ للحمل .
- ٤ - التوزيع غير الجيبى لموجة الفيض المغناطيسى فى الآلات المتزامنة .
- ٥ - وجود تيارات المغنطة بمحولات القدرة .
- ٦ - الخصائص غير الخطية لاحمال الشبكة الكهربائية مثل : الموحّدات (*rectifiers*) ، المبدلات (*Inverters*) ، ماكينات اللحام (*welders*) ، افران القوس (*arc furnaces*) ، أجهزة التحكم فى الجهد (*voltage controllers*) ، مبدلات التردد (*frequency convertors*)

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٥٤ -

ب - المصادر الجديدة للتوافقيات *New Harmonic Sources*

١ - أجهزة قياسات بقاء الطاقة (*Energy conservation measures*) ، مثل المستخدمة لتحسين كفاءة المحرك ومروعة الاحمال ، والتي تتكون من اليكترونيات القوى (*Power electronics*) ، وتنتج هذه الاجهزة موجات تيار وجهد غير منتظمة وغنية بالتوافقيات .

٢ - معدات التحكم فى المحركات (*Motor control devices*) ، مثل معدات التحكم فى السرعة (*speed control*) المستخدمة فى وسائل النقل الكهربى .

٣ - نقل وتحويل القدرة الكهربائية بجهد عالى مستمر (*HVDC*)

٤ - ربط وسائل تحويل القدرة من الرياح والطاقة الشمسية بشبكات التوزيع .

٥ - استخدام المعوضات الاستاتيكية للقدرة غير الفعالة (*Static - var compensators*) ، والتي حلت محل المكثفات المتزامنة (*Synchronous condensers*) ، وتعتبر المصدر الدائم المتغير للقدرة غير الفعالة .

٦ - التوسع فى استخدام وسائل النقل الكهربى والتي تحتاج لمصدر تيار مستمر لشحن البطاريات .

٧ - استخدام مبدلات قدرة لتحويل (*d.c*) الى (*a.c*) (*dclac power converters*) فى المعدات الهيدروليكية المغناطيسية (*magneto - hydrodynamics*) ، وبطاريات التخزين (*storage batteries*) وخزانات الوقود (*fuel cells*) ..

٨ - استخدام مبدلات ذات دورات (*Cycloconverters*) للحصول على سرعات منخفضة وعزم عالى بالالات

٩ - التحكم فى عناصر التسخين باستخدام نبضات مندفعة (*pulse - burst modulated heating elements*) للافران الكبيرة .

مما سبق يتضح انه قبل التوسع الكبير فى صناعة واستخدام اليكترونيات القوى ممثلة فى المبدلات الاستاتيكية (*Static converters*) او مبدلات *AC/DC*(converters) كان المصدر الاساسى للتوافقيات فى الشبكات الكهربائية ناتجاً من بعض عوامل التصميم ومن تشغيل الآلات الكهربائية (*electric machines*) والمحولات الكبيرة (*transformers*) وافران القوس الكهربى .

وقد تطورت صناعة وتصميم الآلات الكهربائية الدوارة والمحولات الكهربائية بحيث تعطى موجة جيبيية نقية فى حالات التشغيل المستقرة (*Steady state*) ولا تسبب اية

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٥٥ -

تشوهات فى موجات الشبكة الكهربائية . ولكن فى حالات التشغيل الفجائية وغير المستقرة يحدث تكبير لقيم التشوهات المسموحة ، اى تزيد التشوهات او التوافقيات فى الشبكة الكهربائية .

وسنتعرض فيما يلى لتوضيح مصادر التوافقيات الآتية :

- ١ - الآلات الدوارة (Rotating machines)
- ٢ - محولات القدرة (Power Transformers)
- ٣ - محولات الجهد والتيار (Voltage and current transformers)
- ٤ - افران القوس (Arc Furnaces)
- ٥ - الاستعمالات المنزلية (Household appliances)
- ٦ - مصابيح الفلورسنت (Fluorescent lighting)
- ٧ - وسائل النقل الكهربائى (Electrical traction)
- ٨ - السخانات التآثيرية (Induction heaters)
- ٩ - اللحام الكهربائى (Electric welding)
- ١٠ - مبنى الاعمال المحاسبية (Accounting operations building)
- ١١ - مبدلات AC/DC (AC/DC converters)

الآلات الدوارة ومحولات القدرة

تتشترك الآلات الدوارة (rotating machines) والمحولات (Transformers) والممانعات (reactors) فى حدوث ارتفاع لقيم التوافقيات اذا حدث تشبع مغناطيسى للقلب الحديدى ويوضح شكل (٢-١) ا العلاقة بين الفيض Φ والتيار الاثارة (i) ، مع أخذ التخلف المغناطيسى (hysteresis) للقلب فى الاعتبار ، ويوضح شكل (٢-١) ب التغير فى التيار (i) بالنسبة للزمن (t) (المنحنى ذو الخط الرفيع) ويكون منحنى العلاقة بين الفيض Φ والزمن مسطحاً (Flat - top) كما فى شكل (٢-١) جـ (المنحنى ذو الخط الرفيع) ويمكن الحصول على هذا المنحنى برسم نقطة نقطة تبعاً للخطوط المتقطعة الموضحة بشكل (٢-١) ويكون الجهد الحادث على الملف نتيجة وجود الفيض متناسباً مع تغيير الفيض بالنسبة للزمن ، أى $d\Phi / dt$ ، ونحصل عليه بتفاضل المنحنى المرسوم بين Φ ، ويوضح شكل (٢-٢) تغير الجهد (e) مع الزمن وكذلك تيار الاثارة مع الزمن . بمعنى آخر اذا كان تغير الجهد جيبياً فان الفيض ايضاً يتغير جيبياً ، كما فى شكل

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٥٦ -

(٢-١) ج (المنحنى ذو الخط السميك) . وباستخدام هذا المنحنى يمكن رسم منحنى تيار الاثارة مع الزمن نقطة نقطة ، كما فى شكل (٢-١) ب (المنحنى ذو الخط السميك) ويلاحظ احتواء موجة التيار على قمم مدببة ، ويوضح شكل (٢-٣) موجتى التيار والجهد لهذه الحالة .

يتضح من ذلك ان التشبع المغناطيسى بالقلب الحديدى يؤدى الى تشوه موجتى التيار والجهد الحادث . وباستخدام تحليل فوريير نجد أن هذه الموجة المشوهة تحتوى على التوافقيات الثالثة والخامسة والسابعة ..

المركبات التتابعية للتوافقيات Sequence of harmonics

تحلل التوافقيات بالنظام الثلاثى الالوجه المتماثل باستخدام المركبات المتماثلة (Symmetrical components) علماً بان النظام المتماثل لايحتوى على مركبات التوافقيات الزوجية (even harmonics) وتحتوى مركبات التتابعية الموجبة السالبة والصفريية على التوافقيات الفردية تبعاً للجدول رقم (٢-١) .

جدول (٢-١)

مركبة التتابعية	درجة التوافقية
الموجبة (positive)	١
الصفريية (Zero)	٢
السالبة (Negative)	٥
الموجبة	٧
الصفريية	٩
السالبة	١١
الموجبة	١٣
الصفريية	١٥
السالبة	١٧
الموجبة	١٩
الصفريية	٢١
السالبة	٢٣
الموجبة	٢٥
الصفريية	٢٧
السالبة	٢٩
الموجبة	٣١
.	.
.	.

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٥٧ -

ويلاحظ من جدول (١-٢) الآتى :

١ - تحتوى توافقيات التتابعية الموجبة (*Positive - sequence harmonic*) على الدرجات : ١ ، ٧ ، ١٣ ، ١٩ ، ٢٥ ، ٣١ ، ...

والتي يمكن وضعها على صورة $(6K + 1)$ وبالتعويض عن $k = 0, 1, 2, \dots$ نحصل على درجات التوافقيات للتتابعية الموجبة .

٢ - تحتوى توافقيات التتابعية السالبة (*Negative - sequence harmonics*) على الدرجات : ٥ ، ١١ ، ١٧ ، ٢٣ ، ٢٩ ، ...

والتي يمكن وضعها على صورة $(6k - 1)$ وبالتعويض عن $k = 1, 2, 3, \dots$ نحصل على درجات التوافقيات للتتابعية السالبة .

٣ - تحتوى توافقيات التتابعية الصفرية (*Zero-sequence harmonics*) على الدرجات : ٣ ، ٩ ، ١٥ ، ٢١ ، ٢٧ ، ...

والتي يمكن وضعها على صورة $(6K - 3)$ وبالتعويض عن $k = 1, 2, 3, \dots$ نحصل على درجات التوافقيات للتتابعية الصفرية .

٤ - لا تحتوى توافقيات التتابعية للنظام الثلاثى الاوجه المتماثل على درجات التوافقيات الزوجية (*even*) .

٥ - تسمى الدرجات ٣ ، ٩ ، ١٥ ، ٢١ ، ٢٧ ... الموجودة فى توافقيات التتابعية الصفرية بالدرجات الثلاثية الفردية وهى الدرجات التى تقبل القسمة على ثلاثة (*Triple*)

نجد فى النظام الثلاثى الاوجه المتماثل ان الجهود بين الاوجه ونقطة التعادل (*line - natural voltage*) تحتوى على كل التوافقيات الموجودة فى الجهد بين خطين (*Line - to - line voltage*) بالاضافة الى توافقيات التتابعية الصفرية .

١ - الآلات الدوارة *Rotating Machines*

١-١ الآلات المتزامنة *Synchronous machines*

يكون المصدر الاساسى للتوافقيات فى الآلات المتزامنة كالاتى :

١ - شكل المجال (*field form*) ، خاصة بالآلات ذات الاقطاب البارزة (*Salient pole*) .

٢ - التغير فى الممانعة (*reluctance*) نتيجة وجود مجارى (*Slots*) الملفات .

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٥٨ -

- ٣ - تشبع الدائرة المغناطيسية ومسار التسرب بالدائرة .
- ٤ - ملفات الاخماد (*damper windings*) والتي تكون على مسافات غير متماثلة .
ويمكن التحكم فى التوافقيات عن طريق الآتى :
- ١ - توسيع الثغرة الهوائية (*air gap*)
- ٢ - شكل الأقطاب .
- ٣ - غلق جزء من المجارى (*Slots*)
- ٤ - ميل الاقطاب او المجارى
- ٥ - عدد المجارى / وجه / قطب .
- ٦ - الف الوترى (*Chording*) للملفات .
- ٧ - احتكاك الملفات / المجارى .

وبعض هذه العوامل تؤدي الى ارتفاع كبير فى التكاليف . وعادة لا يستخدم العامل رقم ٣ الخاص بغلق جزء من المجارى وذلك لعدم استخدام ملفات ملفوفة على اطار تشكيل (*Form - wound coils*) . بينما نجد ان العامل رقم ٤ الخاص بميل الاقطاب او المجارى يسبب مفقودات ويؤدى الى مشاكل ميكانيكية فى التركيب.

لذلك تتحول العوامل السابقة الى ما يأتى

- ١ - الاحتياج الى نسب مناسبة بين المجارى المفتوحة وطول الثغرة الهوائية .
- ٢ - الاختيار المناسب لعدد المجارى / وجه / قطب وذلك لتكون الترددات الناتجة من المجارى (*Slot frequency*) مناسبة .
- ٣ - الف الوترى واحتكاك الملفات / المجارى .

يمكن التخلص من بعض التوافقيات بتغيير الخطوة الوترية للملفات (*Pitch of chored coil*) ولكن عادة يصاحب ذلك زيادة فى بعض التوافقيات الاخرى . بمعنى آخر ان الملف الوترى يعتبر عاملاً مفيداً لتحديد التوافقيات .

ومن أكثر العوامل العملية للتحكم فى توافقيات المجارى عامل احتكاك الملفات / المجارى وتنتج اهم التوافقيات بالآلات المتزامنة من الترددات الناتجة من المجارى والتي تعطى من المعادلة الآتية .

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٥٩ -

$$f_s = SN \pm f$$
$$= (2M \pm 1)f$$

حيث :

 f_s = الترددات الناتجة من المجرى . S = العدد الكلى لمجرى عضو المنتج (armature) N = سرعة الآلة (دورة / ثانية revolution / sec) f = التردد الاساسى M = عدد المجرى / قطب

١ - المولدات المتزامنة Synchronous generators

تصمم المولدات المتزامنة لانتاج موجة جيبيية نقية ، ومع افتراض ان الفيض المغناطيسى يكون موزعاً بالكامل على شكل جيبي حول الثغرة الهوائية (air gap) وبذلك تتولد قوة دافعة كهربائية (emf) بملف العضو المنتج لخطوة كاملة (Full - pitched armature coil) تخضع للعلاقة .

$$E = 2 \pi f \Phi \sin \omega t \quad \text{volt / turn}$$

حيث

 Φ : الفيض الكلى / قطب f : التردد ويساوى NP N : السرعة (Revolution / Sec) P : عدد الاقطاب الزوجية (Pole Paris)

ولكن فى الحقيقة ان وجود الملفات بمجرى (Slots) القلب الحديدى للدائرة المغناطيسية يعنى حدوث بعض التشوهات فى موجات الفيض المغناطيسى والقوتين الدافعة المغناطيسية والكهربائية ، كما فى شكل (٤-٢) . فعندما تدور الآلة ، فان القوة الدافعة الكهربائية الحادثة على الملفات تتناوب بين القطب الجنوبي (North Pole) والقطب الشمالى (South Pole) وأية تشوهات تؤثر على نصفى الدورة بالتساوى. عموماً نحصل من الآلة على نصفى دورة متماثلتين وبناء عليه تحتوى الموجة المركبة الناتجة على

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٦٠ -

توافقيات فردية فقط .

وعلى ذلك يكون توزيع المجال غير خطى ويخضع للمعادلة :

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

حيث λ طول الموجة (wave length)

وتصبح معادلة القوة الدافعة الكهربائية بالملف تساوى

$$E(t) = E_1 \sin \omega t + E_3 \sin 3\omega t + E_5 \sin 5\omega t + \dots$$

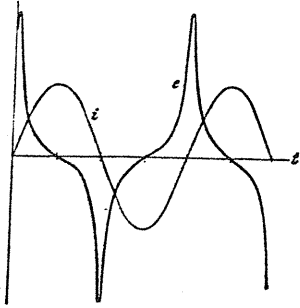
وبالاختيار المناسب للزاوية الكهربائية (electrical angle) بين الجارى ، وكذلك مناسبة اللف الوترى (chorded) للملفات يمكن تقليل او حذف التوافقيات .

وتلغى عادة درجات التوافقيات الفردية الثلاثية (Triplens) (مثل التوافقية الثالثة والتاسعة والخامسة عشر ...) بالآلات ثلاثية الاوجه عن طريق توصيلات الواجه (phase connetion) ، وعادة يختار اتساع ملف (Coil - span) الالة (وهى المسافة بين جانبي الملف والتي تقاس بعدد الجارى المحصورة بين جانبي الملف او بعدد الملفات المحصورة بينهما وأحياناً تسمى هذه المسافة باسم الخطوة الخلفية (back pitch)) وذلك لتقليل التوافقيتين الخامسة والسابعة .

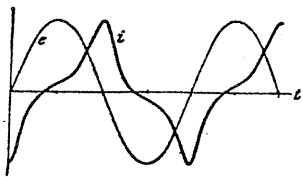
ويصاحب التشبع بالقلب حدوث تيارات التوافقيات بالملفات ويرجع ذلك الى منحنى العلاقة بين القوة الدافعة المغناطيسية (H) وكثافة الفيض (B) (B-H cuve) . ويتسليط القوة الدافعة الكهربائية (emf) الجيبية على الملف مع اهمال مقاومة الملف ، فان التيار الناتج يكون مساوياً للقوة الدافعة المغناطيسية الحادثة ومضاداً لها فى الاتجاه . ولكى نحصل على موجه تيار جيبية يجب ان يرتفع التيار بمعدل عالى قبل حالة التشبع وبمستوى أعلى من منحنى B-H ، وهذا واضح بشكل (٥-٢) ، ويلاحظ انه اذا كانت القوة الدافعة الكهربائية (emf) جيبية فان موجة الفيض المغناطيسى يجب ان تكون جيبية ، فمن شكل (٥-٢) نحصل على فيض عند النقطة P نتيجة تيار المغنطة OA (Magnetizing current) ، وعند النقطة A' والذي يقابل النقطة P' على المنحنى (B-H) ، كما يلاحظ من الشكل أيضاً شكل موجة تيار المغنطة والتي بتحليلها نجد انها تحتوى على التوافقية الثالثة .

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

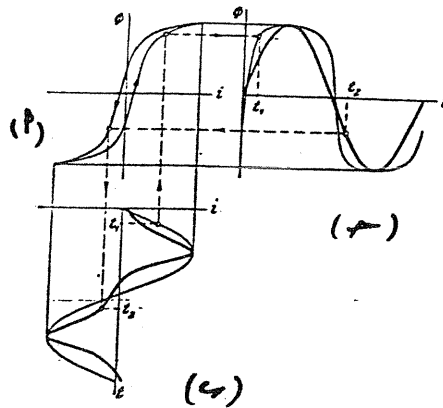
- ٦١ -



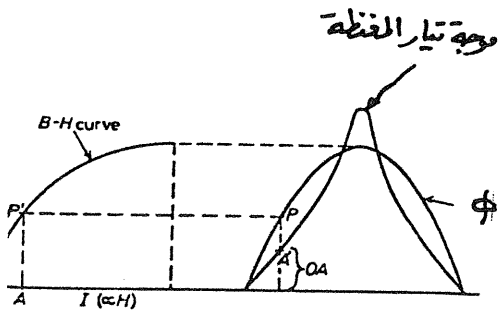
شكل (٢-٢)



شكل (٢-٣)

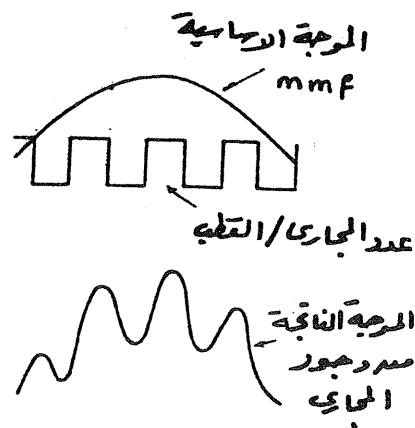


شكل (٢-٤)



شكل (٢-٥)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »



شكل (٢-٦)

- ٦٢ -

ب - المحركات التآثيرية Induction motors

نحصل على سرعة المجال الدوار المتزامن (Synchronous rotating field) للعضو الثابت بالمحرك التآثيرى من المعادلة

$$N_s = f_1 \lambda$$

حيث

$$f_1 = \text{التردد الاساسى}$$

$$\lambda = \text{طول الموجه (wavelength)}$$

وتكون سرعة العضو الدوار (rotor)

$$N_r = f_1 \lambda (1-s)$$

$$\text{حيث } s = \text{الانزلاق (Slip)}$$

بينما يكون تردد العضو الدوار

$$f_r = sf_1$$

توجد توافقيات فى موجة القوة الدافعة المغناطيسية (mmf) للعضو الدوار وتكون خصائص التوافقية n بموجة mmf كالاتى :

$$- \text{ لها طول موجة تساوى } \frac{\lambda}{n}$$

$$- \text{ لها سرعة تساوى } \frac{\lambda}{n} \pm (sf) \text{ بالنسبة للعضو الدوار .}$$

$$- \text{ لها سرعة تساوى } \left\{ f \lambda (1-s) \pm (sf) \frac{\lambda}{n} \right\} \text{ بالنسبة للعضو الثابت}$$

تحدث هذه التوافقية قوة دافعة كهربية emf فى العضو الثابت عند تردد يساوى السرعة على طول الموجه اى ان

$$f' = \frac{f \lambda (1-s) \pm (sf) (\lambda / n)}{(\lambda / n)} = f \{ n - s (n \pm 1) \}$$

وتستخدم الاشارة الموجبة عندما تتحرك التوافقية n للقوة الدافعة المغناطيسية للعضو المتحرك فى اتجاه عكس الموجه الاساسية .

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٦٣ -

وتحدث التوافقيات أيضاً كنتيجة لعدم التماثل الكهربى ، باعتبار حالة عدم الاتزان الكهربى للملفات العضو الدوار ، وتكون ملفات العضو الثابت متزنة بمجرد ان ينتج مصدر جهد التغذية مجال دوار نقى يدور بسرعة تساوى $f \lambda$.

وتنتج قوة دافعة كهربية emf بتردد الانزلاق فى العضو الدوار ، وحيث ان ملفات العضو الدوار غير متزامنة ، فان كلا من مركبتى التتابعية الموجبة والسالبة للتيار تمر محدثة مجال فى الاتجاه الامامى وآخر فى الاتجاه الخلفى، ويدوران بسرعة $\pm sf\lambda$ منسوبة للعضو الدوار ، وبسرعة $(1-s) \lambda \pm sf\lambda$ منسوبة للعضو الثابت . ويكون تردد القوة الدافعة الكهربية للعضو الثابت الحادث من هذين المجالين $f, f(1-2s)$ ، ويعتبر التردد $f(1-2s)$ هو تردد التوافقية ، وينتج الفعل المتبادل بين تيارات التردد الاساسى والتوافقيات ضربات عند التردد المنخفض $(2sf)$ تسجلها العدادات المتصلة بالمحرك ويوضح جدول (٢-٢) مثال لاعطاء فكرة عن قيمة تيار التوافقية كنسبة من القيمة الاساسية لمحرك تأثيرى ذى عضو دوار ملفوف (*wound - rotor induction motor*) يحتوى على عدد ٦ أقطاب ويدور بسرعة $0.9 p.u$

كذلك يوضح الجدول اسباب حدوث هذه التوافقيات .

جدول (٢-٢)

سبب حدوث هذه التوافقيات	تيار التوافقية كنسبة من التيار الاساسى (%)	التردد (هرتز)
عدم اتزان الاقطاب	٣ %	٢٠
عدم اتزان الوجة للعضو الدوار	٢,٤ %	٤٠
التبادل الاساسى (<i>Fundamental mutual</i>)	١٠٠ %	٥٠
عدم اتزان الاقطاب	٢,٣ %	٨٠
التبادل بالتوافقتين الخامسة والسابعة	٢,٩ %	٢٢٠
	٣ %	٣٢٠
التبادل بالتوافقتين الحادية عشر والثالثة عشر	٣,٣ %	٤٩٠
	٤,٤ %	٥٩٠

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٦٤ -

٢ - محولات القدرة Power Transformers

يعتبر تشبع القلب هو السبب الرئيسى الذى يؤدي الى تشوه شكل الموجات فى المحولات الكهربائية ، فإذا حدث تشبع فان موجة الجهد الجيبية المسطرة على الملف الابتدائى للمحول تنتج تيار إثارة غير جيبى (مشوه) . ولدراسة الظاهرة المصاحبة لتشبع المحول سنتعرض للدائرة المكافئة للمحول والموضحة بشكل (٦-٢)

حيث :

$$E_g = \text{جهد مصدر التغذية (تردد اساسى جيبى)}$$

$$Z_g = \text{معاوقة المصدر (لها قيم مختلفة تبعاً لتردد التوافقيات المختلفة)}$$

$$E_p = \text{الجهد الابتدائى}$$

$$E_s = \text{الجهد الثانوى}$$

$$L_p = \text{محاثة التسرب (Leakage inductance) للملف الابتدائى}$$

$$L_s = \text{محاثة التسرب (Leakage inductance) للملف الثانوى}$$

$$M = \text{المحاثة التبادلية (Mutual inductance) للملفات المحول .}$$

$$E_h = \text{مصدر توافقيات الجهد (بفرض عدم وجود معاوقة عند التردد الاساسى) له قيم مختلفة عند الترددات المختلفة .}$$

$$I_{ex} = \text{تيار الاثارة (exciting current) نتيجة المصادر } E_g, E_h$$

ويراعى أن مصدر توافقيات الجهد E_h له توافقيات فردية (odd) وتقل قيمته كلما ازدادت درجة التوافقية . وهو تمثيل لحالة تشبع القلب والمصدر الاساسى للتوافقيات.

وفيما يلى دراسة تشوه تيار الاثارة والجهد لحالات مختلفة تبعاً للدائرة المكافئة بشكل (٦-٢):

١ - المصدر الجيبى باهمال المعاوقة : فى هذه الحالة فان موجة الجهد الابتدائى تكون جيبية بينما يحتوى تيار الاثارة على مركبات توافقيات تنتج من مصدر التوافقيات E_h والتي تؤدي الى مرور تيارات خلال معاوقة مصدر التوافقيات . وتحتوى موجة الجهد الثانوى على بعض التشوهات نتيجة للتسرب بين الملفات الابتدائية والثانوية . وتقدر توافقيات الجهد الثانوى اذا عرفت مركبات التوافقيات بتيار الاثارة بالاضافة الى معرفة ممانعة التسرب (leakage reactance) الابتدائية .

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٦٥ -

٢ - قيمة معاوقة المصدر صغيرة عند التردد الاساسى ، وما لانهاية عند ترددات التوافقيات :

فى هذه الحالة يخضع تيار الاثارة للتردد الاساسى فقط ، بينما يحتوى كل من الجهد الابتدائى والثانوى على توافقيات متعددة .

وعند توصيل الحمل (*Load*) على المحول ، كما فى شكل (٦-٢) ، فان تيارات التوافقيات تقسم بين الملفات الابتدائية والثانوية ، فإذا حدث لاحدى الدائرتين رنين (*resonant*) عند تردد توافقية معينة ، فان كل مركبات توافقيات تيار الاثارة تمر خلال ملفات المحول لهذه الدائرة .

كما يمكن ان تؤدى توافقيات الجهد بمصدر التغذية الى زيادة او انخفاض التوافقيات بتيار الاثارة خاصة المركبات المارة فى أحد ملفات المحول .

وقد تؤدى التوافقيات الموجودة بالمصدر بالاضافة الى حدوث رنين للمحول مع معاوقة المصدر عند نفس التردد الى تشوه كبير غير متوقع فى موجتى التيار والجهد .

خصائص الاثارة *Excitation Characteristics*

يكون الحمل الابتدائى للمحول ، من الناحية العملية ، عند حالة اللاحمل متزنًا ، عن طريق القوة الدافعة الكهربائية الخلفية (*back emf*) نتيجة لإهمال تأثير مقاومة الملفات وممانعة التسرب عند التيارات الصغيرة جداً .

وعند أى لحظة فان الجهد المسلط كمصدر جيبي يكون

$$v_1 = -e_1 = -E_m \sin \omega t = N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

ومن هذه المعادلة نحصل على معادلة الفيض Φ الآتية :

$$\Phi = - \int \frac{e_1}{N_1} dt = \frac{E_m}{N_1 \omega} \cos \omega t = \Phi_m \cos \omega t$$

فمعنى ذلك ان الجهد الابتدائى الجيبي (v_1) ينتج موجة فيض جيبيية عند حالة اللاحمل. ولكن نتيجة التناسب غير الخطى بين الفيض وتيار الاثارة (او تيار المغنطة) فان موجة التيار الابتدائى تكون جيبيية مشوهة ، كما سبق ايضاحه . ويوضح شكل (٧-٢) تيار المغنطة (*Magnetizing current*) لمحور ذى قلب حديدى مغلق ، قد سلط عليه

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٦٦ -

مصدر جيبي عند حالة اللاحمل ، وتم قياس التيار عند ثلاثة قيم لكثافة الفيض (B) وهى $10000, 15000, 20000 \text{ gauss}$ ومن المعروف ان المحولات تصمم لاسباب اقتصادية للوصول بمادة القلب الحديدي الى افضل الخصائص المغناطيسية ، وهذا يعنى ان قلب المحول المثالى النموذجي يستخدم الشرائح المصنوعة من صلب مسحوب فى اتجاه الحبيبات (*grain - oriented steel*) ويعمل عند أقصى كثافة فيض مغناطيسية ، فى حالة الاستقرار (*Steady state*) ، حوالى $1.6 - 1.7 \text{ Tesla}$ (10^4 gauss). وإذا عمل المحول عند هذه القيمة لكثافة الفيض فانه يخضع لزيادة جهد ٣٠ ٪ ، كما يمكن ان تخضع مادة القلب لكثافة فيض بقيمة $1.9 - 2 \text{ Tesla}$ وهى التى تسبب حالة التشبع نتيجة زيادة الجهد .

وتكون مشكلة حالة التشبع الناتجة من زيادة الجهد خطيرة اذا كان المحول يغذى وحدة تحويل تيار مستمر كبيرة حيث يصل الجهد بين طرفى وحدة التحويل الى حوالى ١٤٣ ٪ وباستخدام ثلاثة محولات أحادية الوجه موصله معاً لتكوين المحول الثلاثى ، من النوع ذى القلب ، فعندما يتشبع القلب فانه يحتوى على تيار مغنطة متماثل (*Symmetrical magnetizing current*) بالاضافة الى التوافقيات الفردية (*odd*) . ويتجاهل المركبة الاساسية ويفرض ان جميع تيارات التوافقيات الثلاثية الفردية (*Triplen*) تمر داخل الدلتا ، وعلى ذلك فان التوافقيات الحادثة تكون من الدرجات ٥ ، ٧ ، ١١ ، ١٧ ، ١٩ ، وبمعنى آخر تكون درجة التوافقيات ($6k \pm 1$) حيث k رقم .

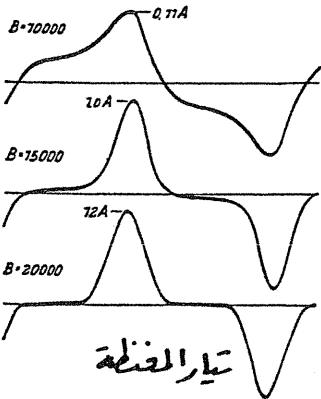
ويوضح شكل (٨-٢) العلاقة بين تيار المغنطة ومركبات التوافقيات مع جهد الاثارة (*exciting voltage*) بالمحول .

بينما يوضح شكل (٩-٢) نفس العلاقة بين تيار المغنطة ومركبات التوافقيات مع جهد الاثارة باستخدام محول ذى قلب صلب سليكونى ، مع ملاحظة الزيادة الملحوظة فى مركبات التوافقيات بتيار الاثارة مع الزيادة فى الجهد .

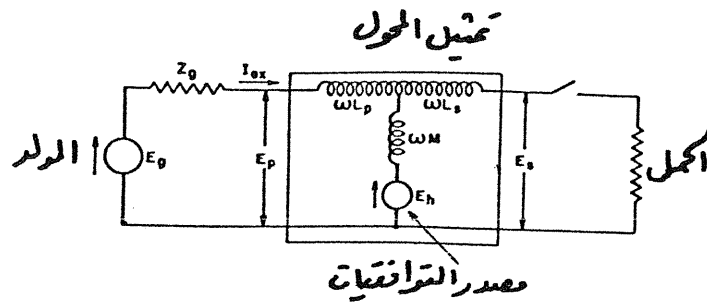
فعند تغذية محولات احادية الوجه من مصادر تغذية احادية الوجه يكون لها مسار معاوقة لمرور كل التوافقيات الفردية الناتجة من تشبع المحول وعند توصيل محولات احادية الوجه لتكوين محول ثلاثى الاوجه ، مع تغذيته من نظام ثلاثى الاوجه فتمر فقط

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

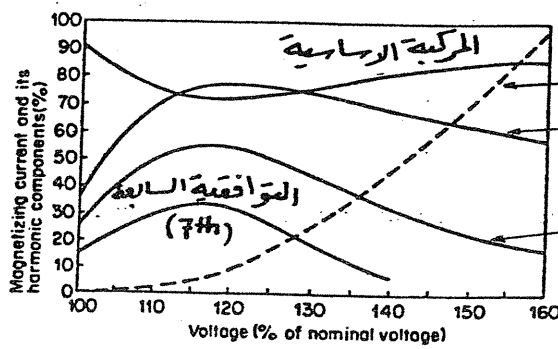
- ٦٧ -



شكل (٦-٢)



شكل (٦-٣)



شكل (٨-٢)

تيار المغنطة
التوافقية الثالثة
(3rd)
التوافقية الخامسة
(5th)

- ٦٨ -

التوافقيات الفردية الغير ثلاثية (*non - triple*) والموجودة بتيار الاثارة لانها تمثل التتابعية الموجبة والتتابعية السالبة ، كما ذكرنا سابقاً ، وعلى ذلك فان مرور التوافقيات الثلاثية الفردية (*triple*) لتيار الاثارة ، والتي تكون عبارة عن التتابعية الصفرية ، يعتمد على حالة المحول وطريقة توصيل مصدر التغذية او دائرة الحمل .

كما يوضح جدول (٢-٣) وجود تيارات وجهود التوافقيات الثلاثية الفردية (*triple*) فى التوصيلات الشائعة الاستخدام لمحولات تحتوى على ملفين ، كذلك الدائرة المكافئة للمحول فى كل توصيلة .

ويكون مصدر التوافقيات ، فى الدائرة المكافئة ، عبارة عن التوافقيات الفردية الثلاثية فقط ، اى انها توافقيات التتابعية الصفرية (١٥،٩،٣) ...) ويلاحظ من جدول (٢-٣) الآتى :

أ - للملفات المتصلة دلتا (*delta*) فان مسار التوافقيات ذات الدرجات ٣ ، ٩ ، ١٥ ... لتيار الاثارة تمر خلال المحول كما فى الطرق ١ ، ٢ ، ٣ بالجدول .

ب - للملفات المتصلة نجمة مؤرضة (*Grounded - star*) فان مسار مركبة التوافقيات : ٣ ، ٩ ، ١٥ ... لتيار الاثارة تمر خلال الدائرة الخارجية ، اذا كانت الدائرة كاملة .

ج - للملفات المتصلة نجمة غير مؤرضة (*ungrounded - star*) ، فانه لا يوجد مسار لمركبة التوافقيات : ٣ ، ٩ ، ١٥ .. لتيار الاثارة سواء فى المحول او فى الدائرة الخارجية . تظهر توافقيات الجهد الفردية الثلاثية (*Triple*) بين الخط ونقطة التعادل بينما يعتمد توزيع الجهد بين نقطة التعادل والارضى وبين الخط والارضى على المعاوقة بين هذه الاطراف والارضى وعلى ذلك فان :

أ - اذا كانت نقطة التعادل مؤرضة فان جهود التوافقيات الفردية الثلاثية تظهر بين اطراف الخط والارضى وتؤثر على الدائرة الخارجية .

ب - اذا كانت نقطة التعادل غير مؤرضة ، فان جهود التوافقيات الفردية الثلاثية تظهر بين نقطة التعادل والارضى ولا تؤثر على الدائرة الخارجية .

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

جدول (٣-٢)

الحالة	المجموعة الاتجاهية للحمل التأني / الابتدائي		الدائرة المكافئة للحمل في حالة التوافقيات الشريعية	التوافقيات الشريعية بحجم المولد	التوافقيات الشريعية للدائرة الحجم التيار			
	CONNECTIONS		EQUIVALENT CIRCUIT FOR TRIPLE HARMONICS	TRIPLE-HARMONIC VOLTAGE TO GND. AT STAR POINT	CIRCUIT TRIPLE HARMONICS			
	PRIMARY	SECONDARY			CURRENTS		VOLTAGES	
					PRIMARY	SECONDARY	PRIMARY	SECONDARY
1				---	NONE	NONE	NONE	NONE
2				SMALL	NONE	NONE	NONE	NONE
3				---	NONE	(a) SMALL (b) NEGLI- GIBLE	NONE	SMALL
4				---	(a) LARGE (b) SMALL	(a) LARGE (b) SMALL	(a) SMALL (b) LARGE	(a) SMALL (b) LARGE
5				(a) SMALL (b) LARGE	(a) LARGE (b) SMALL	NONE NONE	(a) SMALL (b) LARGE	(a) SMALL (b) LARGE
6				LARGE	NONE	NONE	LARGE	LARGE

(a) في حالة المعاوقة الصغيرة لمسار التوافقيات الشريعية.

(b) في حالة المعاوقة الكبيرة لمسار التوافقيات الشريعية.

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٧٠ -

التوافقيات بالتيار الدفعي (Inrush Current Harmonics)

عند فصل المحول ، يمكن ان تكون كثافة الفيض المتبقى (Residual flux density) بالقلب لها قيمة إما $(+B_r)$ أو $(-B_r)$ أو (Zero) وعند اعادة تغذية المحول فان كثافة الفيض تخضع للشكل رقم (١٠-٢) ، ويمكن ان يصل مستوى أقصى كثافة للفيض بقيمة $(2B_{max})$ أو $(B_r + 2B_{max})$ وتصمم المحولات عادة بحيث تتغلب على قيمة الذروة لكثافة الفيض والتي تكون حوالى ٤,٧ أو ٣,٤ تسلا على التوالى . وبالمقارنة بمستوى كثافة الفيض عند حالة التشبع والتي تكون حوالى ٢,٠٥ تسلا والمستنتجة من حالة الاثارة الزائدة المتماثلة (Symmetrical over excitation) ، والتي ينتج عنها حالة تشبع زائدة وأيضاً أمبير - لفات زائدة بالقلب . ويؤثر هذا فى ارتفاع تيار المغنطة (Magnetizing current) بنسبة تتراوح من ٥ الى ١٠ ٪ من القيمة المقننة ، ويوضح شكل (١١-٢) التيار الدفعي لمحول قدره ٥ م.ف.أ - وكثافة الفيض المتبقية B_r تساوى ١,٣ تسلا ويكون التناقص فى التيار الدفعي مع الزمن بدلالة مقاومة الملف الابتدائى للمحول . ولمحولات القدرة الكبيرة فان التيار الدفعي يستمر لعدة ثوانى نتيجة انخفاض مقاومة ملفاتهم الابتدائية .

وباستخدام تحليل فوريير امكن الحصول على التوافقيات الموجودة بالتيار الدفعي للمحول والموضح بشكل (١١-٢) ومثلت كنسبة من التيار المقنن للمحول كما فى شكل (١٢-٢)

ومما سبق نجد ان المحول يتغذى بموجة جهد جيبيية متماثلة وينتج به تيار إثارة متماثل يحتوى فقط على توافقيات فردية (odd) ، واذا وصلنا حمل خطى (Linear) او غير خطى (non-linear) فان تيار الاثارة يظل محتوياً على التوافقيات الفردية .

وفى حالة عدم الاتزان ، يحتوى تيار الاثارة للمحول على مركبات التوافقيات الفردية والزوجية ، ويمكن حدوث حالة عدم الاتزان نتيجة توصيل اية احمال على المحول،والتي تكون متقدمة على مركبة التيار المستمر (d.c component) للتيار بالاضافة الى المركبات الجيبية .

وتكون قيمة توافقيات التيار كدالة فى كثافة الفيض بالدائرة المغناطيسية (القلب) بالمحول ، وتزداد قيمة التوافقيات (كنسبة من قيمة المركبة الاساسية) كلما ازدادت قيمة كثافة الفيض للقلب ، وبمعنى آخر كلما ازدادت حالة التشبع للقلب .

ويمكن تلخيص مشكلات وجود توافقيات التيار بالمحولات فى الآتى :

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٧١ -

١ - زيادة فى مفقودات النحاس والحديد بالمحول .

٢ - احتمال حدوث تداخل (*interference*) مغناطيسى مع دوائر الاتصالات السلكية .

بينما تكون مشكلات وجود توافقيات الجهد بالمحولات كالاتى :

١ - يؤدى الى زيادة الاجهادات (*stress*) الكهربائية فى المواد العازلة .

٢ - يحدث تداخلاً كهرومغناطيسياً مع دوائر الاتصالات السلكية .

٣ - يمكن حدوث رنين (*Resonance*) عند تردد هذه الجهود مع تردد الدائرة التى تحتوى على ممانعة الحث الذاتى لللفات المحول والسعوية الخاصة بخط التغذية المتصل بها .

٣ - محولات الجهد والتيار (*Voltage and current transformers*)

حيث ان محولات الجهد لا يحدث لها تشبع خلال الاعطال ، لذا فانها لاتصدر اية توافقيات لدوائرها الثانوية ، ولكن نتيجة لحدوث تشبع لمحولات التيار فانها تصدر توافقيات تيار فى دوائرها الثانوية خلال الاعطال ، تؤدى الى الاشتغال الخاطئ لمتنمات الوقاية ضد الاعطال الارضية (*phase to ground*) .

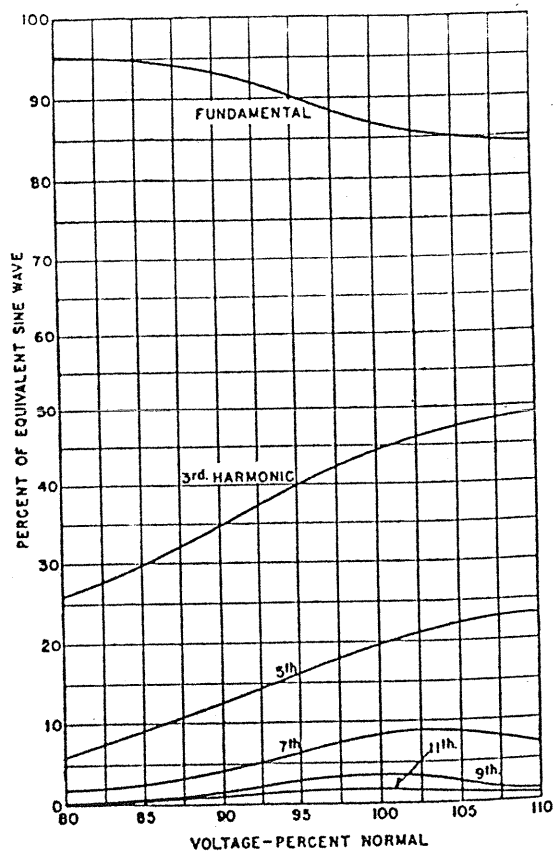
٤ - أفران القوس الكهربى (*Electric - arc - furnace*)

تعتمد فكرة تشغيل أفران القوس الكهربى على تكرار حدوث دائرة القصر (*short circuits*) بين الاقطاب (*electrodes*) والخردة (*Scrap - metal*) المرادُ انصهارها فى الفرن ويكون القوس ملامساً للمادة المراد صهرها فيمرر تيار عالى بين القطبين خلال المادة، ويقابل التيار العالى جهد منخفض . وعند انصهار المادة وابعادها عن القطب عندئذ ينطفئ القوس ولا يمر تيار وخلال دورة الانصهار يتغير التيار عشوائياً عن طريق حدوث دائرة القصر بين وجهين او الثلاثة اوجه او عن طريق دائرة مفتوحة لاحد الواجه . ويوضح شكل (١٣-٢) تيار وجه الوجه لفرن القوس وتحليل هذا التيار نجد ان الافران تنتج بصفة مستمرة جميع التوافقيات الزوجية والفردية والموضحة بشكل (١٤-٢) ويمكن ان تحتوى ايضاً على التوافقيات الفرعية (*Subharmonics*) .

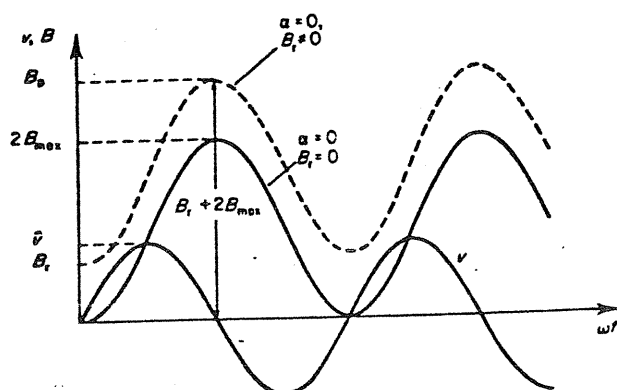
وبذلك يكون السبب فى حدوث التوافقيات هو السلوك غير المتزن وغير المستقر

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٧٢ -



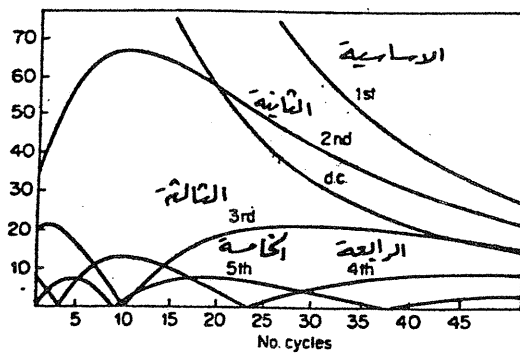
شكل (٩-٢)



شكل (١٠-٢)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

شکل (۱۱-۶)



شکل (۱۹-۹)

- ٧٤ -

لاقواس الثلاثة اوجه وايضاً للخاصية الغير خطية بين التيار والجهد . بالاضافة الى ان التغيير فى الجهد نتيجة التغير المفاجئ فى طول القوس ينتج امتداد للترددات (*spread of frequencies*) تكون غالباً فى حدود من ٠,١ - ٣٠ هرتز حول التوافقيات الموجودة . ويحدث هذا خلال الانصهار نتيجة استمرار حركة المادة المنصهرة ونتيجة الفعل المتبادل بين القوى الكهرومغناطيسية بين الاقواس .

ويكون سلوك القوس خلال دوره تنقية (*refining*) المعدن افضل ولكن يحتاج طول القوس لعملية ضبط نتيجة تموجات سطح المعدن المنصهر .

ويوضح شكل (١٥-٢) تسجيل للعلاقة بين التيار والتردد خلال دورتي الانصهار والتنقية للخرقة المراد انصهارها فى فرن القوس الكهربى وكذلك تسجيل المركبة الاساسية للتيار وتوافقيات التيار .

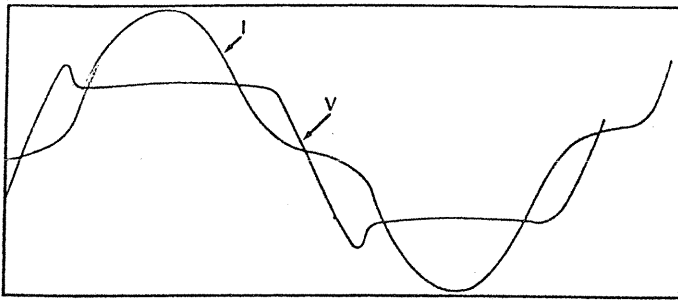
وتتغير مستويات تيارات التوافقيات تغيراً كبيراً مشوهاً مع الزمن ولذلك يفضل تسجيل التوافقيات مع التيار على شكل التسجيل الاحصائى (*probabilistic plots*) كالموضح بشكل (١٥-٢) وقد اختلفت المراجع فى تحديد متوسط مستويات التوافقيات (*average harmonic levels*) لافران القوس الكهربى ، ويوضح جدول (٤-٢) حدود هذه المستويات كنسبة من التيار الاساسى .

جدول (٤-٢)

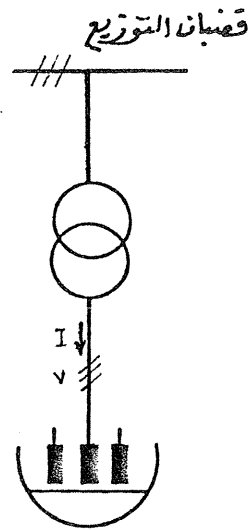
حدود متوسط مستوى التوافقية كنسبة من التيار الاساسى	درجة التوافقية
٤,٥ - ٣,٢	٢
٤,٧ - ٤	٣
٢,٨ - ١,١	٤
٤,٥ - ٢,١	٥
١,٧ - ٠,٦	٦
١,٦ - ١	٧
١,١ - ,٤	٨
١ - ,٠٥	٩
اكبر من ٠,٥ - اكبر من ١	١٠

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

-- V_o --

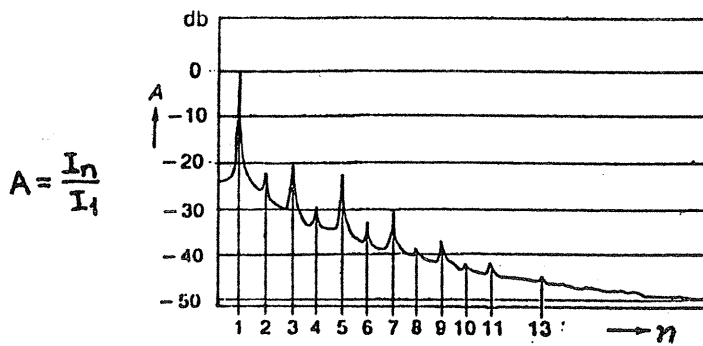


(٤)



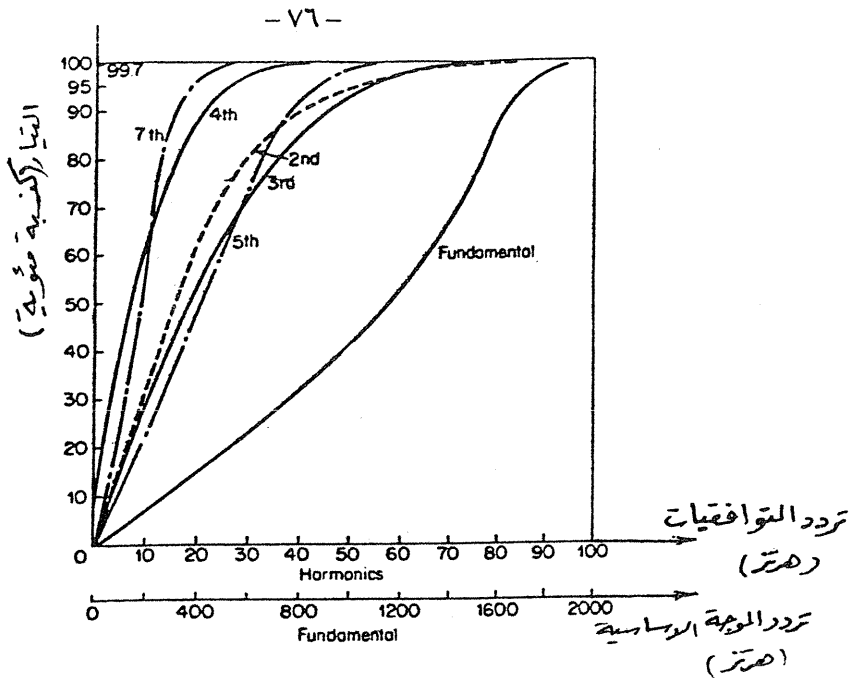
(٩)

شكل (١٣-٢)

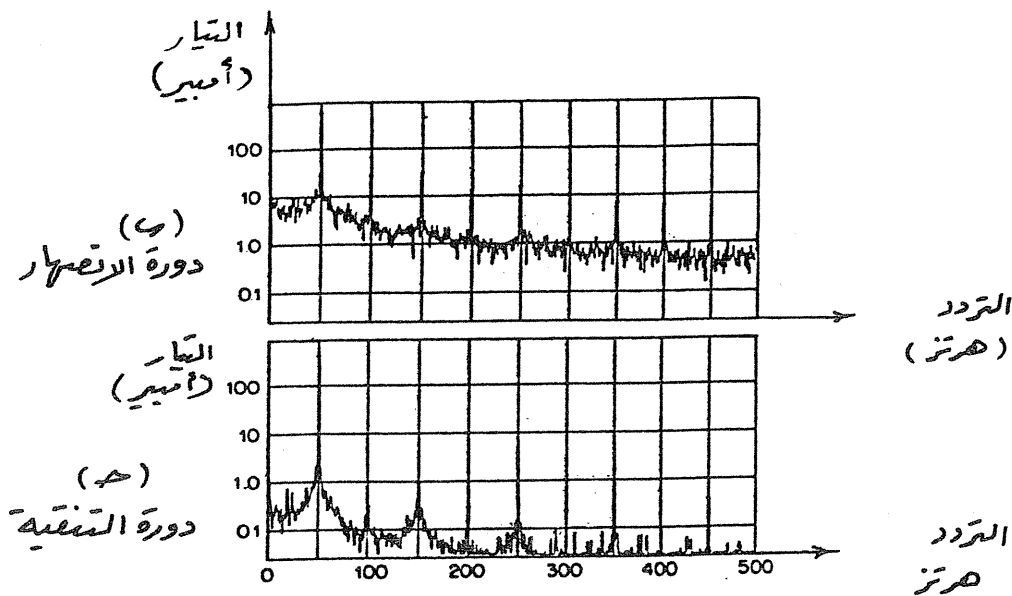


شكل (١٤-٢)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »



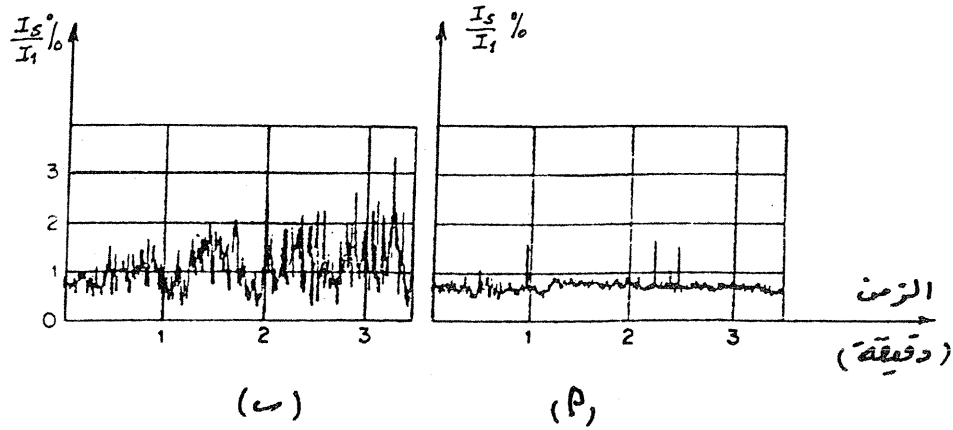
(P)



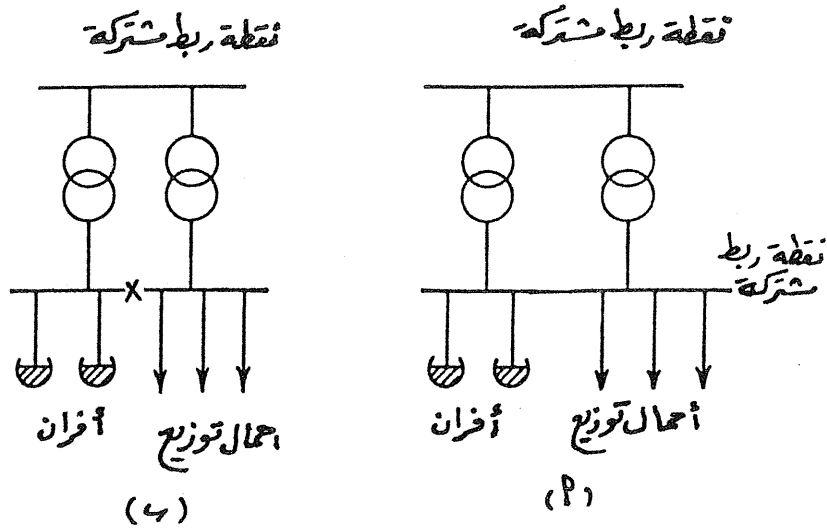
شكل (١٥-٢)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

٧٧-



شكل (١٦-٢)



شكل (١٧-٢)

- ٧٨ -

كما يوضح شكل (٢-١٦) أ العلاقة بين الزمن والتوافقية الخامسة كنسبة من التيار الاساسى فى دورة التنقية ، بينما نجد أن شكل (٢-١٦) ب يوضح العلاقة فى حالة دورة الانصهار لافران القوس الكهربى المبينة شكل (٢-١٧) أ والتى يلاحظ فيها اتصال أحمال توزيع (*Distributed load*) على نفس القضبان المغذية للافران ويختلف تأثير التوافقيات على هذه الاحمال خلال دورتي الانصهار والتنقية كما أن أبسط طرق العلاج ان تفصل الاحمال عن الافران كما فى شكل (٢-١٧) ب .

٥ - الاستعمالات المنزلية (*Household appliances*)

تعتبر المعدات الكهربائية المنزلية احد مصادر التوافقيات بالشبكة الكهربائية ومن أمثلة هذه المعدات :

- معدات المطبخ والتسخين التى تعتمد على محرك او وسط مغناطيسى .

- الادوات الكهربائية المحمولة (*Portable tools*)

- معدات خفض شدة الاضاءة (*Light dimmers*)

- أجهزة الاستقبال بالراديو والتلفزيون (*Radio & Television receivers*)

ويكون مصدر التغذية :

- الجهد المقنن حتى ٢٤٠ فولت - ٥٠ هرتز - من مصدر أحادى الوجه (يحتوى على سلكين او ثلاثة اسلاك (*Two or three - wire*) .

او - الجهد المقنن حتى ٤١٥ فولت - ٥٠ هرتز من مصدر ثلاثى الوجة (يحتوى على ثلاثة او اربعة اسلاك (*Three or four - wire*)

وتكون وسيلة التحكم الالكترونية (*electronic control*) بهذه المعدات هي مصدر الاضطرابات فى الشبكة الكهربائية اى حدوث توافقيات بالشبكة وفيما يلى مثالاً مأخوذ من مجلة IEEE No. 1 Jan. 1993 .

مبنى سكنى *Apartment Building*

يمثل الحمل السكنى الكبير بمبنى يتألف من عدة وحدات سكنية ، يغذى بمصدر تيار كهربى من محول ثلاثى الوجة $13.8/0.208 \text{ kv}$ ، وتم تسجيل الاحمال خلال ١٦٠ ساعة كما فى شكل (٢-١٨) كعلاقة بين الزمن والقدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة وتمثل

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٧٩ -

الاحمال بالسخانات (heaters) والمواقد الكهربائية (Electric ranges) وترجع القدرة غير الفعالة الى احمال التلاجات (refrigerators) والاضاءة بالفلورسنت (Fluorescent lights) ، ومحركات المصاعد (elevator motors) وقد تم تسجيل توافقيات الجهد والتيار بطريقة التوزيع الاحصائي (Statistical distributions) (وهو الرسم البياني النسيجي او رسم بياني مؤلف من سلسلة من المستطيلات او رسم احصائي (Histogram)).

ويوضح شكل (١٩-٢) الرسم البياني النسيجي للمركبة الاساسية والتوافقيتين الثالثة والخامسة لموجة جهد المصدر . كذلك يوضح جدول (٥-٢) مستويات توافقيات الجهد المقاسة (جذر متوسط المربعات rms) ومن هذا الجدول يتضح ان التشوه الكلي للتوافقيات Total Harmonic Distortion أي THD % ، تنحصر بين ٠,٤% و ٢,٧%.

جدول (٥-٢) مستويات توافقيات الجهد (V_{rms})

أقصى قيمة Max.	القيمة المتوسطة Mean	أدنى قيمة Min	درجة التوافقية Harmonic order
١٢١,٥	١١٩,٢	١١٦	١
٠,٢	٠,١	-	٢
١,٢	٠,٨	٠,٠٥	٣
١,٩	٠,٨٥	-	٥
٠,٦٢	٠,٣٥	٠,٢	٧
٠,٢٨	٠,١٢	-	٩
٠,٠٣	٠,٠٦	-	١١
٢,٧	١,٢٥	٠,٤	THD %

ويوضح شكل (٢٠-٢) تيارات التوافقيات الناتجة من المستهلكين الى الشبكة الكهربائية بدلالة الكثافة الاحتمالية (probability density) مأخوذة من أحمال المبنى المسجلة بشكل (١٨-٢) . وقد وجد ان أقصى تشوه كلى لتوافقيات التيار (THD%)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٨٠ -

يساوى ٦,٢٨ ٪ بينما القيمة المتوسطة تساوى ٦,١١ ٪. ويلاحظ اختلاف الرسم البيانى النسيجي (histograms) لنماذج التيارات بشكل (٢٠-٢) عن نماذج الجهود بشكل (١٩-٢) وهذا راجع الى ان توزيع الجهد عند قضبان المستهلكين (customers bus) لا يتحدد فقط بتيارات التوافقيات الناتجة عن طريق هذا المستهلك ولكن أيضاً نتيجة الاحمال الاخرى المتصلة على نفس القضبان .

ويوضح جدول (٦-٢) القيمة المتوسطة وقيمتى ادنى وأقصى تيار التوافقيات (امبير Arms) ويلاحظ قيم الزوايا بين تيار وجهد التوافقية .

جدول (٦-٢) تيار التوافقيات (A rms)

أقصى قيمة	القيمة المتوسطة	ادنى قيمة	درجة التوافقية
٦٢.٠ ١.٠	٢٥.٠ ١.٥	٢.٠ ٢.٠	١
٨	٤	٠,٤	٢
٢٧ ١٢.٠	١٢ ١١.٠	-	٣
٢٨ ١٦.٠	١٧ ١٤.٠	١	٥
٦,١ ١٥.٠	٢,٩ ١٧.٠	-	٧
٦,٢٨	٦,١١	-	THD %

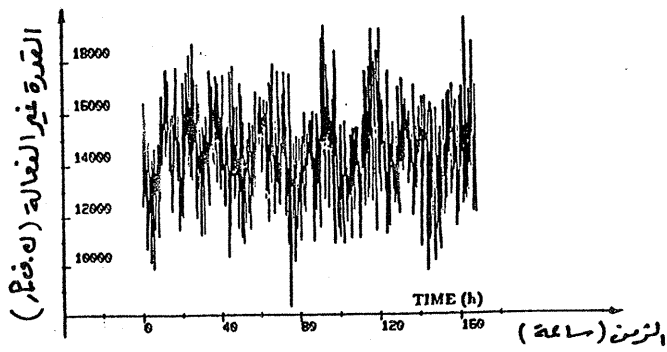
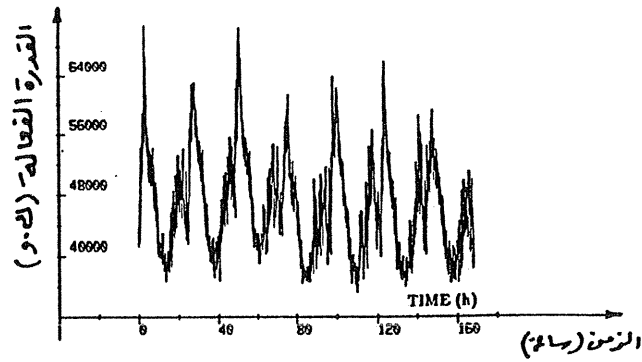
ويوضح شكل (٢١-٢) التيار المار بمسار التعادل مقاساً لمدة ١٦٠ ساعة والذي يحتوى على مركبات التوافقيات الثلاثية الفردية (triple) ، ونلاحظ ان الموجة تتكرر دورياً كل ٢٤ ساعة نتيجة استخدام الاضاءة بالفلورسنت .

٦ - مصابيح الفلورسنت (Fluorescent Lamps)

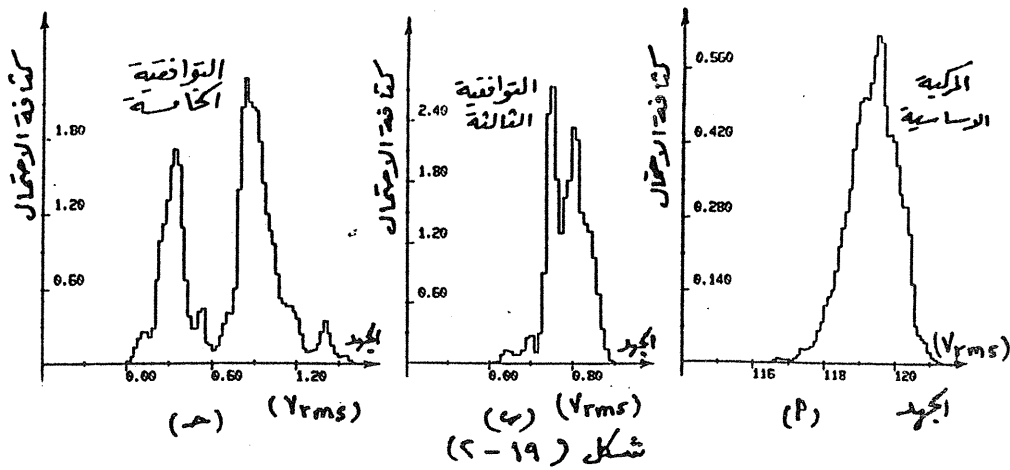
تتم الاضاءة بمصابيح التفريغ بواسطة الشحنات الكهربائية المتولدة فى الغاز أو فى البخار المخلخل ، وتخضع مصابيح التفريغ لخاصية غير خطية تؤدي إلى احتواء التيار على التوافقية الثالثة .

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٨١ -



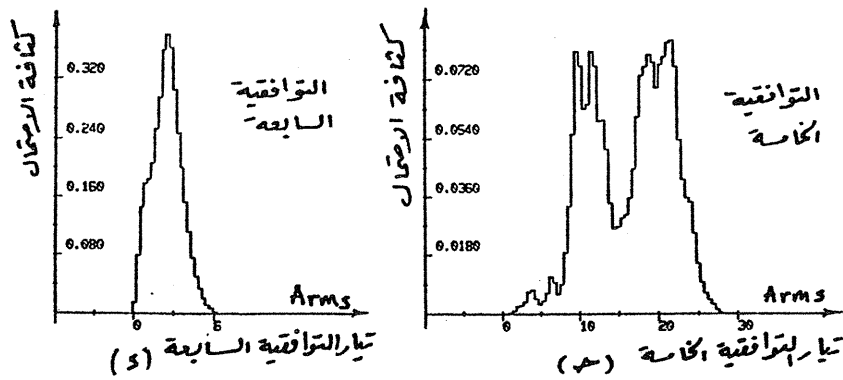
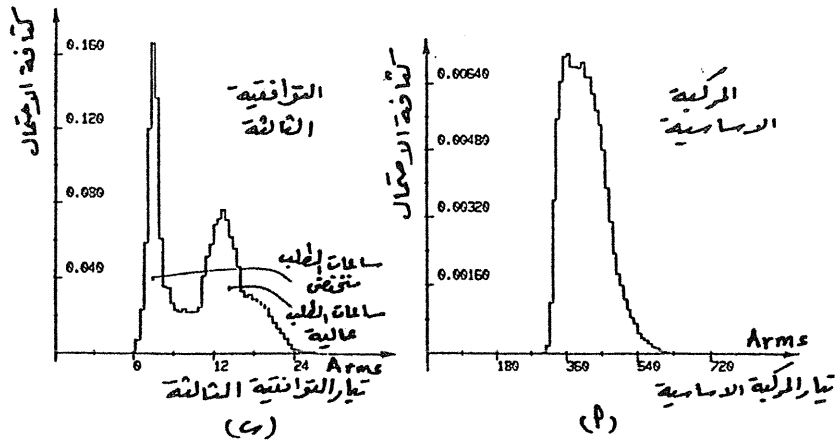
شكل (١٨ - ٢)



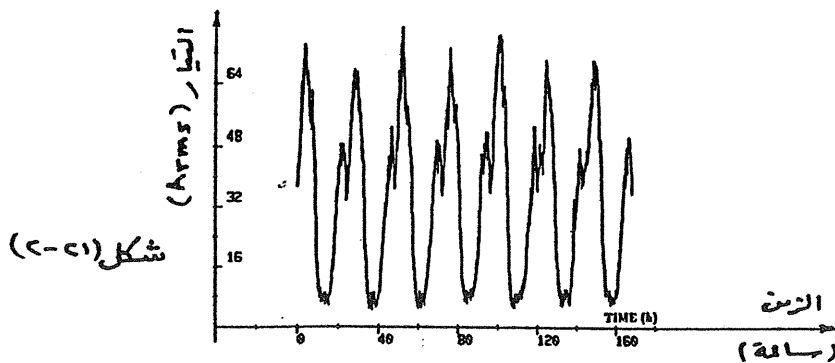
شكل (١٩ - ٢)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٨٢ -



شكل (٢٠-٢٠)



« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٨٣ -

فى شبكات التوزيع - ثلاثية الأوجه - أربعة أسلاك التى تغذى مصابيح التفريغ ، تظهر التوافقيات الثلاثية الفردية (*triplens harmonics*) فى مسار التعادل وتكون التوافقية الثالثة هى الغالبة .

ويوضح شكل (٢-٢٢) توصيل مصابيح فلورسنت - على الثلاثة أوجه لاجراء اختبارات التوافقيات ، وقد وجد الآتى :

- ان الجهد بين طرفى أنبوبة المصباح له خاصية غير خطية .

- يحتوى التيار المار بمسار التعادل على مركبة التوافقية الثالثة (يمكن أن يصل الى ٩٠٪ من قيمة التيار الاساسى) .

ولتحسين معامل القدرة للدائرة بشكل (٢-٢٢) تم توصيل ٣ مكثفات (*c*) وممانعة متغيرة (*L*) وقد تؤدي هذه الدائرة الى الاقتراب من حالة الرنين عند التوافقية الثالثة . ولقد تم تسجيل العلاقات الآتية ، كما فى شكل (٢-٢٣) :

- تيار التوافقية الثالثة كنسبة من التيار الاساسى المار بمسار التعادل فى حالة توصيل المفتاح *S* (المنحنى رقم ١) .

- تيار التوافقية الثالثة كنسبة من التيار الاساسى المار بمسار التعادل فى حالة فتح المفتاح *S* (المنحنى رقم ٢) .

- توزيع الجهد كنسبة مئوية (*Voltage distribution %*) فى حالة توصيل المفتاح *S* (المنحنى رقم ٣) .

- توزيع الجهد كنسبة مئوية فى حالة فتح المفتاح *S* (المنحنى رقم ٤) .

وقد سجلت هذه العلاقات باعتبار الاحداثى السينى (*abscissa*) هو جهد التوافقية الثالثة (عند تردد يساوى ١٥٠ هرتز) .

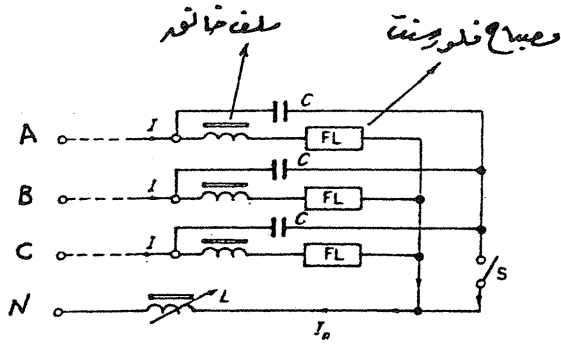
تم الاختبار لمبانى تحتوى على مجموعة مصابيح فلورسنت قدرتها ٩٠٠ ك.ف.أ عند الحمل الكلى للتشغيل والتى كانت أعلى من نقطة الرنين (*resonant*) .

وقد وجدت بعض قيم تيارات مسار التعادل عند نصف الحمل ، تتعدى قيم تيارات الاوجه ، وقد وجد أيضاً أن جهد التوزيع عند بعض لوحات التوزيع يرتفع بنسبة ٢٠ ٪ .

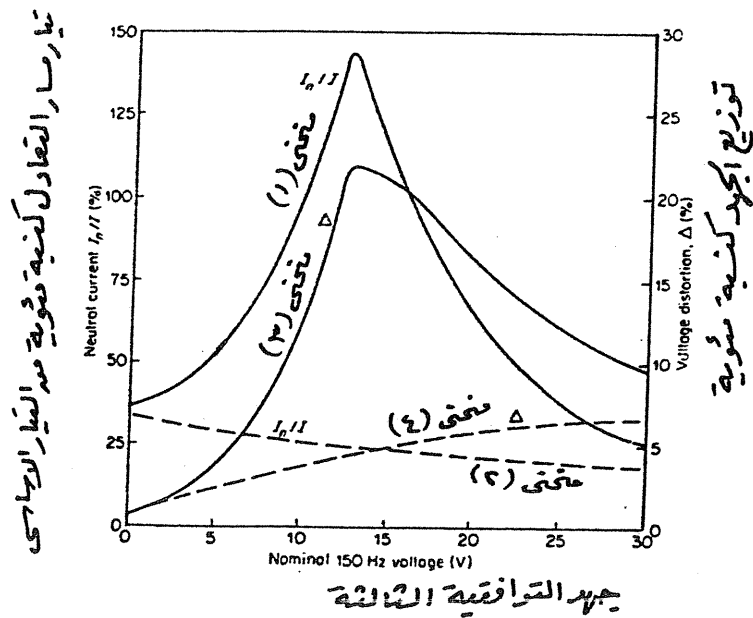
وللتغلب على حالة الرنين يفضل استخدام مصفوفة مكثفات (*capacitor bank*) عند لوحة التوزيع عن استخدام مكثفات موزعة على مصابيح الفلورسنت .

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٨٤ -



شكل (٢٢-٢٠)



شكل (٢٣-٢٠)

« التوافقية في الشبكات الكهربائية »

- ٨٥ -

٧ - وسائل النقل الكهربائي (Electric Traction)

توسعت استخدامات وسائل النقل الكهربائي (*electric traction*) في الثلاثين سنة الماضية توسعاً كبيراً جداً ومن المتوقع ان يزداد استخدامها بالوصول للقرن العشرين وتعمل قاطرة الجر بالسكك الحديدية باحد المصدرين التاليين :

أ - باستخدام التيار المستمر (*d.c*) من مصدر ثلاثي الاوجه من خلال الموحّدات .

ب - باستخدام مصدر احادي الوجه متردد (*a.c*) .

تحتاج وسائل النقل الكهربائي لتيار كبير متغير ، ويوضح شكل (٢٤-٢) العلاقة بين التيار والزمن ، ويلاحظ التغير الكبير الواضح في التيار .

وعادة تستعمل موحّدات باستخدام الديودات (*Diode rectifiers*) أو مبدلات باستخدام الثايرستور (*Thyristor converters*) لوحّدات قدرة وسائل النقل وذلك لتغذية محركات التيار المستمر (*DC motors*) . وحيث ان الديودات والثايرستورات تحدث توافقيات تؤدي الى تشوه مصدر التغذية الرئيسية للشبكة المغذية لوسائل النقل الكهربائي بالإضافة الى ان التغذية بمصدر احادي الوجه من شبكة ثلاثية الاوجه تؤدي الى عدم اتزان الجهد ، هذان العاملان (التوافقيات في التيار وعدم اتزان الجهد) يؤديان الى زيادة مركبات التناحلية السالبة للتيارات (*Negative - phase - sequence currents*) . وعادة تغذى وسائل النقل الكهربائي من مصدر ثنائي الوجه (*two phases*) لمصدر جهد عالي كالآتي :

أ - محولات موصلة بطريقة سكوت *Scott - connected Transformers*

تستخدم هذه الطريقة للحصول على مصدر ثنائي الوجه ، والتي يتم تغذيتها من مصدر ثلاثي الاوجه ، حيث يتم استخدام محولين احادي الوجه لهما نفس القدرة ومتصلين كما في شكل (٢٥-٢) أ ، ويوضح شكل (٢٥-٢) ب الرسم المرحلي (*Phasor diagram*) لهذه التوصيلة .

ب - محول "ليبيلنك" *Le Blanc-Transformer*

يستخدم محول ثلاثي الاوجه موصّل كما في شكل (٢٦-٢) أ للحصول على مصدر ثنائي الوجه ، وتكون العلاقة بين ملفات الجهد المنخفض كالتالي :

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٨٦ -

$$a_1 = c_1 = 0.577 p.u$$

$$a_2 = c_2 = b_1 = b_2 = 0.333 p.u$$

ويوضح شكل (٢٦-٢) ب الرسم الخطى لهذا التوصيلة .

يمكن الحصول على قيم ودرجات التوافقيات بالتيار بسهولة من منحني الحمل ويلاحظ عملياً أن جذر متوسط المربعات (*rms*) لتشوه جهد المصدر المغذى لوسائل النقل الكهربى يكون فى حدود ٢ - ٢,٥ ٪ . وحيث ان وسائل النقل تغذى من مصدر ثنائى الوجه فان التوافقيات الثلاثية الفردية (*Triple harmonics*) لا تغنى كما فى حالة الاحمال المتزنة ثلاثية الوجة .

ونتيجة الاحمال المتغيرة عند نقط التغذية المقسمة لتغذية وسائل النقل (أى نقط شبكة التوزيع الخاصة بوسائل النقل) ، فان عدم اتزان الاحمال الناتج يؤدى الى زيادة مركبة التتابعية السالبة للتيارات والتي بدورها تدور فى شبكة الجهد العالى . ومن إحدى الطرق الناجحة للحصول على اتزان الاحمال استخدام طريقة التوصيل الموضحة بشكل (٢٧-٢) ، حيث تغذى وسائل النقل الكهربى من مصدر ثنائى الوجه ، وتعرف توصيلة الدلتا المحتوية على المحاثة (*inductive*) والمكثفين بدائرة الموازن (*Balancer*) والتي يجب ان يراعى فيها الا توصل المحاثة على نفس الوجهين المغذين لوسائل النقل الكهربى .

٨ - السخانات التآثيرية *Induction heaters*

تستخدم السخانات الكهربائية بالتآثير فى كثير من الصناعات مثل التعدين وتشكيل وصهر المعادن - والتجفيف - والتكرير

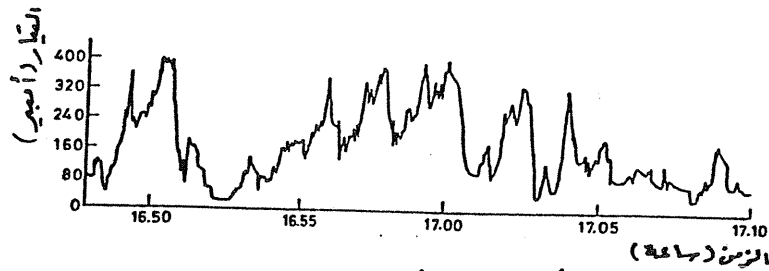
فمثلاً عند صهر المعادن بافران التسخين تنتج تيارات دائرية فى المعدن ، ونتيجة تبادل المجالات المغناطيسية الحادثة من التيار المار بملف التسخين والتيارات الدائرية فى المعدن الساخن تتولد التوافقيات وتختلف قيمتها حسب قدرة السخان .

٩ - اللحام الكهربى *Electric welding*

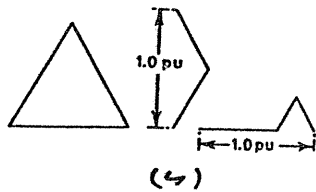
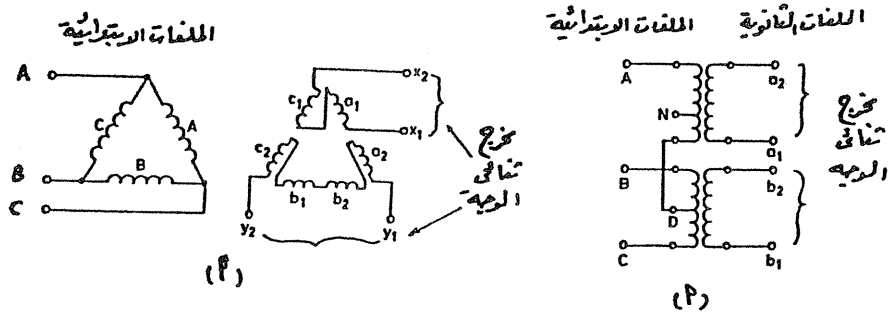
يوجد اللحام الكهربى بانواع مختلفة مثل اللحام بالقوس ، لحام المقاومة ويستخدم اللحام بالوروش الصغيرة وبالمصانع الكبيرة مثل مصانع السيارات ومصانع متن السفن

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

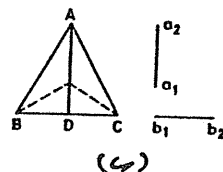
- ٨٧ -



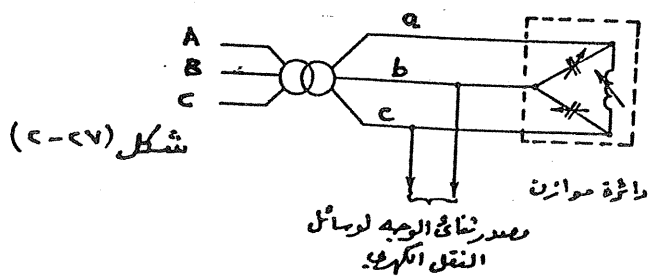
شكل (٤-٢) الزمن (ساعة)



شكل (٤-٦) (٤)



شكل (٤-٥) (٤)



شكل (٤-٧) (٤)

« التوافقية في الشبكات الكهربائية »

- ٨٨ -

ويحتاج اللحام الكهربى الى تيار مرتفع اما مستمرا او مترددا حسب نوع الماكينة ويكون التيار غير متزن ومحتوياً على توافقيات .

وفيما يلى نجد مثالا مأخوذاً من مجلة *IEEE, Vol.8, No.1, January 1993* والمثال عبارة عن مصنع أنابيب ملحومة (*Welded pipes plant*) حيث يستخدم ماكينات اللحام بالمقاومة (*Resistance welding machines*) ويعمل المصنع بنظام ثلاثة ورادى - على ان يقف خط الانتاج خلال العطلة الاسبوعية كما يحتوى المصنع على وحدة تعمل بالثيروزتورات (*Thyristorized*) وأخرى تعمل بمحركات تيار مستمر (*d.c motors*) ومحركات متزامنة (*Synchronous motors*) وقد تم تسجيل القدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة لمدة سبعة ايام لاحد الواجه بشكل (٢٨-٢) ووجد الآتى :

- أقصى قدرة فعالة ٤٨٠ ك.و

- القيمة المتوسطة للقدرة الفعالة ٢٠٠ ك.و.

- أقل قدرة فعالة ١٠٠ ك.و

- القيمة المتوسطة للقدرة غير الفعالة ٩٠ ك.ف.أ.ر.

تم تحليل موجة الجهد (فولت) وسجلت بجدول رقم (٧-٢)

جدول (٧-٢)

درجة التوافقية	ادنى قيمة	القيمة المتوسطة	أقصى قيمة
١	٢٦٧	٢٧٩	٣٢٠
٣	-	١,١	٢,٥
٥	-	١,٢	٥,٣
٧	-	٠,٥	٤,٧
٩	-	٠,٢	١,٦
THD %	-	٠,٦٣	٢,٤

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٨٩ -

وكذلك تم تحليل تيار الحمل (أمبير) خلال أيام التشغيل وفي أجازة نهاية الاسبوع
وسجلت بجداول رقم (٨-٢)

جدول (٨-٢)

درجة التوافقية	ايام التشغيل			اجازة نهاية الاسبوع		
	ادنى قيمة	القيمة المتوسطة	اقصى قيمة	ادنى قيمة	القيمة المتوسطة	اقصى قيمة
١	١٦٠	٢٨٠	٦٠٠	٢٥	٢٨	٤٠
٣	٢	٦	٢٣	١,٥	١,٨	٦
٥	٢	١٠	٤٥	٠,٢	٠,٣	١
٧	٣,٨	٥,٨	٢١	٠,١	٠,١٥	١
٩	٠,٧	٠,٩	١٣	٠,١	٠,١٥	٠,٤
TDH%	٣	٤,٧	٩,٤	٦,١	١٢	١٥,٥

ويلاحظ أن القيم الحادثة في أجازة نهاية الاسبوع ترجع الى الاضاعة بالفلورسنت .
كذلك يلاحظ ارتفاع قيمة تيار التوافقية الخامسة للتيار خلال أيام التشغيل .

١٠ - مبنى الاعمال المحاسبية Accounting Operations Building

تعتبر مباني مكاتب المحاسبة من مصادر توافقيات التيار العالية وخاصة التوافقيتين
الثالثة والخامسة وبأخذ المثال المذكور في مجلة IEEE No. 1. Jan. 1993 نجد أن
خصائص الاحمال كالآتي :

- أقصى قيمة للحمل : ٤٥٠ ك.ف.أ ، معامل القدرة = ٠,٩ (متأخراً)

- ادنى قيمة للحمل : ٢٠٠ ك.ف.أ ، معامل القدرة = ٠,٩٥ (متأخراً)

- وردية واحدة ذات احمال خفيفة في عطلة الاسبوع

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٩٠ -

وقد تم قياس توافقيات الجهد ووجدت كما فى جدول رقم (٢-٩)

وتكون طبيعة أحمال هذه المباني عبارة عن معدات مكتبية إلكترونية (أى تحتوى على إلكترونيات القوى) (*Electronic officer equipment*) والتي تكون مصدراً كبيراً لتوافقيات التيار ، ويوضح شكل (٢-٢٩) تيار التوافقيات مسجلاً بطريقة الرسم البيانى النسيجي ، كما يوضح جدول (٢-١٠) حدود تيار التوافقيات للمبنى ويلاحظ من جدول (٢-١٠) أن قيمة تيار التوافقية الثالثة ٢٨ ، بينما قيمة تيار التوافقية الخامسة ٤٥ وهما أكبر قيمتين لتيارات التوافقيات

جدول (٢-٩) مستويات توافقيات الجهد (V_{rms})

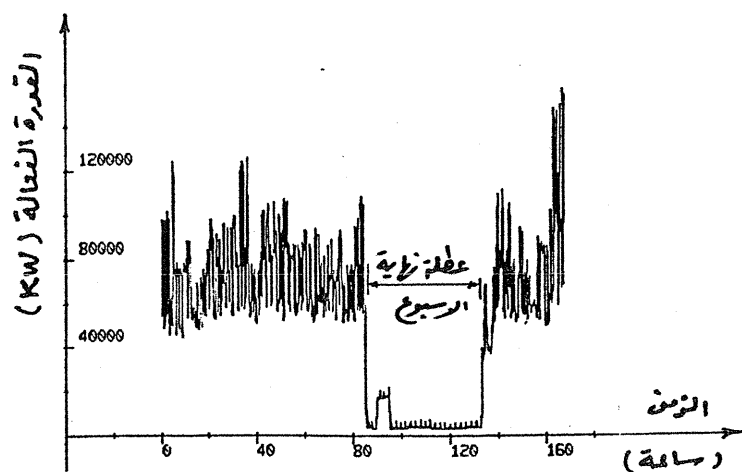
درجة التوافقية	أدنى قيمة	القيمة المتوسطة	أقصى قيمة
١	٢٦٨	٢٧٦,٥	٢٨٥
٣	٠,١	٠,٨٥	٣,٣
٥	٠,١	٣,٨	٦
٧	٠,٢	١,٧	٣,٨
٩	-	٠,٦	١,٥
THD %	٠,٢٢	١,٥٦	٢,٨٤

جدول (٢-١٠) تيار التوافقيات (A_{rms})

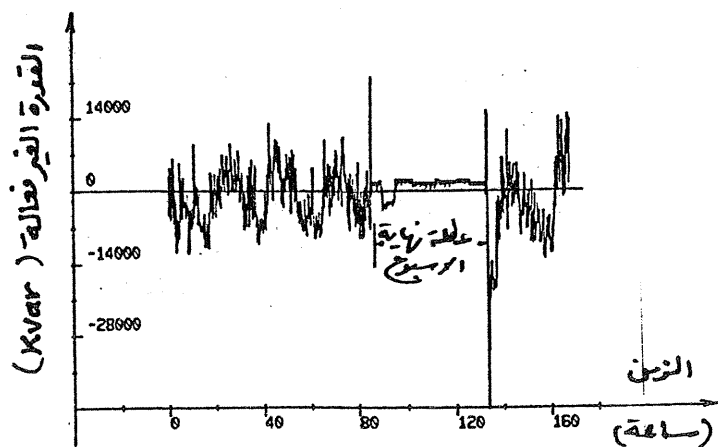
درجة التوافقية	أدنى قيمة	القيمة المتوسطة	أقصى قيمة
١	٢٠٥	٣٠٠	٦٠٠
٣	١٣	٢٣	٣٨
٥	٢٣	٣٩	٤٥
٧	٤	٧,٢	٩,٥
٩	٠,١	١,٢	٣,٦
١١	١,٨	٤	٦,٥
THD %	١٧,٥	١٥,٥	١٠,١

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٩١ -



(أ)

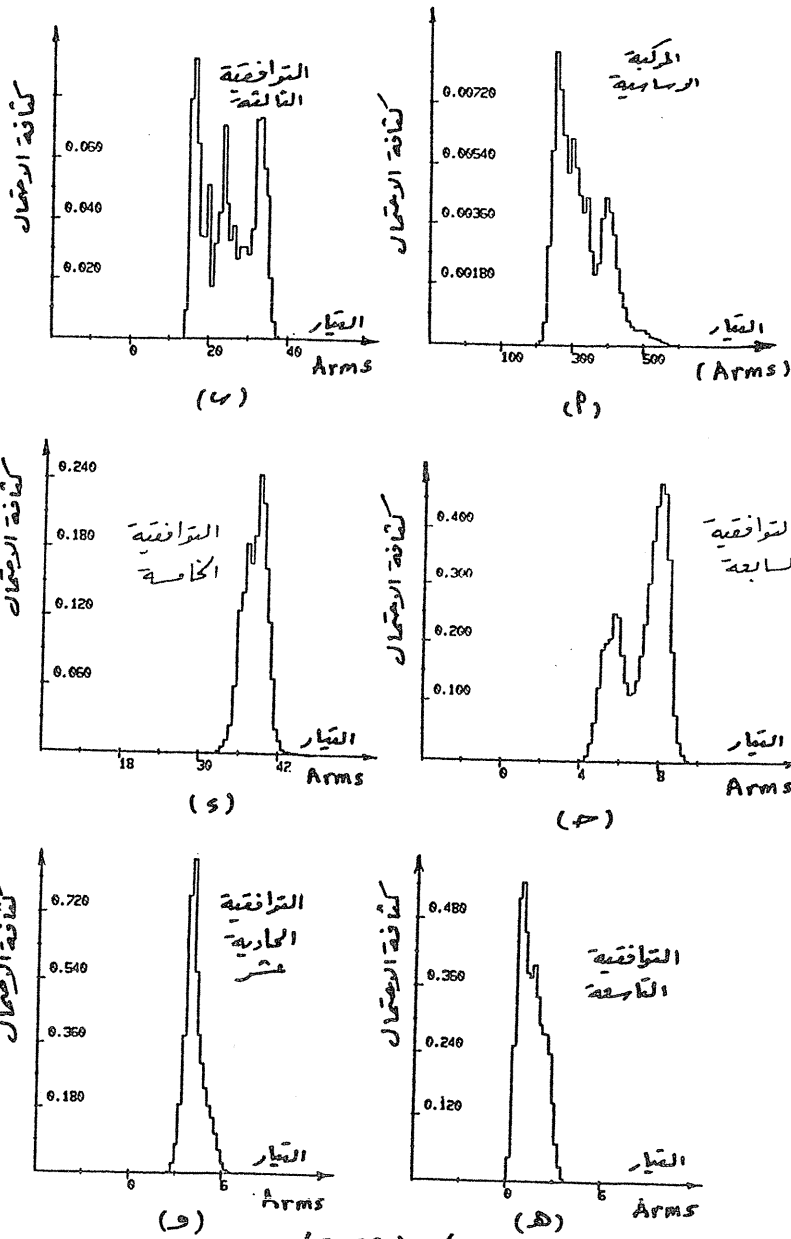


(ب)

شكل (٢٨-٢٩)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٩٢ -



شكل (٢٩-٢٠)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٩٣ -

١١ - مبدلات القدرة الاستاتيكية (The static power Convertors)

فى هذا الجزء سنتعرض لشرح تيارات وجهود التوافقيات الناتجة من المبدلات (convertors) ، والتي من خلالها يتم تحويل التيار المتردد (a.c) الى تيار مستمر (d.c) ومن العاكسات (invertors) والتي تحول التيار المستمر (d.c) الى تيار متردد (a.c) وذلك باستخدام الموحدات (rectifiers) والثيريزتورات (Thyristors) .

ونحتاج فى العادة إلى استخدام المبدلات والعاكسات ذات التيارات العالية للحصول على السرعات المتغيرة بالمحركات (a.c) ، (d.c) والتي لها استخدامات كثيرة بالصناعة وبوسائل النقل الكهربى وبمعنى آخر ان المحركات ذات اجهزة التحكم الالكترونية تكون مصدراً للتوافقيات وتشوه الموجات .

ويوضح شكل (٢-٣٠) أ تمثيلاً مبسطاً للتحكم فى سرعة محرك (d.c) بينما يوضح شكل (٢-٣٠) ب التحكم فى سرعة محرك (a.c) من خلال مبدل (a.c/d.c) ومرشح وعاكس (d.c/a.c) .

ويوضح شكل (٢-٣١) مثلاً آخر للتحكم فى محركات تيار مستمر لتشغيل الدرافيل (d.c mill motors) باستخدام الثيريزتورات ، حيث يكون مخرجها تيار مستمر يمكن التحكم فيه عن طريق اشارة الاطلاق (Triggering) لبوابة الثيريزتور .

ويعد استخدام المبدلات المحكومة (Controlled) وغير المحكومة (non-controlled) فى مصانع التحليل بالكهرباء (electrolysis plants) من مصادر التوافقيات ايضاً ، كذلك المبدلات المحكومة المستخدمة فى المرشحات الكهروستاتيكية .

ويوضح شكل (٢-٣٢) موجة تيار احد انواع المبدلات ، ويلاحظ أنها غنية بالتشوهات .

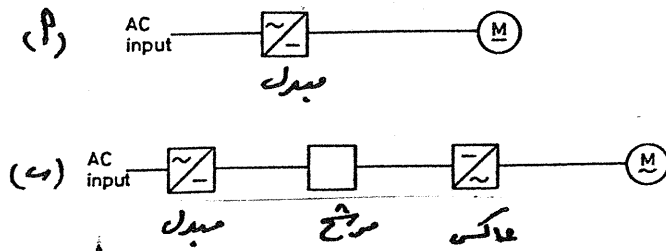
ولقد وجد ان المصادر الرئيسية حالياً لتيارات التوافقيات هى المبدلات والعاكسات . وقد يلزم معرفة بعض البيانات الاساسية لامكانية اشتقاق تيارات التوافقيات الناتجة من مبدلات القدرة الاستاتيكية . ومن هذه البيانات :

١ - العناصر المكونة لدائرة المبدل .

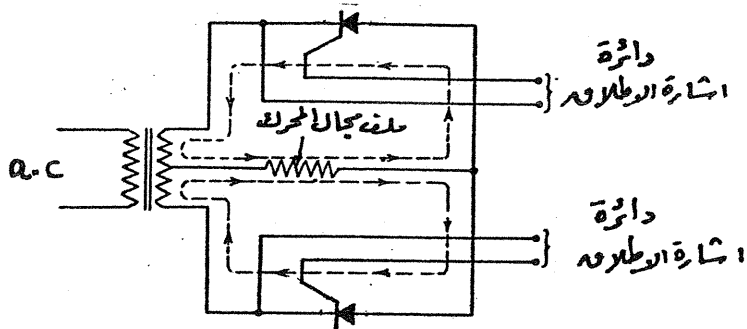
٢ - موجات الجهد المتردد (a.c) لدخل المبدل

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

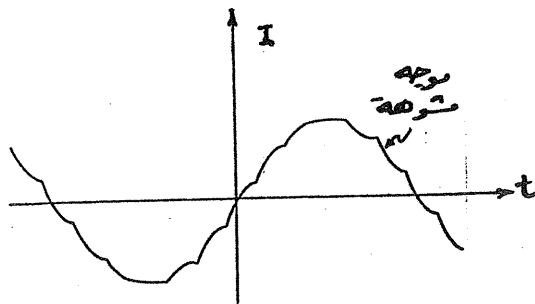
- ٩٤ -



شكل (٣٠-٩)



شكل (٣١-٩)

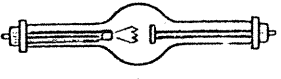
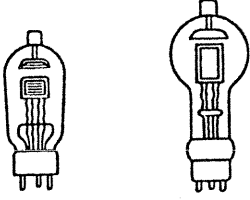
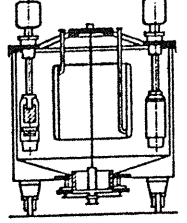
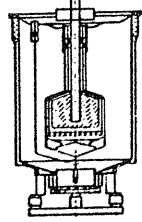
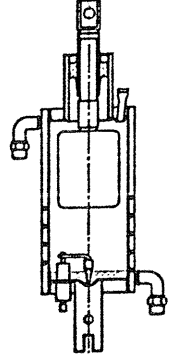


شكل (٣٢-٩)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

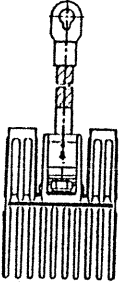
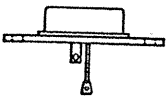
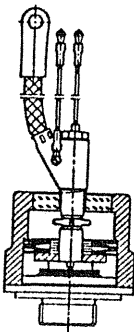
- ٩٥ -

- ٣ - نوع التحكم المستخدم .
 - ٤ - معاوقة النظام (*a.c system impedance*)
 - ٥ - عناصر دائرة التيار المستمر (*d.c circuit parameters*) .
- تستخدم المبدلات الاستاتيكية والموحدات لتحويل التيار المتردد (*a.c*) الى تيار مستمر (*d.c*) . ويحتوى جدول (١١-٢) على انواع مختلفة من المبدلات صناعة المانية .
- وتكون العناصر المكونة للمبدلات والموحدات هي :
- الديودات (*Diodes*)
 - الثايرستورات (*Thyristors*)
 - موحدات القوس الزئبقى (*Mercury - arc rectifiers*)
 - مبدلات دوارة (*Rotary Convertors*)
 - مجموعة مولد / محرك (*Motor - generator sets*) .

	مبدل ذو تفريغ عالي محمي على كاثود تسخين بشبكة أوبرون للجهد حتى ١٠٠ ك.ف. وأكثر والتيار حتى ١ أمبير.
	مبدل زيتي مغنطوني من الزماعات أو المدن محمي على زيت بشبكة أوبرون بشبكة. المبدل للجهد حتى ١٠ ك.ف. والتيار أقل من ٢٠ أمبير.
	مبدل زيتي مغنطوني / خزان كبير في الأنواع الكبيرة يتاج إلى نقطة تفريغ مياه بترسيد - محمي على ١٢/١٨/٢٤ أنود وشبكات تحكم. التيار : ٣٠٠ : ٨٠٠ الجهد : ٥٠ : ٣٠٠ ك.ف.
	مبدل زيتي مغنطوني / إشارة مستمرة بهد نقطة تفريغ ، التبريد بواسطة الهواء أو المياه ، محمي على شبكة تحكم. التيار : ٢٠ - ١٠٠٠ أمبير الجهد : ٥٠ - ٢٠٠ ك.ف.
	مبدل زيتي مغنطوني بقطب إشعال بدون نقطة تفريغ - التبريد بواسطة الهواء أو المياه - الأداة غير مستمرة ومحمي على قطب إشعال يعمل على فترات. للتيارات حتى ١٠٠٠ أمبير للجهد حتى ٢٠٠ ك.ف.

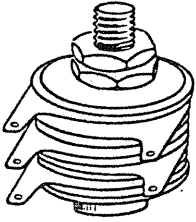
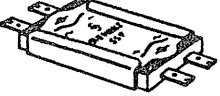
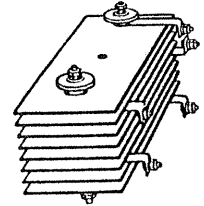
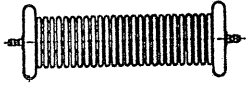
- ٩٧ -

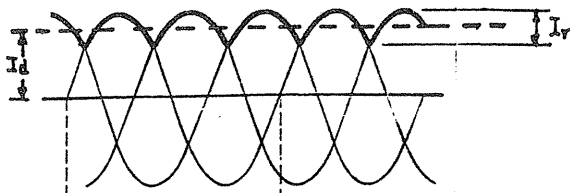
تابع جدول (١١-٢)

	ديود توحيد يصمم على شكل خلية معلقة أو قرص وتكون درجة حرارة الترميل للبحر مقيوم حوالي ٦٥° والسيلكون حتى ٣٥٠٠. وتكون الجهد العكسي لبرود الترميد السيلكون في ذو التيار القتن حتى مئات الأمبيرات يساوي ٢ كـ. ف.
	الثايرستور السيلكون أو الجوهنيوم
	الثيريزتور تكون درجة حرارة الاتصال حتى ٣٦٠° الجهد العكسي يساوي ١٥٠٠ فولت عند تيار مئات الأمبير -

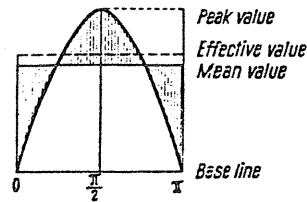
- ٩٨ -

تابع جدول (١١-٢)

	موحد على شكل ألواح أو أكسيد نحاس . طبقات ذات مقاومة عالية موضوعة بين ألواح النحاس (القطب الموجب) والألواح أو أكسيد النحاس (القطب السالب) .
	موحد سلتنيوم (قدرة صغيرة) طبقة رقيقة من السلتنيوم على لوح معدني (القطب السالب) .
	موحد ألواح موصولة يمكن أن تصل مساحته النوعية إلى ١٠٠ سم^٢ بعض المرات ١٠ إلى ١٠٠ عند الجهد المنخفض . يحتاج إلى مياه مبردة للتبريد أو يغير في الزيت .
	موحد جهد عالي ذو ألواح موصولة معلقة . يحتاج إلى صفاء أو زيت للتبريد .



(٤)



(٩)

شكل (٣٣-٢)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٩٩ -

من التعريفات المستخدمة فى الوحدات :

١ - عامل الشكل (Form Factor)

هو النسبة بين قيمة جذر متوسط المربعات (rms) الى القيمة المتوسطة (average) ، اى ان :

$$\text{Form Factor} = \frac{\text{rms value}}{\text{average value}} = \frac{\text{effective value}}{\text{mean value}}$$

يساوى عامل الشكل ١,١١ فى حالة الموجة الجيبية .

٢ - عامل التموج (Ripple Factor)

هو النسبة بين قيمة جذر متوسط المربعات (rms) للمركبة المترددة (a.c) للموجة الى قيمة التيار المستمر المتوسطة للموجة

$$\begin{aligned} \text{Ripple Factor} &= \frac{\text{rms value of the a.c component of the wave}}{\text{average d.c value of the wave}} \\ &= \frac{I_r}{I_d} \end{aligned}$$

ويكون التيار الذى له عامل تموج منخفض اقرب الى التيار المستمر من التيار الذى له عامل تموج عالى .

٣ - عامل الذروة للموحد (Redtifier Peak Factor)

هو النسبة بين قيمة الذروة الى القيمة المتوسطة ، اى ان

$$\text{rectifier Peak factor} = \frac{\text{Peak value}}{\text{mean value}}$$

ويوضح شكل (٢-٣٣) التعبيرات المستخدمة فى هذه التعريفات .

ويوضح شكل (٢-٣٤) نوعين من الوحدات ، موحد سليليومى (Selenium rectifier) وموحد ذو الواح مرصوصة (rectifier stack) ويتم فيه توصيل الالواح على التوازي او

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٠٠ -

على التوالى او توالى وتوازى حسب قيمة القدرة والجهد المطلوبين للموحد .

ويوضح شكل (٢-٣٥) ديود سيليكونى (*Silicon Diode*) يستعمل كديود قدرة (بينما يستخدم الديود الجرمانيوم لقدرات حتى عدد قليل من الوات فقط) .
وفيما يلى بعض دوائر الموحدات المستخدمة .

أ - دائرة الموجه الكاملة باستخدام محول ذى طرف اوسط

Full - wave centre - tap circuit

يوضح شكل (٢-٣٦) مكونات الدائرة وموجتى جهد وتيار المخرج ويكون عامل التمرج لهذه الدائرة يساوى ٤٨٪ بينما عامل الشكل يساوى ١,١٥ .

ب - دائرة قنطرة توحيد للموجه الكاملة *Full-wave Bridge circuit*

يوضح شكل (٢-٣٧) مكونات هذه الدائرة والتي يكون لها نفس عامل التمرج وعامل الشكل وموجتى جهد وتيار المخرج كما فى الحالة السابقة .

ج - دائرة توحيد ثلاثية الاوجه باستخدام محول دلتا / نجمة .

يوضح شكل (٢-٣٨) دائرة التوحيد - ثلاثية الاوجه - وموجة تيار المخرج ، وتيار الحمل ، ويكون لهذه الدائرة عامل تمرج يساوى ١٨٪ بينما عامل الشكل يساوى ٠,٨٦ .

د - دائرة توحيد ثلاثية الاوجه باستخدام محول دلتا / نجمة وعدد ٦ ديودات :

يوضح شكل (٢-٣٩) مكونات الدائرة وشكل موجة جهد المخرج (d.c) .

ويساوى جهد المخرج (d.c) ١,٣٥ مرة من قيمة جهد المدخل (a.c) (*rms value*)

ولهذه الحالة نجد ان عامل التمرج يساوى ٤٪ وعامل الشكل يساوى ٠,٧٤ . ويلاحظ فى شكل (٢-٣٩) ب ان موجة المخرج تحتوى على ٦ قيم ذروة لكل دورة من موجة المدخل ويمكن ان تكون الملفات الثانوية للمحول متصلة دلتا او نجمة .

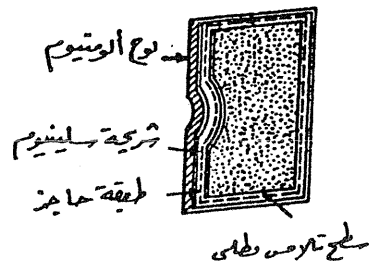
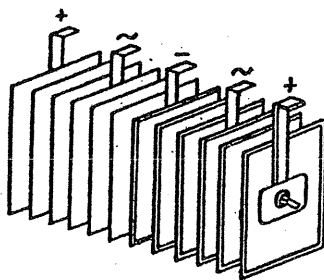
اذا كان جهد المدخل مناسب ، فيمكن الاستغناء عن المحول .

هـ - دائرة توحيد - ثلاثية الاوجه - باستخدام توصيلتين نجمة

يوضح شكل (٢-٤٠) طريقة توصيل الدائرة ونحصل منها على موجة مخرج كما فى الحالة السابقة . ويكون لها نفس عامل التمرج ايضاً وعامل الشكل .

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

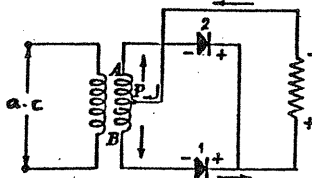
- ١٠١ -



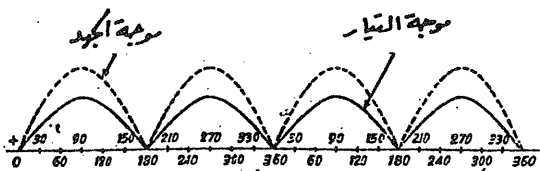
(ب) موحد ألواح مرصوصة

(پ) موحد سليكوني

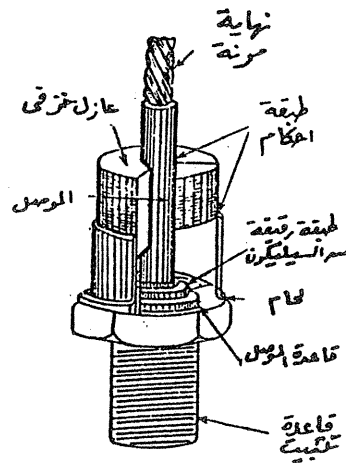
شكل (٣٤-٢)



(پ)



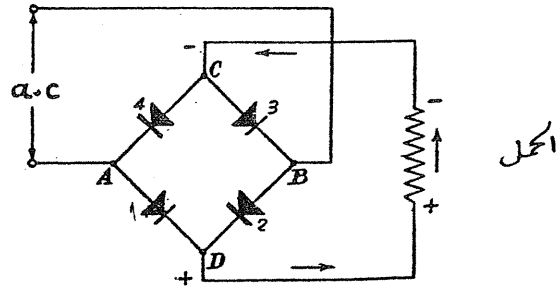
(ب) شكل (٣٦-٢)



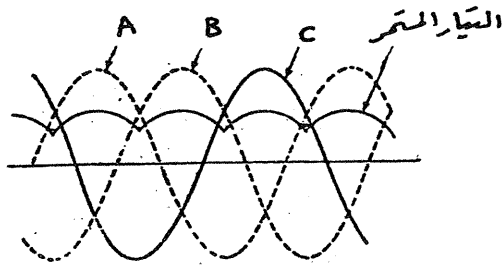
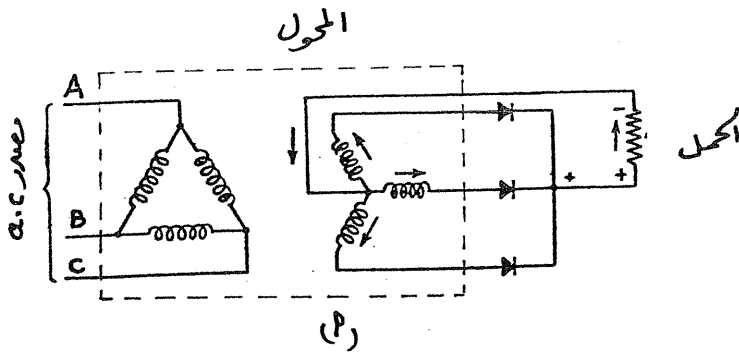
شكل (٣٥-٢)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١٠٢ -



شكل (٣٧-٢)

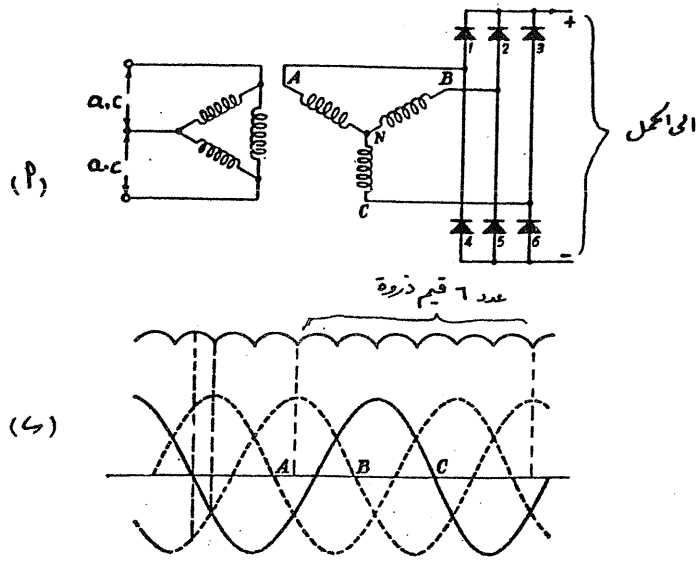


(٣)

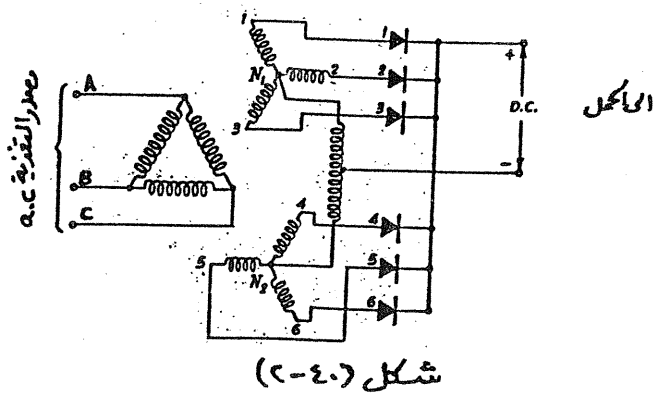
شكل (٣٨-٢)

« التوافقية في الشبكات الكهربائية »

- ١.٣ -



شكل (٣٩-٢)



« التوافقية في الشبكات الكهربائية »

- ١٠٤ -

لجميع الاشكال السابقة يمكن كتابة معادلة العلاقة بين جهد المخرج ($d.c$) وجهد المدخل ($a.c$) كالآتي

$$E = KV + ND$$

حيث

$$E = \text{جهد المدخل المتردد (rms)}$$

$$K = \text{عامل الشكل}$$

$$V = \text{جهد المخرج (d.c)}$$

$$N = \text{عدد الخلايا (cells)}$$

$$D = \text{هبوط الجهد (voltage drop) لكل خلية}$$

ولدوائر قنطرة التوحيد ثلاثية الاوجه - واحادية الاوجه تستخدم مجموعتين من الخلايا معاً لذا يمكن اهمال الهبوط في الجهد وتصيح المعادلة :

$$E = KV$$

$$\text{or } V = \frac{E}{K}$$

اي ان جهد المخرج $d.c$ يساوى جهد المدخل (rms) مقسوماً على عامل الشكل .

مؤحدات القوس الزئبقية *Mercury arc rectifiers*

يتكون الموحد ببساطة من خزان زجاجى أو معدنى مفرغ بأسفله قنينة معزولة مملوءة بالزئبق ، والذي يمثل كاثود ($Cathode$) الموحد ، اما الانود ($Anode$) فعبارة عن قطب من الحديد أو الجرافيت ويوضع على مسافة من القنينة ، ويوضح شكل (٤١-٢) تمثيلاً مبسطاً لمكونات هذا الموحد وطريقة تغذيته .

عند التشغيل ، تشع الالكترونات من الزئبق ، تمر من الكاثود الى الانود ، وذلك اذا كان الانود موجباً بالنسبة للكاثود. ويؤدى هذا الى مرور التيار من الكاثود الى الانود خلال الدائرة الخارجية . ولا يمر التيار اذا كان الانود سالباً بالنسبة للكاثود ، كما يوجد حاجز ($baffle$) بين الانود والكاثود للتحكم فى عملية التأين ومنع تآثر الانود بأبخرة

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٠٥ -

الزئبق..

ويوضح شكل (٢-٤٢) نوع آخر من الموحّدات الزئبقية وهو موحّد القوس الزئبقى من النوع محكم الغلق بلاضخ (*Pumpless sealed mercury arc rectifier*) الثيريزتور "الموحّد السيليكونى المحكوم"

Thyristor (Silicon controlled rectifier)

يتكون عادة من أربعة وصلات من المواد شبه الموصلة اما *pnpn* أو *npnp* وتحتوى على ثلاثة اطراف هى الانود والكاثود والبوابة ، كما فى شكل (٢-٤٢) أ بينما يوضح شكل (٢-٤٣) ب العلاقة بين التيار والجهد للثيريزتور .

ويكون الثيريزتور فى حالة توصيل (*On-state*) عند تسليط جهد تشغيل عالى بين الانود والكاثود (يكون الانود موجباً بالنسبة للكاثود) ، ويطلق على هذا الجهد بجهد الكسر *Break over voltage* او جهد الاطلاق *Triggering voltage* او جهد الاشعال *Firing* بالاضافة الى مرور تيار بوابة كبير ليقال جهد الكسر الامامى ، وهو ما يمثله الربع الاول فى شكل (٢-٤٣) ب

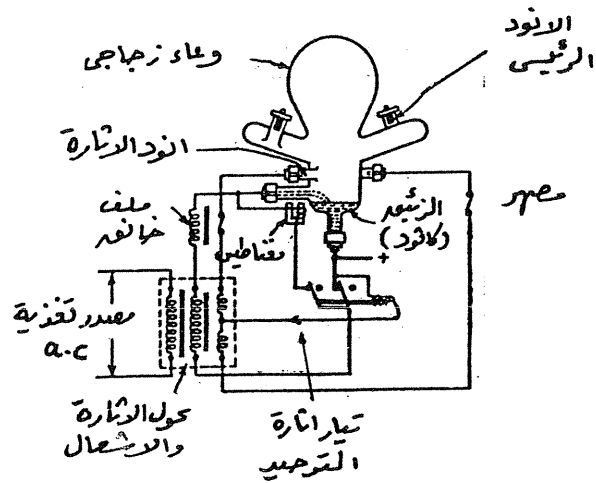
وعندما نحتاج الى فعل الثيريزتور فيجب عكس اتجاه تيار وجهد الانود حتى نصل الى قيمة الصفر مرة أخرى ويتم ذلك عن طريق تخفيض جهد الانود الى قيمة اقل من جهد الحد الادنى وتسليط تيار عكسى على البوابة .

وبذلك يتم التحكم فى نقطة جهد الكسر للثيريزتور عن طريق تيار البوابة . كما يعمل الثيريزتور كمفتاح (*switch*) عن طريق التحكم فى تيار البوابة . ففي دوائر التيار المتردد (*a.c*) يتغير وضع حالة الثيريزتور ألياً الى الفصل (*off*) كل نصف دورة عندما ينخفض الجهد الى الصفر .

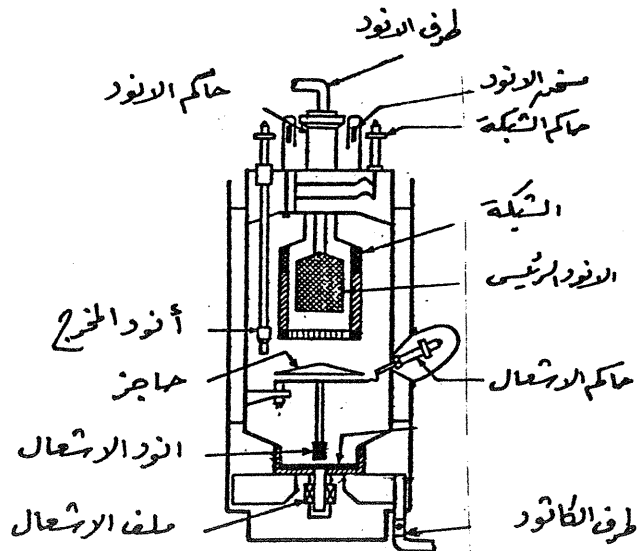
ويمكن التحكم فى مخرج الثيريزتور باستخدام التحكم فى الزاوية (*phase control*) او التحكم فى توصيل الثيريزتور (*Control of conduction*) ، كما فى شكل (٢-٤٤) ويتم التحكم فى النقطة على الدورة التى يبدأ عندها توصيل الثيريزتور ، بأختيار اشارة الاطلاق (او الاشعال) عند زمن ملائم ويكون المخرج جزء من نصف الدورة فقط . كما نرى انه اذا كانت اشارة مدخل البوابة عند زاوية تساوى أو اقل من 90° فان موجه المخرج تحتوى على قيمة الذروة (كما فى شكل (٢-٤٤) ب) وعادة تستخدم دائرة مكونة من ترانزستور ومكثف للحصول على اشارة الاطلاق للثيريزتور وتعرف هذه الدائرة بدائرة الاطلاق (*Trigger circuit*) .

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٠٦ -



شكل (٢١-٢)



شكل (٢٢-٢)

« التوافق في الشبكات الكهربائية »

- ١٠٧ -

ويفضل استخدام الثيريزتورات على الديودات فى دوائر المبدلات وذلك لقدرة الاولى على تنظيم كامل للدائرة باعتبار ان الثيريزتور ديود يتم التحكم فيه عن طريق اشارة الاطلاق .

بالرجوع الى شكل (٢-٣٨) أ فانه يمكن رسم موجتى المدخل للتيار والجهد ، للحالة المثالية للديودات المستخدمة ، كما فى شكل (٢-٤٥) أ ويلاحظ ان موجة المخرج تحتوى على ثلاثة قيم ذروة لكل دورة من موجة المدخل . بينما يوضح شكل (٢-٤٥) ب تيارات المخرج i_0, i_1, i_2, i_3 ، ويلاحظ ان التيار i_1 يظهر كنبضة مخرج نتيجة دورة كاملة للوجه A بينما يظهر التيار i_2 كنبضة خلال دورة كاملة للوجه B ، والتيار i_3 كنبضة خلال دورة كاملة للوجه C ومن هنا جاءت تسمية هذه الدائرة بدائرة موحد ذات النبض الثلاثى (3- pulse rectifier circuit) وعند استخدام عدد ٦ موحدات ، كما فى شكل (٢-٣٩) ، (٢-٤٠) فان الدائرة تعرف بدائرة موحد ذات ٦ نبضات وتفضل هذه الدائرة على الاولى ذات النبض الثلاثى حيث يكون المخرج اكثر قرباً من التيار المستمر، ومن الدوائر ذات الخصائص العالية والتي تعطى مخرج تيار مستمر (d.c) نجد الدائرة الموضحة فى شكل (٢-٤٦) والتي تعرف بدائرة النبض الثنائى عشر (Twelve - pulse circuit) ، ويستخدم لهذه الدائرة محول يحتوى على ملفين ثانويين احدهما موصل دلتا والآخر موصل نجمة.

وعلى العموم تكون التوافقيات الناتجة من موحد مثالى كالاتى .

$$n = kp \pm 1$$

حيث :

$$n = \text{عدد التوافقيات}$$

$$k = \text{رقم من ١ الى } \infty$$

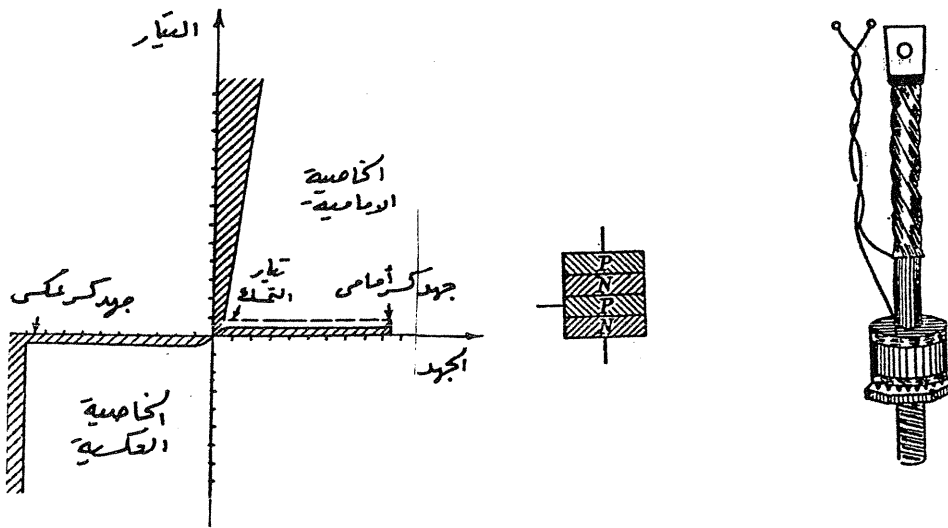
$$p = \text{عدد النبضات}$$

وعلى ذلك فان دائرة الموحد ذات النبض الثلاثى تنتج جميع التوافقيات ماعد التوافقيات الثلاثية الفردية (Triplens) .

فى الدائرة ذات ٦ نبضات ، نجد ان التوافقيات الزوجية (even) والثلاثية الفردية (triplens) لاتظهر ، وتنتج التوافقيات الخامسة ، السابعة ، الحادية عشر ، الثالثة عشر

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

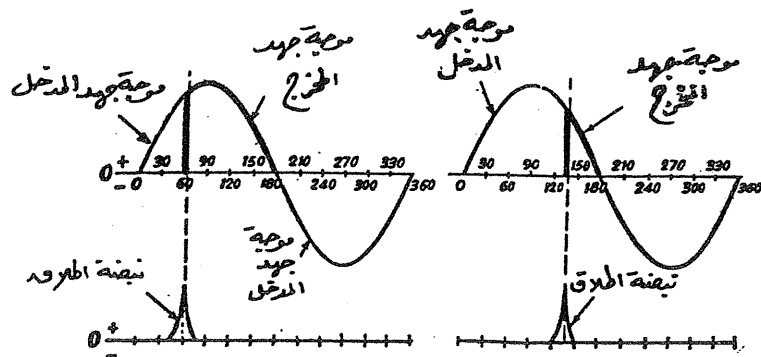
- ١٠٨ -



(P)

(C)

شكل (٢٣-٢)



(C)

(P)

شكل (٢٤-٢)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١٠٩ -

، السابعة عشر ، بينما في الدائرة ذات النبض الثنائي عشر فإن التوافقيات التالية هي التي تظهر فقط: الحادية عشر ، الثالثة عشر ، الثالثة والعشرون ...
ومن ذلك نجد أنه كلما زادت عدد النبضات كلما قل ظهور التوافقيات ذات الدرجات المنخفضة .

وبناء عليه يفضل استخدام دوائر ٦ نبضات أو ١٢ نبضه في دوائر التحكم ذات الاحمال العالية ، لاحظ اشكال موجات المخرج بشكل (٢-٤٧) واعتمادها على عدد النبضات وبالإرجوع الى شكل (٢-٤٥) نلاحظ ان تيارات النبضات تكون على شكل مستطيل ، وعادة تكون قريبة من الخط المستقيم نتيجة محاث التسريب (*leakage inductance*) .

وباستخدام تحليل "فورير" للموجة المربعة (أو المستطيلة) نحصل على العلاقة

$$\frac{I_n}{I_1} = \frac{I}{n}$$

حيث

$$I_n = \text{تيار التوافقية } n$$

$$I_1 = \text{تيار المركبة الاساسية}$$

ومن المعادلة السابقة نجد ان تيار التوافقية يتناسب عكسياً مع درجة التوافقية ، بمعنى انه كلما زادت عدد النبضات كلما انخفضت قيمة تيارات التوافقيات .

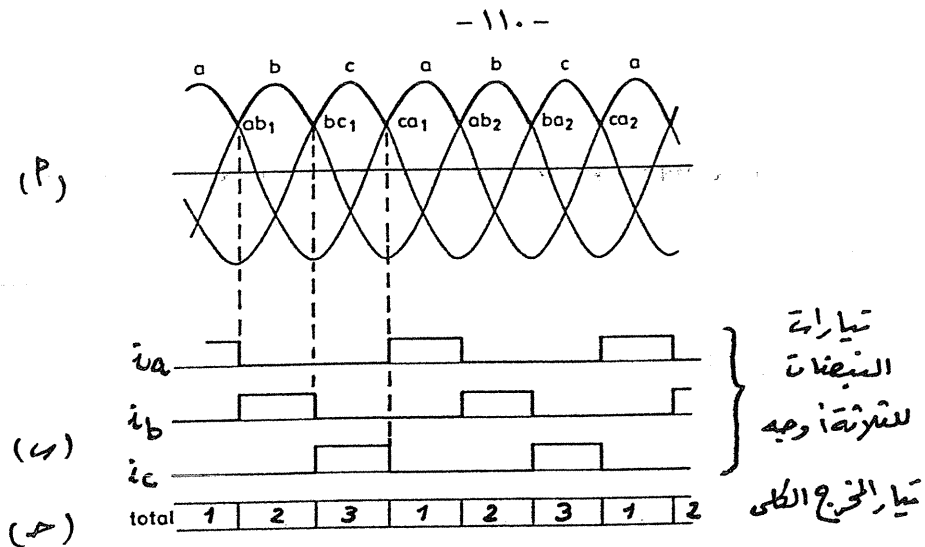
كما تخضع التيريزوترات لنفس العلاقة السابقة ، بالإضافة الى ظهور توافقيات اخرى نتيجة زوايا التأخير (*delay angles*) ، وسيوضح ذلك فيما بعد وقد أصبح شائعاً استخدام التيريزوترات . لذا سنتعرض لها بإيضاح .

يوجد ثلاثة انواع من الموحداث والعاكسات التي يمكن التحكم فيها عن طريق زاوية الوجه *phase angle controlled rectifier invertors* وتصف تبعاً لقدرتها كالاتى :

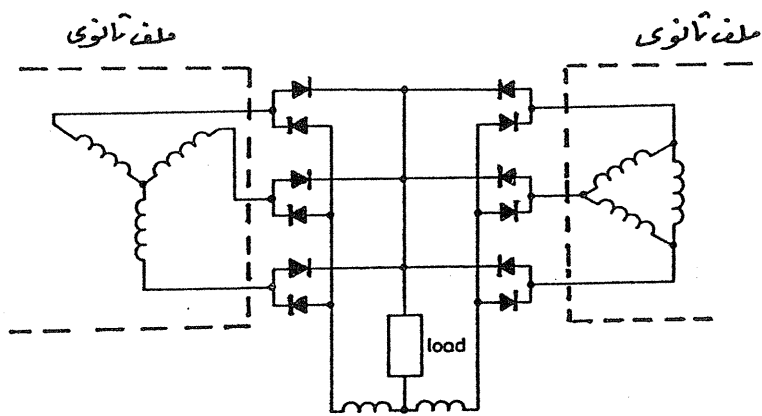
مبدلات ذات قدرات كبيرة .

مثل المستخدمة في صناعة اختزال المعادن (*metal reduction*) ، وكذلك في نقل القدرة باستخدام جهود التيار المستمر العالية (*High voltage d.c transmission*) .

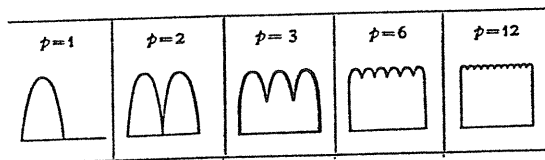
« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »



شكل (٤٥-٢)



شكل (٤٦-٢)



شكل (٤٦-٢)
« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١١١ -

- مبدلات ذات قدرات متوسطة

مثل المستخدمة فى صناعة اجهزة التحكم فى المحركات وكذلك فى تطبيقات وسائل النقل باستخدام الكهرباء .

- مبدلات ذات قدرات صغيرة احادية الوجه

مثل المستخدمة فى التلفزيون وشواحن البطاريات .

١ - المبدلات ذات القدرات الكبيرة *Large power convertors*

وهذه تكون قدرتها بالميجاوات (megawatts) ولها ممانعة ذات قيمة اكبر فى جانب (d.c) عنها فى جانب (a.c) للمبدل ويكون المبدل كمصدر لتوافقيات الجهد فى جانب (d.c) للمبدل ولتوافقيات التيار فى جانب (a.c) للمبدل . واذا كان مصدر التغذية للمبدل متماثلاً (Symmetrical) فان التيار الناتج يكون متساوياً فى كل الاوجه .

يوضح شكل (٤٨-٢) ا تمثيل بسيط لمبدل ذى اتجاه واحد (one - way converter) لعدد p من الاوجه وتكون معاوقة النظام للتيار المتردد (a.c) تساوى صفر (ويطلق عليها ايضاً بمعاوقة التوحيد *Commutating impedance*) ومحاثة التنعيم *smoothing inductance* تساوى مالانهاية . وتتكون تيارات الاوجه ، لهد الدائرة من نبضات مستطيلة موجبة دورية لها عرض W يساوى $2\pi/p$ ومتكررة عند تردد المصدر .

ويتحليل الموجة المربعة الموضحة بشكل (٤٨-٢) ج والتي تخضع للمعادلة

$$f(\omega t) = f(-\omega t)$$

(وتعرف بالدالة الزوجية *even function*)، نجد ان تحليل "فوريير" يعطى فقط المركبات التى تحتوى على جيوب تمام الزاوية (*cosine*) بالاضافة الى مركبة التيار المستمر كالاتى :

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-W/2}^{W/2} d(\omega t) = \frac{W}{2\pi} = \frac{1}{p} \quad (W = \frac{2\pi}{p})$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_{-W/2}^{W/2} \cos(n\omega t) d(\omega t) = \frac{1}{\pi} \sin \frac{nW}{2} = \frac{2}{n\pi} \sin \frac{\pi n}{p}$$

وعلى ذلك نحصل من تحليل "فوريير" على تيار النبضات الموجبه (I_p) كالاتى :

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١١٢ -

$$I_p = \frac{2}{\pi} \left(\frac{W}{4} + \sin \frac{W}{2} \cos \omega t + \frac{1}{2} \sin \frac{2W}{2} \cos 2\omega t + \frac{1}{3} \sin \frac{3W}{2} \cos 3\omega t \dots \right)$$

وباستخدام عدد p من الثيريزتورات في مسار الرجوع ، كما في شكل (٢-٤٨) ب
قان الدائرة تعرف بمبدل ذى اتجاهين (*Two-way convertor*) والذي نحصل منه على
نبضات تيار موجبة وسالبة ، وبتحليل النبضات السالبة نحصل على تيار النبضات
السالبة I_N كالآتي :

$$I_N = \frac{2}{\pi} \left(-\frac{W}{4} + \sin \frac{W}{2} \cos \omega t - \frac{1}{2} \sin \frac{2W}{2} \cos 2\omega t + \frac{1}{3} \sin \frac{3W}{2} \cos 3\omega t \dots \right)$$

ومنها يتضح ان التيار الناتج يكون محصلة تيارات النبضات الموجبة والسالبة اى ان

$$I = I_p + I_N = \frac{4}{\pi} \left(\sin \frac{W}{2} \cos \omega t + \frac{1}{3} \sin \frac{3W}{2} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \sin \frac{5W}{2} \cos 5\omega t \dots \right) \quad (I)$$

ويتضح من هذه المعادلة انها لا تحتوى على مركبة التيار المستمر ولا المركبات
الزوجية .

نفرض ان عرض الموجه المربعة W تساوى π ، كما في شكل (٢-٤٩) ا ،
وبالتعويض في المعادلة السابقة نحصل على :

$$I(t) = \frac{4}{\pi} \left(\cos(\omega t) - \frac{1}{3} \cos(3\omega t) + \frac{1}{5} \cos(5\omega t) - \frac{1}{7} \cos(7\omega t) + \dots \right)$$

وتكون التوافقيات ١ ، ٥ ، ٩ ... ناتجة من النبضات الموجبة ، اما التوافقيات ٣ ، ٧ ،
١١ ، ... فمن النبضات السالبة ويمكن تمثيل هذه التوافقيات كنسبة من التردد الاساسى
(*Frequency domain*) كما في شكل (٢-٤٩) ب ويوضح شكل (٢-٥٠) شكل الموجه
المربعة المشوهه $I(t)$ واحتوائها على التوافقيات الثالثة والخامسة .

التوافقيات في دائرة الموحد ذات ٦ نبضات

يوضح شكل (٢-٥١) تغذية موحد ذات ٦ نبضات من خلال محول موصل نجمة /
دلتا او نجمة / نجمة . وكذلك موجات جهود الاوجه بملفات التيار المستمر للمحول

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١١٣ -

(الملفات الثانوية) ، والتيار المار بالثريزتورات، والتيار بملف التيار المستمر للوجه A ،
وتيار الخط (line current) .

ويساوى عرض النبضة W (فى هذه الحالة) $\frac{2\pi}{3}$ ويفرض ان ارتفاع النبضة I_d
وبالتعويض فى معادلة التيار رقم (١) نجد ان التيار المار بالوجه a كالاتى :

$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d (\cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t \\ + \frac{1}{13} \cos 13\omega t - \frac{1}{17} \cos 17\omega t + \dots) \quad (2)$$

ويوضح شكل (٢-٥٢) التيارات المارة بالثلاثة اوجه أى i_a , i_b , i_c ويلاحظ الآتى من
المعادلة السابقة

- لا تحتوى على التوافقيات الثلاثية الفردية (٢ ، ٩ ،)

- درجات التوافقيات الموجودة تتبع المعادلة $n = 6k \pm 1$

- درجات التوافقيات $(6k + 1)$ هى التوافقيات ذات الاشارات الموجبة (اى
التوافقيات ١ ، ٧ ، ١٣ ،)

- درجات التوافقيات $(6k - 1)$ هى التوافقيات ذات الاشارات السالبة (اى التوافقيات
٥ ، ١١ ، ١٧ ،)

- تكون قيمة المركبة الاساسية (rms) كالاتى

$$I_1 = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right) \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi} \right) I_d = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d$$

- تكون قيمة تيار التوافقيات (rms) للدرجة n كالاتى

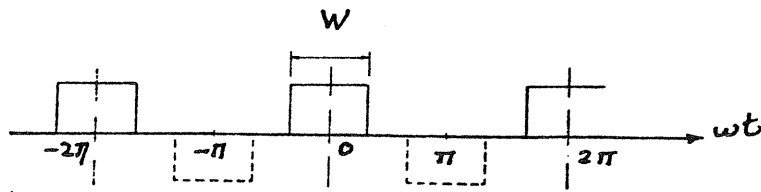
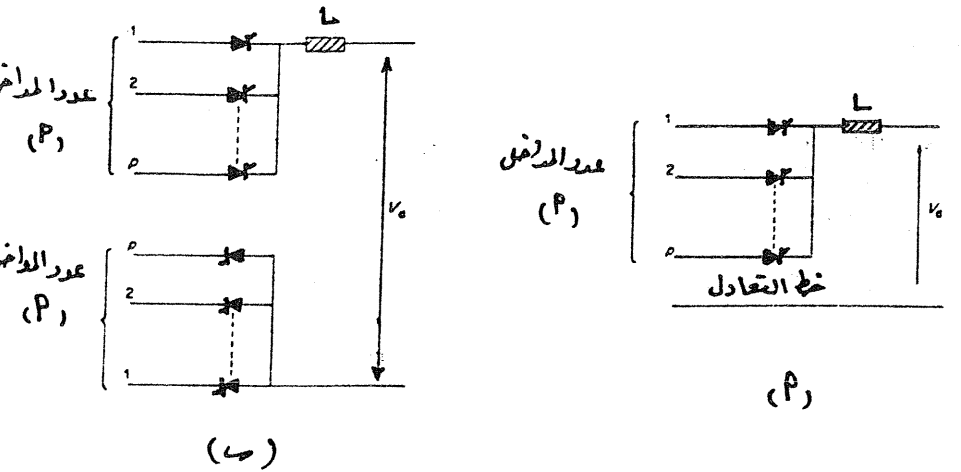
$$I_n = \frac{I_1}{n}$$

كما ان موجات التيار i_a , i_b , i_c موجات مربعة بفرض ان معاوقة التوحيد او معاوقة
النظام تساوى صفر . ولكن تتغير شكل الموجات المربعة تبعاً لعاملين هما قيمة معاوقة
النظام وقيمة زاوية التأخير (phase retard) للثريزتور ويوضح شكل (٢-٥٣) تأثير
هذين العاملين على الموجة المربعة .

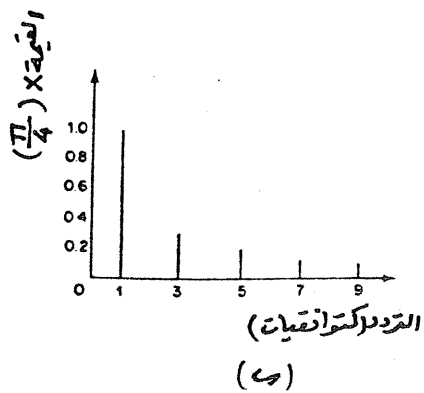
فى شكل (٢-٥١) اذا كانت احد ملفات المحول متصلة دلتا (Δ) (سواء الابتدائى او

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

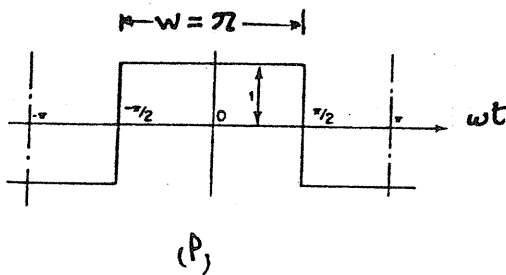
- ١١٤ -



(ح)
شكل (٤٨-٢)

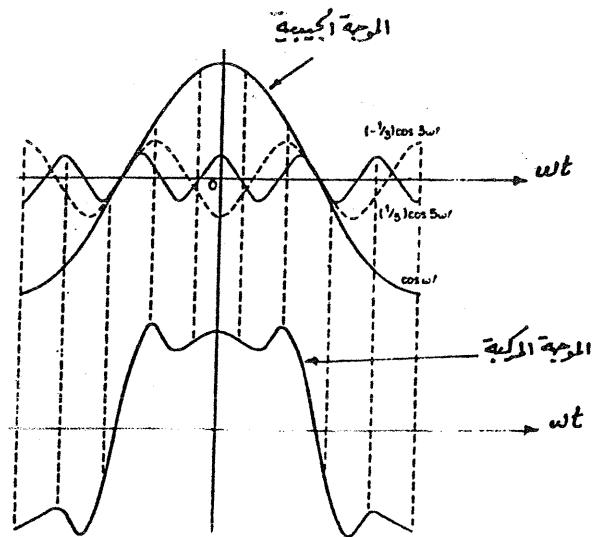


شكل (٤٩-٢)

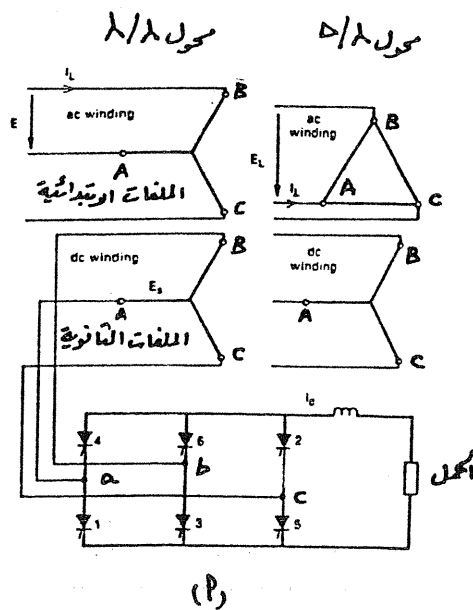
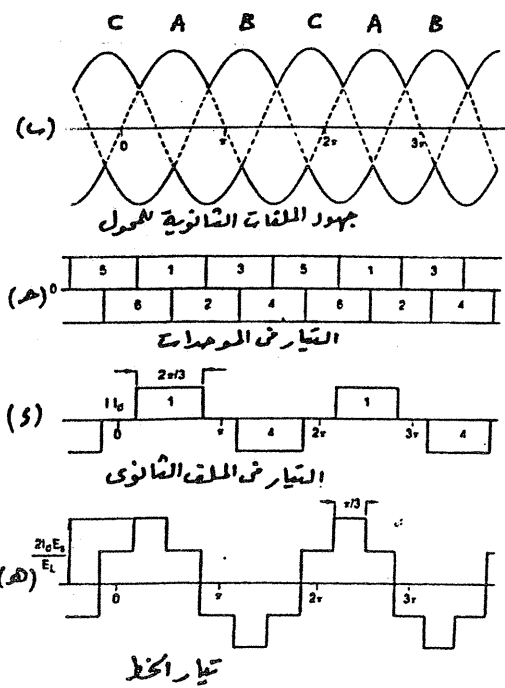


« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

١١٥



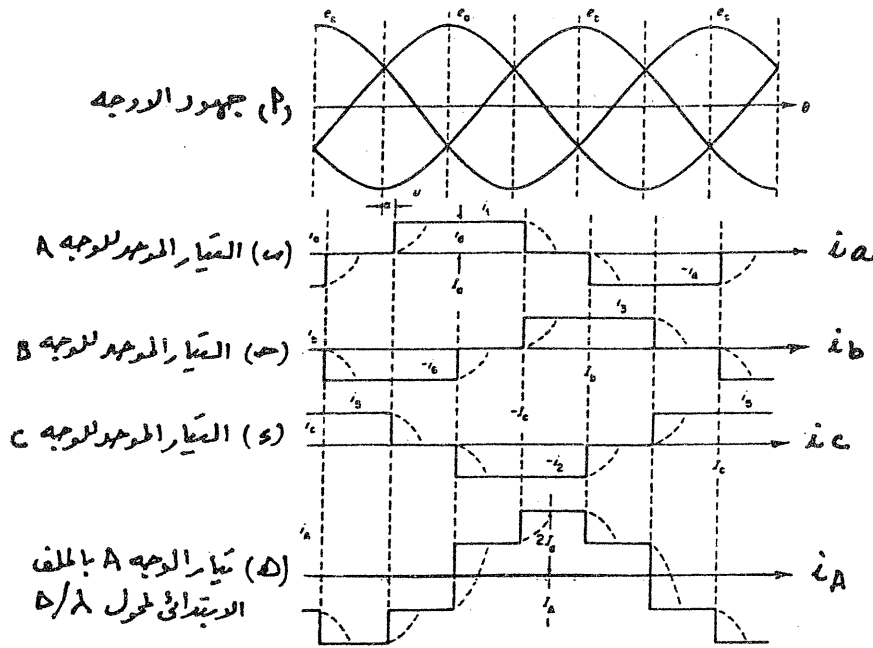
شكل (٥٠-٢)



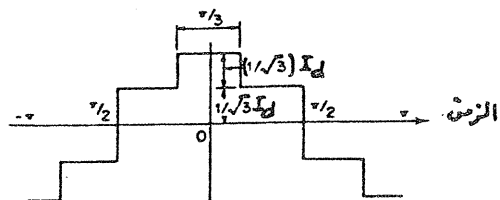
شكل (٥١-٢)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

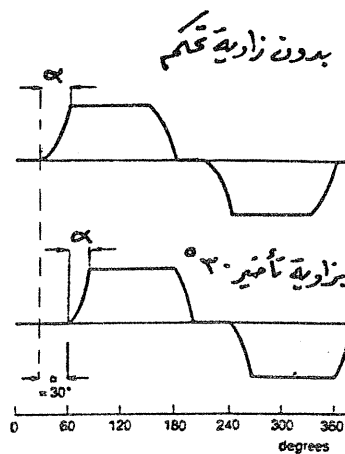
- ١١٦ -



شكل (٥٢-٢)



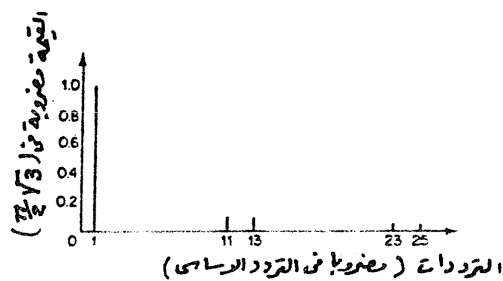
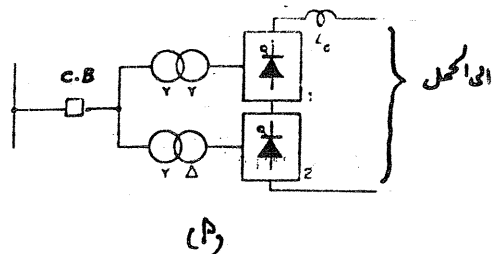
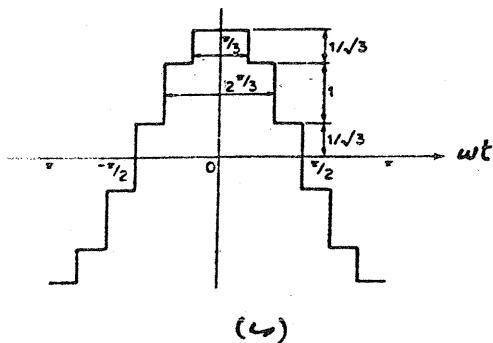
شكل (٥٤-٢)



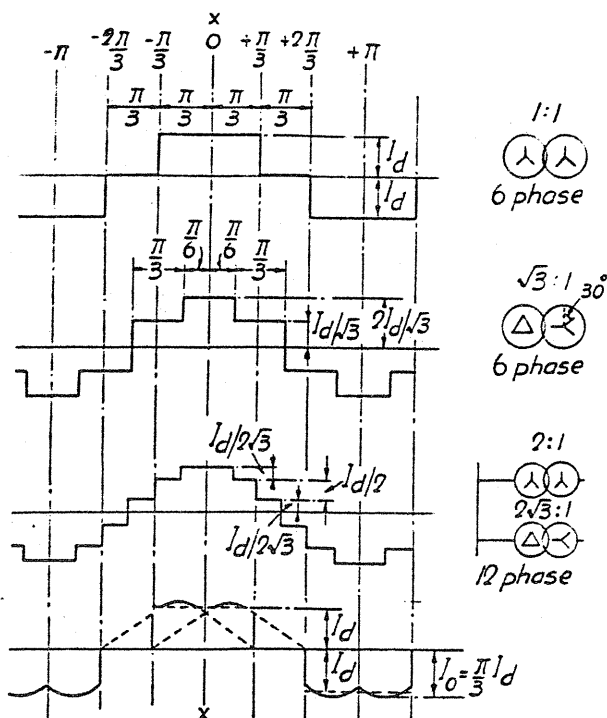
شكل (٥٣-٢)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

١١٧



شكل (٥٥-٢)



شكل (٥٦-٢)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١١٨ -

الثانوى) فان موجات التيار ، على جانب المدخل (a.c) ، تتكون من الاختلاف اللحظى بين موجتين التيار الثانوى المربع ، كما فى شكل (٢-٥٢) هـ ، وتحلل هذه الموجة باستخدام المعادلة رقم (١) وبالتعويض عن عرض النبضات $\pi/3$ ، π مركبتى المعادلة على التوالى .

اذا كانت المجموعة الاتجاهية للمحول نجمة / نجمة فانه يتم اضافة المعامل $\sqrt{3}$ لنسبة التحويل وتصبح موجة التيار كما فى شكل (٢-٥٤) ويكون تحليل "فورير" لتيار الوجه A كالاتى :

$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d (\cos \omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \frac{1}{7} \cos 7\omega t + \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \dots) \quad (3)$$

تختلف مكونات هذه المعادلة (تحليل التيار i_a) عن حالة التوصيلة نجمة / نجمة عن طريق تتابع دوران درجات التوافقيات تبعاً للمعادلة $6k \pm 1$ وذلك للقيم الفردية للثابت k (اى التوافقيات الخامسة والسابعة ، والسابعة عشر والتاسعة عشر ...)

التوافقيات فى دائرة الموحد ذات ١٢ نبضة

يتم توصيل دائرة الموحد ذات ١٢ نبضة (Twelve - pulse circuit) اما كما سبق وذكرنا فى شكل (٢-٤٦) او باستخدام محولين Y/Δ ، Y/Y وتوصيل مجموعتين ٦ نبضات كما فى تمثيل الدائرة بشكل (٢-٥٥) أ ، وتكون المركبة الاساسية لجهد المحولين متساوية وبينهما زاوية ازاحة 30° ، ويوضح شكل (٢-٥٥) ب موجة تيار الوجه لهذه التوصيلة ، ويظهر من شكل (٢-٥٥) ج ان درجات التوافقيات الموجودة لهذه الدائرة هى الحادية عشر ، الثالثة عشر ، الثالثة والعشرين ، الخامسة والعشرين ، كما يجب ان تكون زاوية التحكم (control angle) لمجموعتى هذه الدائرة متساوية بالاضافة الى ان التردد الاساسى لتيار المحولين على جانب المدخل (a.c) فى اتفاق مرحلى (in phase) .

ولكى نحصل على معادلة التيار i_a ، فى هذه الحالة ، نستخدم المعادلة رقم (٢) لتوصيلة المحول نجمة / نجمة والمعادلة رقم (٣) لتوصيلة المحول دلتا / نجمة كالاتى :

$$i_a = 2 \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi} \right) I_d (\cos \omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t - \frac{1}{23} \cos 23\omega t + \frac{1}{25} \cos 25\omega t - \dots) \quad (2)$$

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١١٩ -

وتحتوى هذه المعادلة على التوافقيات $(12k \pm 1)$ ، كما فى شكل (٢-٥٥) جـ بينما تدور تيارات التوافقيات للدرجات $(6k \pm 1)$ (للقيم الفردية للثابت k) بين المحولين ولا تظهر بشبكة تغذية المصدر (a.c) .

ويوضح شكل (٢-٥٦) مقارنة بين موجة تيار الوجة فى حالة ٦ نبضات ، ١٢ نبضة ويتوصيلة اتجاهية مختلفة لمحاولات التغذية .

توجد دوائر ذات نبضات اعلى من ١٢ كالاتى

- دائرة ذات ٢٤ نبضة

ويستخدم معها اربعة محولات ، لهم زاوية ازاحة θ بين الجهود الاساسية .

- دائرة ذات ٤٨ نبضة

وتستخدم ثمانية محولات ، لهم زاوية ازاحة θ بين الجهود الاساسية .

ويوضح جدول (٢-١٢) درجات التوافقيات تبعاً لعدد النبضات بالدوائر المختلفة

تأثير المحول ومعوقلة النظام :

بفرض اخذ معاوقة النظام او معاوقة التوحيد (commutation reactance) فى الاعتبار (اى لاتساوى صفراً) فان موجة التيار تكون كما فى شكل (٢-٥٢) ، (٢-٥٣) ، وفيما يلى استنتاج معادلة التيار . ينقسم التيار ، كما فى شكل (٢-٥٧) الى ثلاثة أجزاء هم i_p ، i_q ، i_r وبفرض ان معاوقة التوحيد لكل وجه تساوى X_c فان تيار التوحيد يكون :

$$i_p = \frac{E}{\sqrt{2} X_c} (\cos \alpha - \cos \omega t)$$

وتكون X_c هى ممانعة التسرب للمحول (Transformer leakage reactance) .

وفى نهاية عملية التوحيد تكون $i_p = I_d$ ، $\omega t = \gamma$ وبالتعويض فى المعادلة السابقة

فان

$$i_d = \frac{E}{\sqrt{2} X_c} [\cos \alpha - \cos (\alpha + \gamma)]$$

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٢٠ -

وبقسمة المعادلتين السابقتين نحصل على معادلة الجزء الاول من منحنى التيار فى شكل (٢-٥٧)

$$i_p = I_d \left(\frac{\cos \alpha - \cos \omega t}{\cos \alpha - \cos (\alpha + \gamma)} \right) \dots \dots \alpha < \omega t < (\alpha + \gamma)$$

وتكون معادلة الجزء الاوسط من منحنى التيار هى

$$i_q = I_d \dots \dots \dots (\alpha + \gamma) < \omega t < \left(\frac{2\pi}{3} + \alpha \right)$$

بينما معادلة الجزء الاخير من منحنى التيار هى

$$i_r = I_d - I_d \left[\frac{\cos \alpha - \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right)}{\cos \alpha - \cos (\alpha + \gamma)} \right] \dots \left(\frac{3\pi}{3} + \alpha \right) < \omega t < \left(\frac{2\pi}{3} + \alpha + \gamma \right)$$

وبلاحظ فى شكل (٢-٥٧) ان نبضة التيار السالبة مماثلة للنبضة الموجبة لذلك فان معادلة تيار التوحيد تحتوى فقط على التوافقيات الفردية غير الثلاثية وتكون تيارات التوافقيات بدلالة زاوية التراكب (*overlap angle*) والتي رمز لها بالرمز γ وزاوية التأخير او الاشعال (*Delay or firing angle*) والتي رمز لها بالرمز α وتوضح الاشكال من - (٢-٥٨) وحتى (٢-٦٥) العلاقة بين تيارات التوافقيات $I_5, I_7, I_{11}, I_{13}, I_{17}, I_{19}, I_{23}, I_{25}$ وزاوية التراكب γ عند قيم مختلفة لزاوية التأخير α .

ونلاحظ الآتى من هذه الاشكال :

١ - كلما زادت قيمة الزاوية γ كلما انخفضت قيمة تيار التوافقيات ، وتكون اسرع انخفاضاً كلما زادت درجة التوافقيات .

٢ - يزيد معدل انخفاض التوافقيات مع زيادة γ حتى حد معين .

٣ - تقل قيمة التوافقية n الى اقل قيمة عند الزاوية $\gamma = 360/n$ ثم تزيد ببطئ بعد ذلك .

٤ - عند زاوية تراكب γ ثابتة ، فان التغير فى التوافقيات عند قيم α المختلفة يكون صغيراً .

٥ - عند قيمة تيار ثابتة، وبزيادة الزاوية α فان الزاوية γ تقل مؤدية الى زيادة

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٢١ -

التوافقيات وتكون اكبر قيمة عند γ تساوى صفر .

الخلاصة ان وجود معاوقة النظام تعمل على تقليل التوافقيات الموجودة فى موجات التيار ، ويزيد التأثير اذا كانت عمليات التوحيد غير محكومة (*uncontrolled rectification*) ، وعند زوايا الاشتعال الكبيرة فان نبضات التيار لانتأثر بمعاوقة النظام .

التوافقيات الموجودة بمخرج المبدل

Harmonics on the d.c side of a converter

تكون درجات توافقيات الجهد لدائرة قنطرة ثلاثية الوجة - ٦ نبضات - هى :

$$n = 6K$$

ويوضح شكل (٢-٦٦) موجات الجهد المستمر (*direct voltage*) للمبدل كالاتى .

- يوضح شكل (٢-٦٦) أ موجة الجهد عند القطب (او الطرف) الموجب

- يوضح شكل (٢-٦٦) ب موجة الجهد عند القطب (او لطرف) السالب

- يوضح شكل (٢-٦٦) ج موجة الجهد عند طرفى المخرج .

وتكون فترة تكرار الموجة فى شكل (٢-٦٦) ج هى $\pi/3$ ، وتخضع الموجة فى هذه الفترة للمعادلات الآتية ، باعتبار نقطة المرجع هى نقطة التقاطع الصغرى (C_1) للجهد

$$\left. \begin{aligned} V_d &= \sqrt{2} V_c \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) \dots\dots\dots 0 < \omega t < \alpha \\ V_d &= \sqrt{2} V_c \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) + \frac{1}{2} \sqrt{2} V_c \sin \omega t \\ &= \frac{\sqrt{6}}{2} V_c \cos \omega t \dots\dots\dots \alpha < \omega t < \alpha + \gamma \\ V_d &= \sqrt{2} V_c \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{6} \right) \dots\dots\dots \alpha + \gamma < \omega t < \frac{\pi}{3} \end{aligned} \right\} 3$$

حيث V_c هى جذر متوسط مربعات (*rms*) الجهد الموحد بين وجهين .

من المعادلات السابقة يمكن الحصول على معادلة جذر متوسط المربعات *rms* لجهد التوافقيات كالاتى :

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

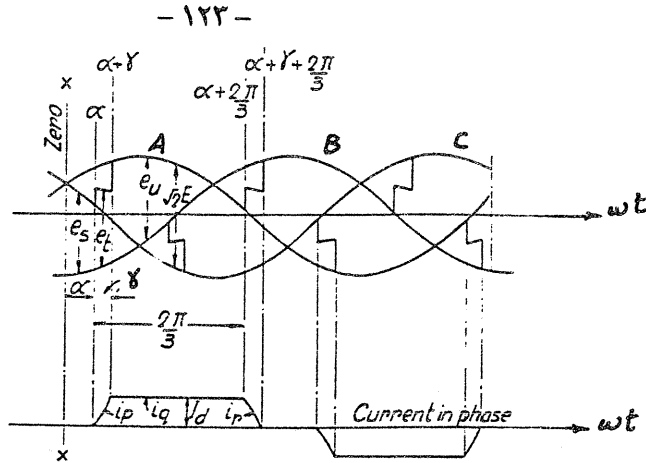
- ١٢٢ -

جدول (١٢-٢) درجات التوافقيات الحادثة تبعاً لعدد نبضات دائرة الموحد

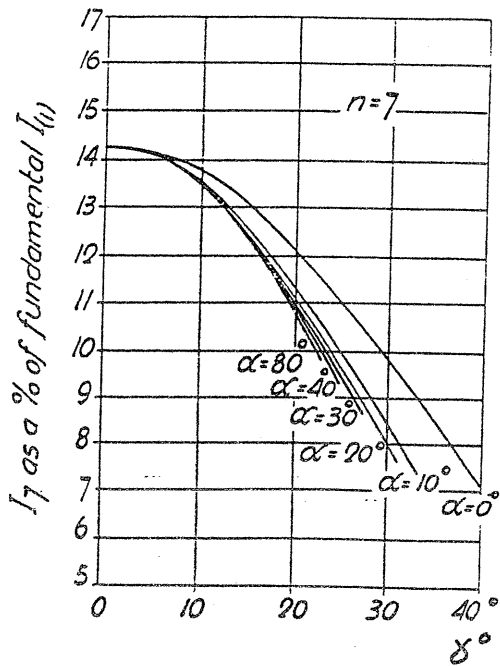
(توافقيات التيار المتردد a.c)

دائرة الموحد ذات نبضات												درجات التوافقيات
٧٢	٦٦	٦٠	٥٤	٤٨	٤٢	٣٦	٣٠	٢٤	١٨	١٢	٦	
											✓	٥
											✓	٧
										✓	✓	١١
										✓	✓	١٣
									✓		✓	١٧
									✓		✓	١٩
								✓		✓	✓	٢٣
								✓		✓	✓	٢٥
							✓				✓	٢٩
							✓				✓	٣١
						✓			✓	✓	✓	٣٥
						✓			✓	✓	✓	٣٧
					✓						✓	٤١
					✓						✓	٤٣
				✓				✓		✓	✓	٤٧
				✓				✓		✓	✓	٤٩
			✓						✓		✓	٥٣
			✓						✓		✓	٥٥
		✓					✓			✓	✓	٥٩
		✓					✓			✓	✓	٦١
	✓										✓	٦٥
	✓										✓	٦٧
✓						✓		✓	✓	✓	✓	٧١
✓						✓		✓	✓	✓	✓	٧٣

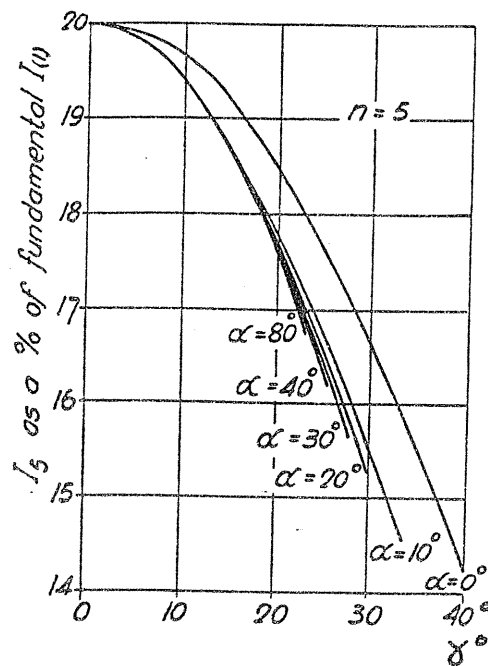
« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »



شكل (٥٧-٢)



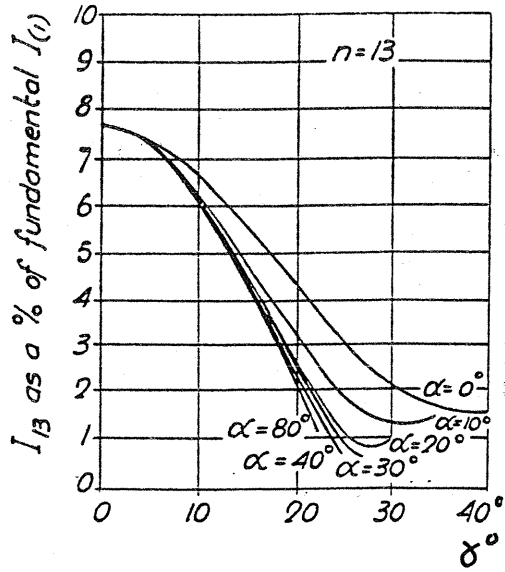
شكل (٥٩-٢)



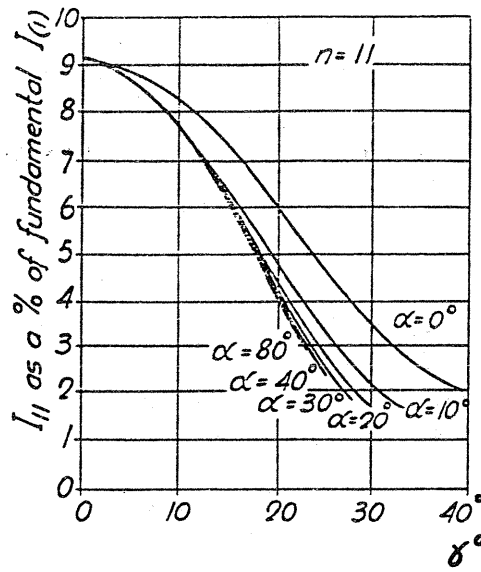
شكل (٥٨-٢)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

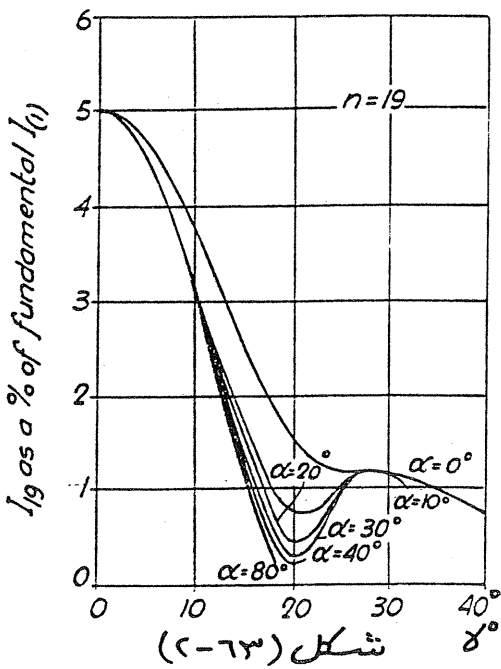
- ١٢٤ -



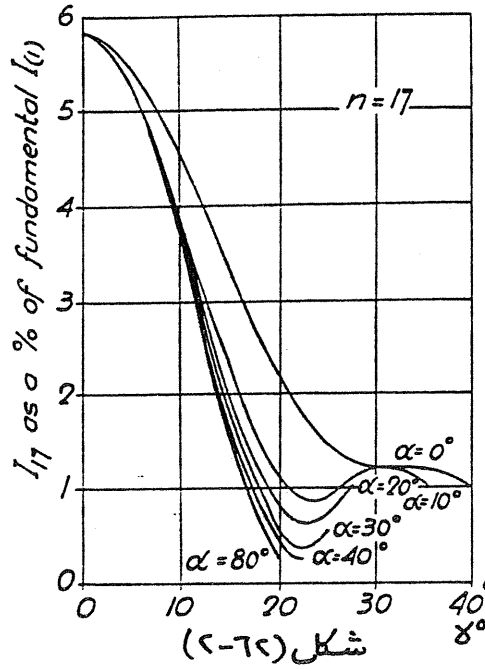
شكل (٦١-٢)



شكل (٦٠-٢)



شكل (٦٣-٢)



شكل (٦٢-٢)

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٢٥ -

$$V_n = \frac{V_{co}}{\sqrt{2(n^2-1)}} \left\{ (n-1)^2 \cos^2(n+1) \frac{\gamma}{2} + (n+1)^2 \cos^2((n-1) \frac{\gamma}{2}) - 2(n-1)(n+1) \cos((n+1) \frac{\gamma}{2}) \cos((n-1) \frac{\gamma}{2}) \cos(2\alpha + \gamma) \right\}^{\frac{1}{2}}$$

حيث

V_{co} هو أقصى متوسط الجهد الموحد ويساوى $\frac{3\sqrt{2} V_c}{\pi}$ فى حالة مبدل ٦ نبضات .
توضح الاشكال (٢-٦٧) ، (٢-٦٨) ، (٢-٦٩) العلاقة بين جهود التوافقيات السادسة والثانية عشر والثامنة عشر (كنسبة من الجهد V_{co}) وبين زاوية التراكب γ عند قيم مختلفة لزاوية التأخير (α)

عند $\gamma = 0$, $\alpha = 0$ تصبح معادلة جهد التوافقيات كالآتى :

$$V_{no} = \frac{\sqrt{2}}{(n^2-1)} V_{co}$$

أو

$$\frac{V_{no}}{V_{co}} = \frac{\sqrt{2}}{(n^2-1)} \approx \frac{\sqrt{2}}{(n^2)}$$

بالتعويض عن n تساوى ١٨، ١٢، ٦ نحصل على القيم ٠،٤٤ ، % ، ٩٩ ، % ، ٤،٠٤ ، % على التوالى .

عموماً كلما زادت الزاوية α زادت قيمة التوافقيات

وعند $\gamma = 0$, $\alpha = \frac{\pi}{2}$ فإن المعادلة تصبح

$$\frac{V_n}{V_{co}} = \frac{\sqrt{2} n}{(n^2-1)} \approx \frac{\sqrt{2}}{(n)}$$

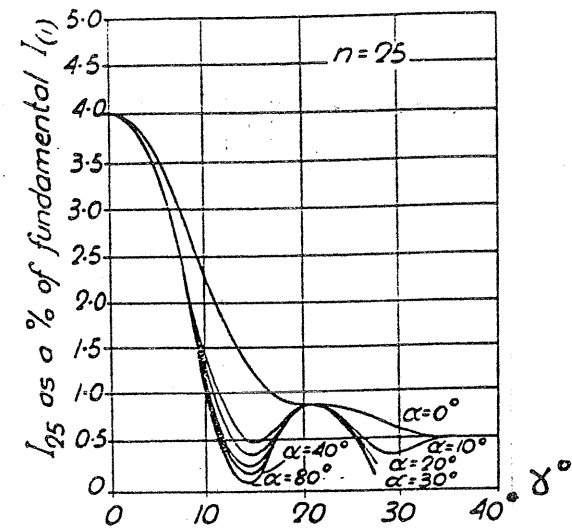
وتعنى هذه المعادلة الزيادة السريعة للتوافقيات ذات الدرجات الاعلى مع زيادة α .

تيار التوافقيات بالملفات الثانوية للمحول (جانب d.c)

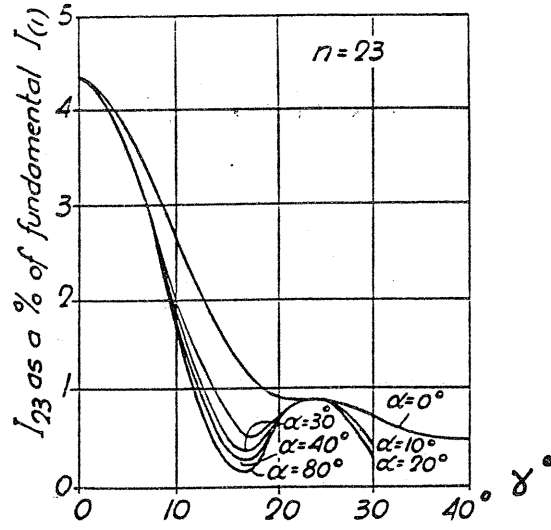
عند استخدام محول Y/y أو D/y أو Y/d مع عدد ٦ موحّدات أو ثيريزتورات فإن هذه الدائرة تعرف بمبدل القنطرة الاحادية *Single bridge converter* وعند استخدام

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

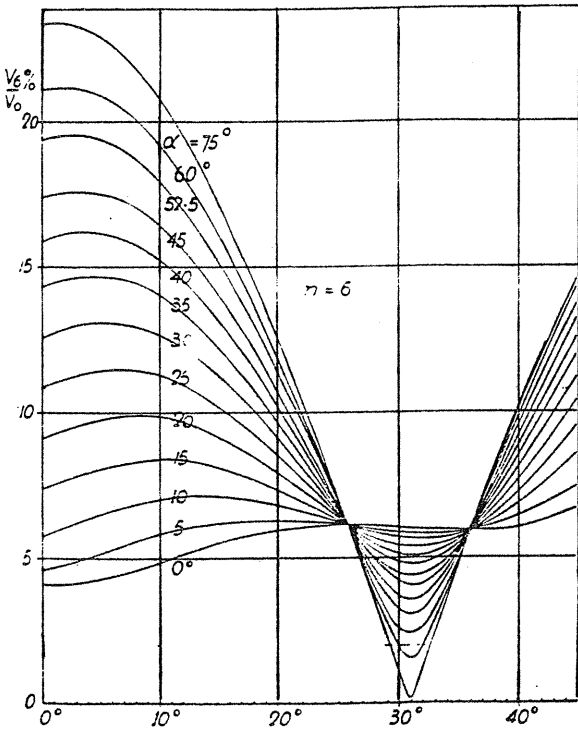
- ١٢٦ -



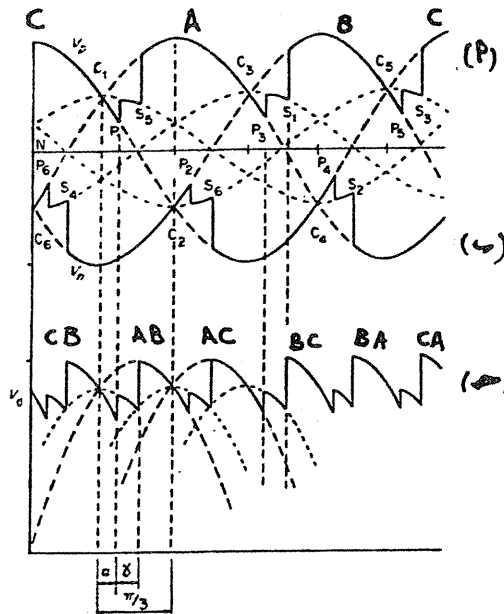
شكل (٦٥-٢)



شكل (٦٤-٢)



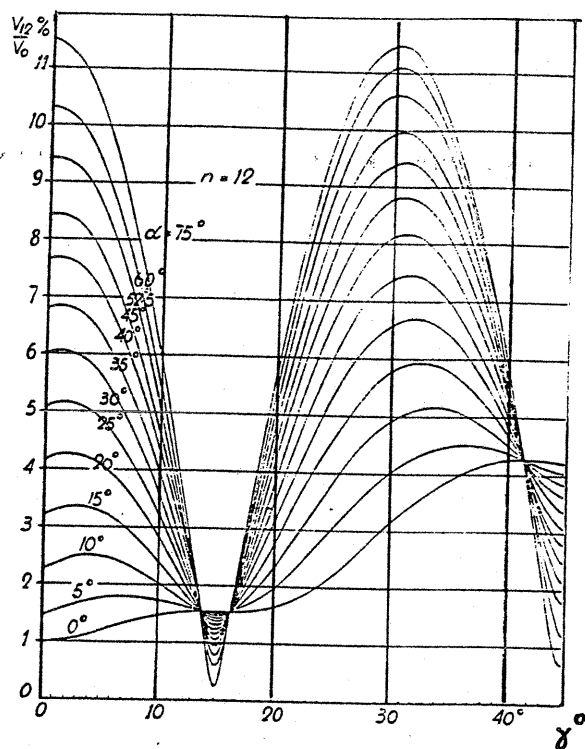
شكل (٦٧-٢)



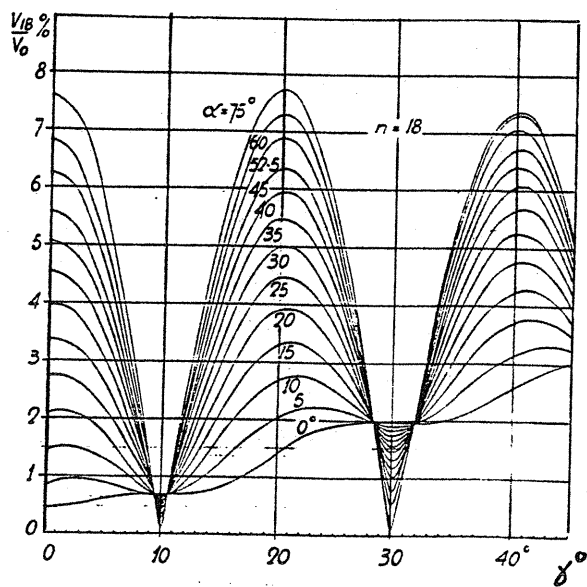
شكل (٦٦-٢)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١٢٧ -



شكل (٦٨-٢)



شكل (٦٩-٢)

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٢٨ -

محولين مع عدد ١٢ موحداً فتعرف الدائرة بالمبدل ذو القنطرتين (*Two bridges converter*) ، كما في شكل (٢-٥٥) ، (٢-٥٦) ويعتمد مسار تيارات التوافقيات على طريقة توصيل هذه القناطر ويتوصيل نقطة التعادل بالأرضى بجهاز مساراً لمرور عدد من التوافقيات .

وفيما يلي بعض طرق توصيل القناطر ، والموضحة بشكل (٢-٧٠)

عند توصيل قنطرتين على التوالي وبينهما زاوية ازاحة تساوى 30° فان درجات التوافقيات الحادثة ارقام ٦ ، ١٨ ، ٣٠ ... تكون متساوية وفي اتجاه معاكس للاتجاه المرحلى (*opposite in phase*) ، بينما درجات التوافقيات ارقام ١٢ ، ٢٤ ، ٣٦ ... تكون في اتفاق مرحلى (*in phase*) ، ويمكن تأكيد هذا من المعادلة الآتية :

$$\arctan \theta_n = \frac{b_n}{a_n}$$

حيث θ_n زاوية التوافقية n مقاسة من المحور x بشكل (٢-٥٦) او (٢-٥٧) او (٢-٦٦) a_n ، b_n معاملات مركبات الجيب تمام (*cosine*) والجيب (*sine*) فى تحليل "فورير" لمعادلة جهد المخرج بشكل (٢-٦٦) وتنقسم معادلة الجهد الى الثلاثة أجزاء بالمعادلات رقم ٣ .

اى بتحليل فورير لمعادلات الجهد نحصل على a_n ، b_n .

عندما تكون القنطرتين على نفس نقطة الارضى ، فان درجات التوافقيات ٦ ، ١٨ ، ٣٠ ... تلغى ، بينما تجمع التوافقيات ١٢ ، ٢٤ ، ٣٦ ... وتمر بالدائرة كما فى شكل (٢-٧٠) ب.

عندما تكون نقطة التعادل مؤرضة فان التوافقيات ٦ ، ١٨ ، ٣٠ ... تكون متساوية وفي اتجاه معاكس ، فى كل قنطرة ، بينما تكون فى اتفاق مرحلى فى مسار الارضى وتكون التوافقيات ١٢ ، ٢٤ ، ٣٦ ... للقنطرتين متساوية وفي اتفاق مرحلى وتمر بالموصلين ، كما فى شكل (٢-٧٠) ج . اى ان تيارات التوافقيات ٦ ، ١٨ ، ٣٠ ... تكون فى اتفاق مرحلى بالموصلين بينما تيارات التوافقيات ١٢ ، ٢٤ ، ٣٦ تكون فى اتجاه معاكس خلال الموصلين .

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٢٩ -

عند توصيل القنطرتين على التوالي وفى اتفاق مرحلى ، فإن النظام يعمل بعدد ٦ أوجه (*six-phase operation*) سواء كانت نقطة التعادل مؤرضة او غير مؤرضة ، وتمر التوافقيات ٦، ١٢، ١٨، ٢٤، ٣٠، ٣٦... فى الموصلين كما فى شكل (٧٠-٢) .

وعند توصيل القنطرتين على التوالي وبينهما زاوية ازاحة ٣٠° بدون توصيل أية أرضى ، كما فى شكل (٧٠-٢) هـ ، فإن التوافقيات ١٢ ، ٢٤ ، ٣٦... تمر فى الموصلين ويوضح جدول (١٣-٢) درجات التوافقيات فى دائرة *d.c* تبعاً لعدد النبضات .

٢ - المبدلات ذات القدرات لمتوسطة *Meduim size convertors*

تتراوح قدرات هذه المبدلات من عشرات الى مئات الكيلوات . ويستخدم فى اجهزة تحكم محركات التيار المتردد (*a.c*) التى تستخدم ترانزستورات القدرة (*power transistors*) والثايرستورات ذات بداية الفصل (*Gate turn off thyristors*) (والتي يرمز لها *GTO*) .

تغذية محركات التيار المستمر (*d.c*) من المبدلات

يوضح شكل (٧١-٢) الدائرة المكافئة لمحرك (*d.c*) ، واذا فرضنا ان المحرك يغذى بمصدر جهد متردد ($V_m \sin \omega t$) فإن معادلة المحرك تكون

$$V_m \sin \omega t = R i + L \frac{di}{dt} + E$$

ويحل هذه المعادلة نحصل على قيمة تيار الحمل *i*

$$i = k e^{-Rt/L} + \frac{V_m}{(R^2 + \omega^2 L^2)} \sin (\omega t - \phi) - \frac{E}{R}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right)$$

وتشتق *k* من حالات بداية التشغيل (*initial conditions*) .

ويمكن التحكم فى زاوية تأخير الاشعال (*Firing delay*) للثايرستورات وذلك بان تكون صغيرة خلال حالات التحميل العادية ، بينما تزداد الزاوية خلال بداية تشغيل المحرك او عند التحميل الخفيف وعندئذ يمكن فصل التيار ويوضح شكل (٧٢-٢) ومنحنى الجهد المستمر والتيار المتردد (*a.c*) المار بالوجه *A* وذلك فى حالة استخدام موحدة ذات ٦ نبضات . ويكون التيار الكلى بكل وجه عبارة عن نبضتين موجبتين وأخريتين

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٣٠ -

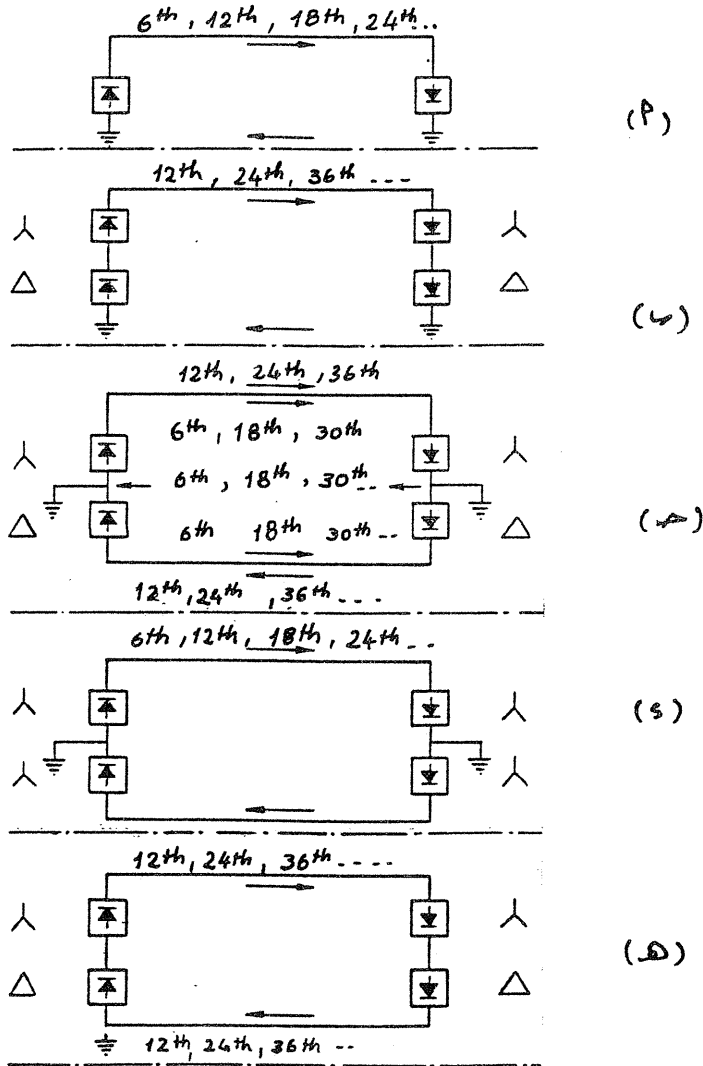
جدول (١٣-٢) درجات التوافقيات الحادثة تبعاً لعدد نبضات دائرة الموحد

(توافقيات التيار المستمر *d.c*)

دائرة الموحد ذات النبضات												درجات التوافقيات
٧٢	٦٦	٦٠	٥٤	٤٨	٤٢	٣٦	٣٠	٢٤	١٨	١٢	٦	
											✓	٦
										✓	✓	١٢
									✓		✓	١٨
								✓		✓	✓	٢٤
							✓				✓	٣٠
						✓			✓	✓	✓	٣٦
					✓						✓	٤٢
				✓				✓		✓	✓	٤٨
			✓						✓		✓	٥٤
		✓					✓			✓	✓	٦٠
	✓										✓	٦٦
✓						✓		✓	✓	✓	✓	٧٢

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١٣١ -



شكل (٧٠-٢)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١٢٢ -

سالبين، وتكون معادلة تيار الوجه A (البداية عندما يكون الجهد V_{AB} عند قيمة الذروة) كالآتي:

(١) في الحدود $\theta_1 < \omega t < \theta_2$

$$i = \frac{V_m}{R} \left\{ \cos \phi \cos (\omega t - \phi) - \frac{E}{V_m} + I \frac{E}{V_m} - \cos \phi (\cos \theta_1 - \phi) \right\} e^{(-R/\omega L)(\omega t - \theta_1)}$$

(٢) في الحدود $\theta_2 < \omega t < \theta_4$ حيث $\theta_3 = (\theta_1 + \frac{\pi}{3})$

$$i = \frac{V_m}{R} \left\{ \cos \phi \cos (\omega t - \frac{\pi}{3} - \phi) - \frac{E}{V_m} + I \frac{E}{V_m} - \cos \phi \cos (\theta_1 - \phi) \right\} e^{(-R/\omega L)(\omega t - \frac{\pi}{3} - \theta_1)}$$

(٣) في الحدود $\theta_5 < \omega t < \theta_6$ حيث $\theta_5 = (\theta_1 + \pi)$

$$i = \frac{-V_m}{R} \left\{ \cos \phi \cos (\omega t - \pi - \phi) - \frac{E}{V_m} + I \frac{E}{V_m} - \cos \phi \cos (\theta_1 - \phi) \right\} e^{(-R/\omega L)(\omega t - \pi - \theta_1)}$$

(٤) في الحدود $\theta_7 < \omega t < \theta_8$ حيث $\theta_7 = (\theta_1 + 4\pi/3)$

$$i = \frac{-V_m}{R} \left\{ \cos \phi \cos (\omega t - \frac{4\pi}{3} - \phi) - \frac{E}{V_m} + I \frac{E}{V_m} - \cos \phi \cos (\theta_1 - \phi) \right\} e^{(-R/\omega L)(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \theta_1)}$$

بتحليل "فورير" لمعادلات التيارات نجد انها تحتوى على مركبة التوافقية الخامسة بقيمة كبيرة.

تصمم محركات التيار المستمر التي تعمل مع ميدلات من الشيريزتور بان تزيد محاثة المنتج (armature inductance) للتغلب على عدم استمرارية التيار والتبسيط تستخدم الطريقة التقريبية للحصول على مركبات التوافقيات بالتيار المتردد A.C بدلالة نسبة التموجات (ripple ratio) الآتية:

- ١٣٣ -

$$r = \frac{I_r}{I_d}$$

ويوضح شكل (٧٣-٢) أ تيار المنتج (*armature current*) بدلالة I_d, I_r حيث :

I_d متوسط التيار المستمر المار بعضو المنتج للمحرك
 I_r التموجات المترددة (*alternating ripple*) للتيار المستمر
(مع اهمال تأثير ممانعة التوحيد)

ويوضح شكل (٧٣-٢) ب جهد تيار الثيريزتور والتيار المتردد (a.c).
ويتحليل "فورير" للتيار المتردد لبدل ٦ نبضات تكون معادلات تيارات التوافقيات
(كنسبة من المركبة الاساسية) كالآتي

$$I_n = 100 \left(\frac{1}{2} + \frac{6.46 r}{n-1} - \frac{7.13 r}{n} \right) (-1)^k \dots\dots\dots n = kp-1$$

$$I_n = 100 \left(\frac{1}{n} + \frac{6.46 r}{n+1} - \frac{7.13 r}{n} \right) (-1)^k \dots\dots\dots n = kp+1$$

تم تسجيل هذه المعادلات بدلالة r في شكل (٧٤-٢) للحدود الآتية :

من $r=0$ أى عند ممانعة تساوى مالانهاية

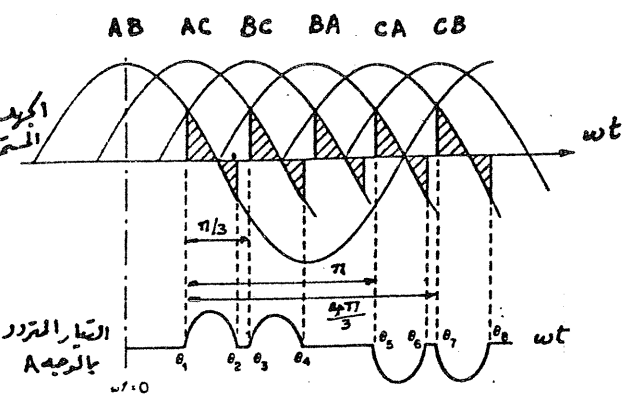
حتى $r=1.5$ أى قيمة محددة للتيار .

ويلاحظ من الشكل انه عند زيادة I تزيد التوافقية الخامسة

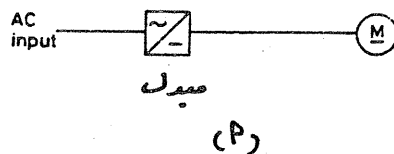
ومن بوائر التوحيد شائعة الاستخدام والتي تمتاز برخص ثمنها ، الدائرة الموضحة
بشكل (٧٥-٢) أ وتعرف بدائرة توحيد التحكم النصفى (*Half - controlled rectification*) وتستخدم لحركات التيار المستمر ذات السرعات المختلفة ، وينتج عنها
نفس التوافقيات الحادثة من دائرة التوحيد الكلى . ويوضح شكل (٧٥-٢) ب موجات
جهد التيار المستمر والتيار وجهد المصدر للوجه A .

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

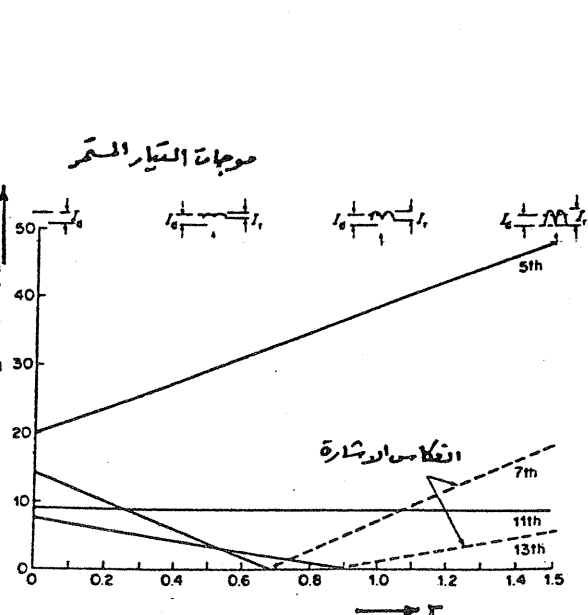
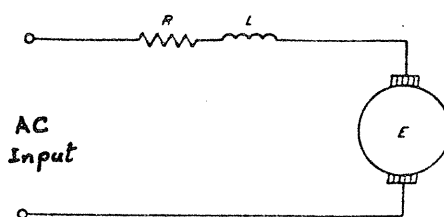
- ١٣٤ -



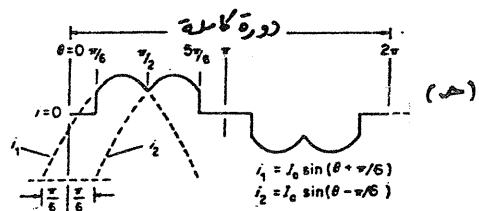
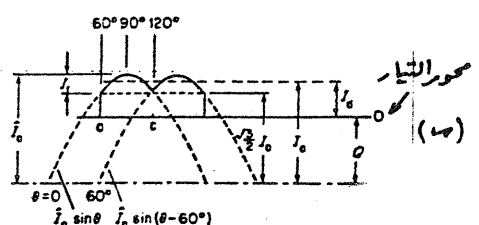
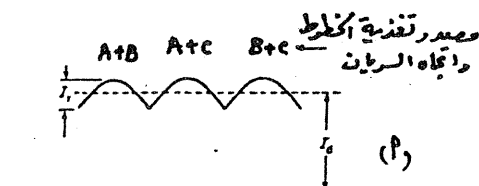
شكل (٦٤-٢)



شكل (٦١-٢)



شكل (٦٣-٢)



شكل (٦٦-٢)

« التوافقية في الشبكات الكهربائية »

- ١٣٥ -

ومن أمثلة دوائر التوحيد المستخدمة لمحركات التيار المستمر لتشغيل وسائل النقل الكهربى (railway traction) الدائرة الموضحة شكل (٢-٧٦) وتعرف بدائرة القدرة الانتقالية (Locomotive power circuit) أو بقناطر التحكم المنفصلة (Individual controlled bridges) حيث تستخدم قنطرتى توحيد على التوالى للحصول على الجهد المستمر V_d والتي تغذى على التوازي محركين تيار مستمر .

وتمثل حالة بداية التشغيل بالنقاط الآتية :

- تكون القوة الدافعة الكهربائية (emf) الخلفية لمحركات التيار المستمر مساوية للصفر .

- يكون جهد التيار المستمر المغذى منخفضاً .

- تكون زاوية التأخير كبيرة .

وعلى ذلك نجد انه خلال دورة السرعة الاولى المصحوبة بأقصى تيار لمحركات d.c ، ان قنطرة التوحيد تنتج أسوأ تيارات التوافقيات واقل معامل قدرة وعادة ، عند السرعات المنخفضة ، تلغى احدى القنطرتين مع امكانية التحكم فى زاوية تشغيل الاخرى وعندما تبدأ السرعة فى الزيادة ، تعمل القنطرة الاخرى عند أقل زاوية تأخير وتتحكم فى زاوية القنطرة الاولى . ويوضح شكل (٢-٧٧) موجات التيار والجهد للدائرة بالشكل (٢-٧٦).

وبتحليل موجات التيارات بشكل (٢-٧٧) نجد انها تحتوى على التوافقيات الثالثة - الخامسة - السابعة - التاسعة ... والموضحة بشكل (٢-٧٨) . ويوضح شكل (٢-٧٩) تغذية مجموعتين من الثيريزتور متماثلتين من مصدر ثلاثى الوجة ولكل منهما زاوية تحكم فى الاشعال مستقلة - كما يوضح ايضاً موجة المدخل للوجه (C-N) ، وموجة تيار الوجه C لكل من المجموعتين فى الحالات الآتية :

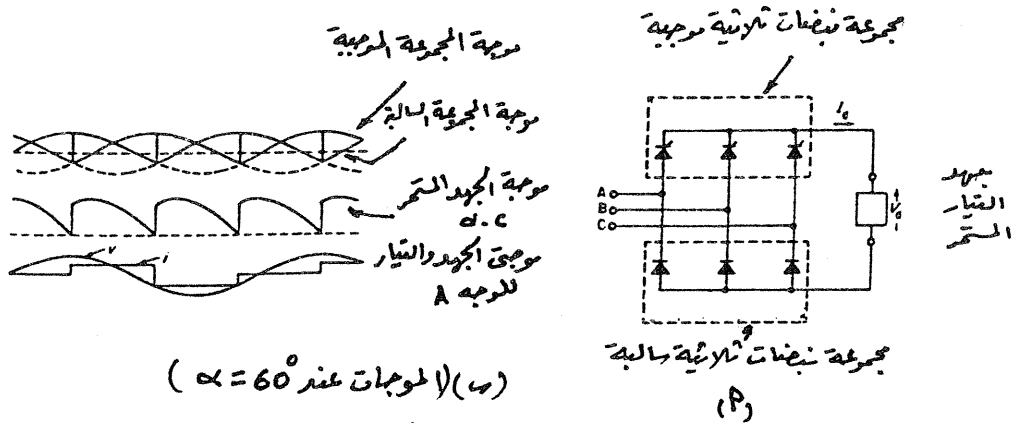
يمثل شكل (٢-٧٩) أ حالة تماثل زاوية التأخير ، واشتغال حقيقى ١٢ نبضة .

يمثل شكل (٢-٧٩) ب زاوية تأخير تساوى ٣٠ واشتغال زائف لعدد ٦ نبضات.

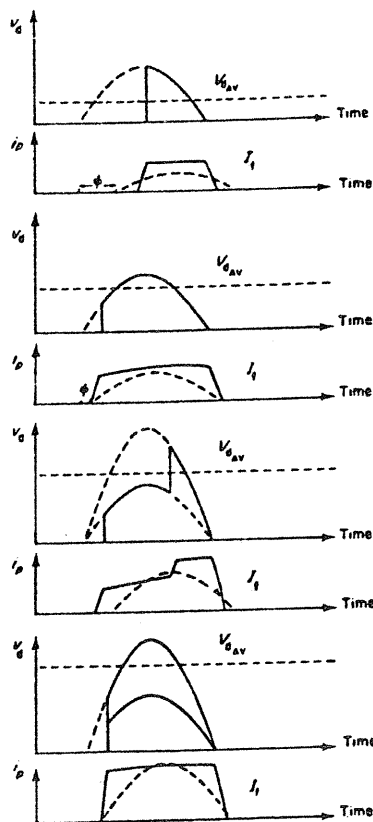
ويمثل شكل (٢-٧٩) جـ زاوية تأخير تساوى ١٥٠ وتشغيل زائف لعدد ٦ نبضات .

كما يمثل شكل (٢-٧٩) د زاوية تأخير تساوى ١٨٠ وتشغيل زائف لعدد ٦ نبضات

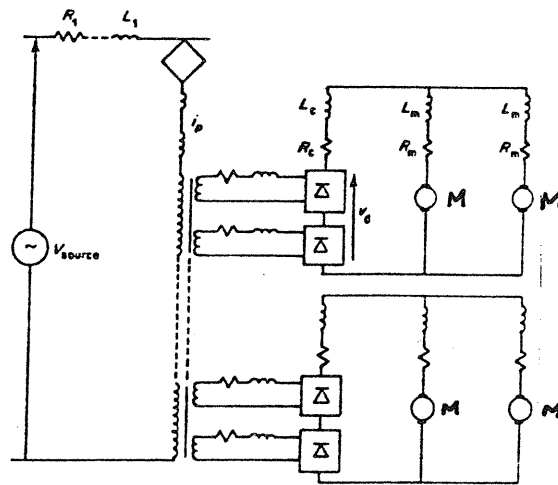
« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »



شکل (۶-۷۵)



مشکل (۷۷-۷۷)



شکل (۶۶-۹)

- ١٣٧ -

ومن الاستخدامات الاخرى للمبدلات ذات القدرات المتوسطة استخدام مبدل وعاكس لتشغيل محرك تيار متردد $a.c$ ، كما فى شكل (٢-٨٠) أ .

ويحتاج العاكس (*inverter*) لجهد تيار مستمر ثابت للحصول منه على موجة مترددة ويوضح شكل (٢-٨٠) ب مكونات عاكس تحكم سداسى ، وقد تم توصيل موحد على التوازي مع كل ثيريزتور كتغذية خلفية (*Feedback*) . وتستنتج معادلات الجهد باتباع جدول التشغيل التتابعى للثيريزتورات وموجات الجهد بشكل (٢-٨١) كالآتى :

بفرض أن V_A, V_B, V_C هى جهود الاوجه على اطراف المحرك فان جهد نقطة التعادل يكون :

$$V_N = \frac{1}{3} (V_A + V_B + V_C)$$

ويكون الجهد بين الوجه A ونقطة التعادل N

$$V_{AN} = V_A - V_N = \frac{1}{3} (2V_A - V_B - V_C)$$

وبفرض تساوى معاوقة الحمل للمحرك فان توافقيات الجهد V_{AN} للدرجة n تكون

$$\begin{aligned} V_{AN(n)} &= \frac{1}{3} (2V_{A(n)} - V_{B(n)} - V_{C(n)}) \\ &= \left[2V_{mn} \sin(n\omega_1 t) - V_{mn} \sin n(\omega_1 t + \frac{2\pi}{3}) - \right. \\ &\quad \left. V_{mn} \sin n(\omega_1 t - \frac{2\pi}{3}) \right] \end{aligned}$$

$$= \frac{2}{3} V_{mn} \sin n\omega_1 t (1 - \cos 2n\pi/3)$$

$$= \frac{2}{3} V_{A(n)} (1 - \cos 2n\pi/3)$$

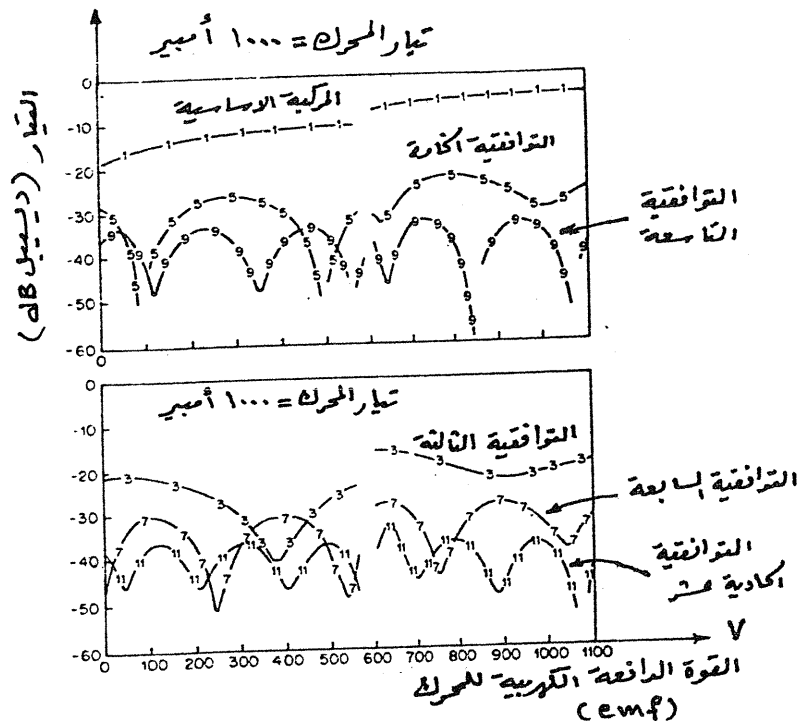
وبالمثل تكون توافقيات الجهد للوجهين B, C كالآتى

$$V_{BN(n)} = \frac{2}{3} V_{B(n)} (1 - \cos 2n\pi/3)$$

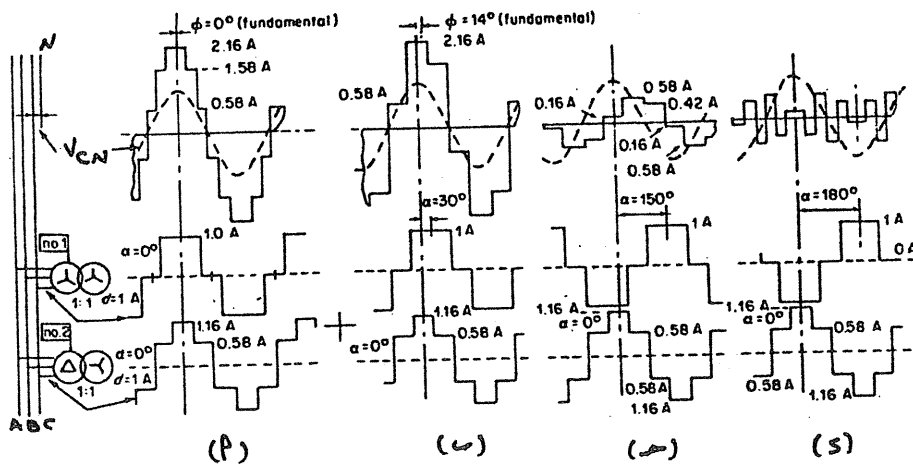
$$V_{CN(n)} = \frac{2}{3} V_{C(n)} (1 - \cos 2n\pi/3)$$

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٣٨ -



شكل (٧٨-٢)



شكل (٧٩-٢)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١٣٩ -

ولجميع توافقيات التتابعية السالبة والموجبة نجد أن

$$\cos 2n \pi / 3 = -\frac{1}{2}$$

وعلى ذلك

$$V_{AN(n)} = V_{A(n)}$$

$$V_{BN(n)} = V_{B(n)}$$

$$V_{CN(n)} = V_{C(n)}$$

ولنظام ثلاثى الوجة متزن ، فان لتوافقيات التتابعية الصفرية نجد ان

$$\cos 2 \pi n / 3 = 1$$

وعلى ذلك

$$V_{AN(n)} = V_{BN(n)} = V_{CN(n)} = 0$$

وتكون معادلة جهد الوجه للمحرك هي

$$V_p = \frac{2}{\pi} V_{bus} \sum \left\{ \frac{1}{(6k+1)} \sin(6k+1) \omega_1 t + \frac{1}{(6k+5)} \sin(6k+5) \omega_1 t \right\}$$

وبتحليل فوريير لمعادلة الجهد نجد عدم احتوائها على التوافقيات الثلاثية الفردية (Triplen) بينما تحتوى موجات جهود المدخل للعاكس على مركبات التوافقيات الثلاثية الفردية وتعتبر المحاثة المغناطيسية L_m للمحرك كمرشح تكاملى (Integrating Filter) لمرور التيار i_p نتيجة الجهد V_p ، اى ان

$$i_p = \frac{1}{L_m} \int_{t_0}^t V_p dt$$

وتكون معادلة توافقيات الجهد

$$V_{p(n)} = \frac{2}{\pi n} V_{bus} \sin(n \omega_1 t)$$

وعلى ذلك تكون معادلة توافقيات التيار

$$i_{p(n)} = \frac{2V_{bus}}{\pi n L_m} \int_{t_0}^t \sin(n \omega_1 t) dt = \frac{2V_{bus}}{\pi n^2 \omega_1 L_m} \cos(n \omega_1 t)$$

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٤٠ -

وتكون معادلة تيار المغنطة باستخدام معادلة الجهد V_p

$$i_p = \frac{2V_{bus}}{\pi \omega_1 L_m} \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(6k+1)^2} \cos(6k+1) \omega_1 t + \frac{1}{(6k+5)^2} \cos(6k+5) \omega_1 t \right]$$

بينما معادلة الفيض المغناطيسى للثغرة الهوائية ، لعدد لفات تساوى N للمحاثه المغناطيسية هي

$$\Phi_p = \frac{2V_{bus}}{\pi \omega_1 N} \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(6k+1)^2} \cos(6k+1) \omega_1 t + \frac{1}{(6k+5)^2} \cos(6k+5) \omega_1 t \right]$$

وبتحليل المعادلات Φ_p , i_p , V_p نحصل على التوافقيات منسوبة الى المركبة الاساسية كما فى جدول رقم (٢-١٤)

جدول (٢-١٤)

توافقية Φ_p كنسبة من المركبة الاساسية	توافقية i_p كنسبة من المركبة الاساسية	توافقية V_p كنسبة من المركبة الاساسية	درجة التوافقية n
١	١	١	١
٠,٠٤	٠,٠٤	٠,٢	٥
٠,٠٢	٠,٠٢	٠,١٤٣	٧
٠,٠٠٨	٠,٠٠٨	٠,٠٩١	١١
٠,٠٠٦	٠,٠٠٦	٠,٠٧٧	١٣
٠,٠٠٣	٠,٠٠٤	٠,٠٥٩	١٧
٠,٠٠٣	٠,٠٠٣	٠,٠٥٣	١٩
٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٤٣	٢٣
٠,٠٠٢	٠,٠٠٢	٠,٠٤٠	٢٥

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٤١ -

٣ - المبدلات ذات القدرات الصغيرة *Low Power Convertors*

من الاحمال ذات المبدلات منخفضة القدرة والتي تكون مصدراً للتوافقيات هي :

- أجهزة التلفزيون والحاسبات الآلية .

- شاحن البطاريات

وفيما يلي توضيح مبسط لكل منهما

- أجهزة التلفزيون (Television sets)

تحتوى دائرة تغذية التلفزيون على موحّدات ومكثف تنعيم ذو درجة عالية . ففي الاجهزة القديمة تحتوى دائرة الاستقبال على دائرة توحيد نصف موجة والتي تنتج جهد مستمر يحتوى على توافقيات ويوضح شكل (٨٢-٢) قياسات لفترة زمنية محددة ، لحول من جهة الجهد المتوسط ، ويلاحظ حدوث أقصى قيمة للتوافقيات عند نفس الزمن (t_1) ويحتوى الحمل المقاس على التوافقيات الثانية والثالثة والرابعة والخامسة .

وقد استخدم بعد ذلك موحّدات الموجة الكاملة ، كما فى شكل (٨٣-٢) ، تبعها اضافة ثيريزتورات ثم التحكم فى اشارة اشعالها لى تحدث بعد قيمة الذروة الرئيسية وذلك حتى يكون للنواثر الكهربائية الغذاء من الثيريزتورات قيمة ذروة اقل ، وهذا يؤدى الى نبضات فى موجات التيار تحتوى على مركبات توافقيات عالية .

ويستهلك مستقبل التلفزيون الملون تيار ذروة اكبر مرتين او ثلاثة مرات من التيار المستهلك لمستقبل التلفزيون ذى الصورة المكونة من لونين ((ابيض - اسود) .

وبأجراء تحليل "فورير" لموجة التيار الموضحة بشكل (٨٣-٢) نجد انها تحتوى على التوافقيات تبعاً للمعادلة الآتية .

$$I_n = \frac{8 \alpha I}{\pi} \sum_n \frac{\cos n\alpha\pi}{1 - \pi^2 \alpha^2 n^2} \cos n\omega t$$

حيث

$$n = 1, 3, 5, \dots, \infty$$

$$\alpha = \frac{\theta}{T}$$

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٤٢ -

ويوضح شكل (٢-٨٣) القيم I, T, θ

وتتراوح قيمة α بين ٠,٠٨ الى ٠,١٨ لمجموعات التليفزيونات ، بصرف النظر عن دوائر تغذيتها

وتختلف قيم تيارات التوافقيات بمجموعات التليفزيونات تبعاً لنوع دائرة المستقبل (receiver) بالتليفزيون ، ويوضح جدول (٢-١٥) قيم تيارات التوافقيات الفردية تبعاً لنوع دائرة المستقبل .

جدول (٢-١٥)

نوع المستقبل				درجة التوافقية
تليفزيون ملون		تليفزيون ابيض / اسود		
ثيريزتورات Thyristors	قنطرة ديودات diode bridge	ترانزستورات Transistors	صمامات Tubes	
٠,٨٢	٠,٧٣	٠,٣٢	٠,٥٣	٣
٠,٦٦	٠,٥٩	٠,٢٥	٠,٣١	٥
٠,٣٤	٠,٤٣	٠,١٥	٠,١٣	٧
٠,١٤	٠,٢٧	٠,٠٨	٠,٠٥٥	٩
٠,٠٩	٠,١٥	٠,٠٤	٠,٠٤٥	١١
٠,٠٤	٠,٠٤٥	٠,٠٣	٠,٠٣	١٥

ويلاحظ من جدول (٢-١٥) الآتى :

- ارتفاع قيم التوافقية الثالثة .
- قيم التوافقيات بالتلفزيونات الملونة اكبر من القيم المقابلة بالتليفزيون ابيض / اسود .

- ارتفاع قيم التوافقيات الثالثة والخامسة لمستقبل من الثيرونات

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٤٣ -

كذلك تختلف قيم التوافقيات اذا وصل اكثر من تليفزيون على التوازي ، كما فى

جدول (٢-١٦)

جدول (٢-١٦)

درجة التوافقية					عدد التليفزيونات / وجه	
١	٧	٥	٣	١		
٠,٠٩	٠,٢٩	,٤٨	,٦٧	,٨	التيار $I_1 (A)$	١
٠,٧	١,٧	٣,٥	٥,٨	٨	تيار التعادل $I_{10}(A)$	١٠
٠,٧٧	٠,٥٨	٠,٧٣	,٨٦	١	النسبة $\frac{I_{10}}{10 I_1}$	
٢,١	٠,٦	٠,٧	١٧,٤	١	تيار الوجه $I_{10} (A)$	
٢,٣	٠,٢	,١٤	٢,٦	,١٢	النسبة $\frac{I_{10}}{10 I_1}$	
١,٧	٣,٨	١٣,٢	٣٧,٦	٦٤	تيار التعادل $I_{80}(A)$	٨٠
٠,٢٣	٠,١٦	٠,٣٤	٠,٧	١	النسبة $\frac{I_{80}}{80 I_1}$	
٤,٦	٠,٩	٣	١١٦	٩,٦	تيار الوجه $I_{80} (A)$	
٠,٦٣	٠,٠٤	٠,٠٨	٢,١	,١٥	النسبة $\frac{I_{80}}{80 I_1}$	

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٤٤ -

شاحن البطاريات

يحول الشاحن الجهد المتردد (a.c) الى مستمر (d.c) ويتم به شحن البطاريات ويوضح شكل (٢-٨٤) أ دائرة شاحن بطاريات يستخدم فى المركبات الكهربائية (Electric vehicle battery charge) ويعتمد حدوث التوافقيات على الجهد الابتدائى للبطارية ، وتنتج التوافقيات الكلية من مجموعة الشواحن المتصلة على نفس القضبان اعتماداً على الزمن والاحتمالات العشوائية للتشغيل .

من شكل (٢-٨٤) ب ، يحدث التوصيل عندما تكون V اكبر من E وعلى ذلك فان الزاوية θ تساوى

$$\theta = \sin^{-1} \frac{E}{V}$$

وتكون معادلة تيار الشحن كالآتى

$$I = \frac{V_m}{R} \left\{ \sin(\omega t - \Phi) - \sin(\theta - \Phi) - \frac{\sin \theta}{\cos \Phi} \exp [(\theta - \omega t) \cot \Phi] - \frac{\sin \theta}{\cos \Phi} \right\}$$

حيث $\theta < \omega t < \gamma$

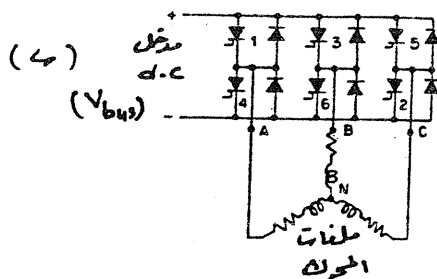
ويوضح شكل (٢-٨٤) ب ايضاً موجة تيار المغنطة للمحول (i_m) ونتيجة وجود التوافقيات يصبح التيار المغذى لمجموعة الشاحن غير جيبي ، اى تظهر التوافقيات موجة الجهد .

المبدل الدورى (Cycloconverter)

يستخدم هذا النوع من المبدلات لتغذية المحركات المتزامنة الكبيرة مثل المستخدمة فى عمليات الدرافيل الاتبويية (tube mills) فى صناعة الاسمنت ، ويعرف المبدل الدورى بانه جهاز تحويل الطاقة ونحصل منه على قدرة استاتيكية عند تردد مختلف عن تردد المصدر . ويوضح شكل (٢-٨٥) مكونات المبدل الدورى وهو عبارة عن زوجين من المبدلات كل منهما مبدل ذو نبضات ، ومتصلين على التوازي عكسياً ، ويتم التحكم فى المبدل عن طريق تغيير زمن نبضات اشعال الثيريزتورات ، وبذلك نحصل على جهد متردد من المبدل كما فى شكل (٢-٨٦) أ لدائرة مبدل ٦ نبضات - زاوية ازاحة 60° - نسبة التموجات (r) تساوى ٥ ، وتعتمد موجة تيار المخرج على الحمل . ويوضح شكل (٢-٨٦) ب موجة تيار المخرج . بينما يوضح شكل (٢-٨٦) ج تتابع تشغيل القنطرة رقم (١) ويوضح شكل (٢-٨٦) د تتابع تشغيل القنطرة رقم (٢) . ويحتوى تيار المدخل الموضح

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

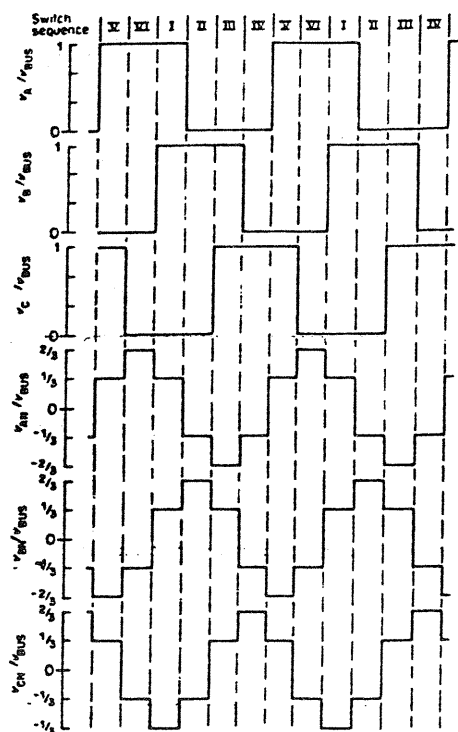
- ١٤٥ -



I	II	III	IV	V	VI
1	2	3	4	5	6
2	3	4	5	6	1
3	4	5	6	1	2

جدول تتابعين لتفعيل
الثيريزتورات

شكل (١٠-٢)



موجة جهد الوجه A

موجة جهد الوجه B

موجة جهد الوجه C

موجة الجهد بين A, N

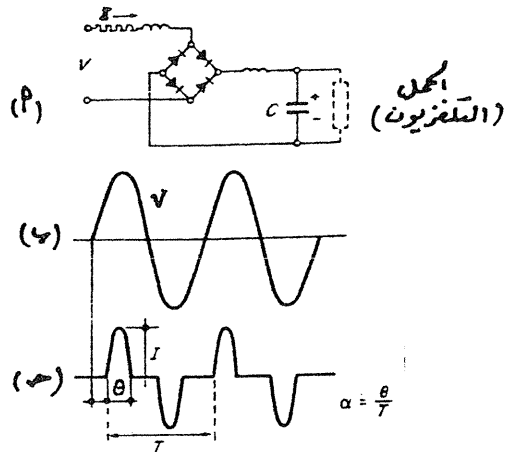
موجة الجهد بين B, N

موجة الجهد بين C, N

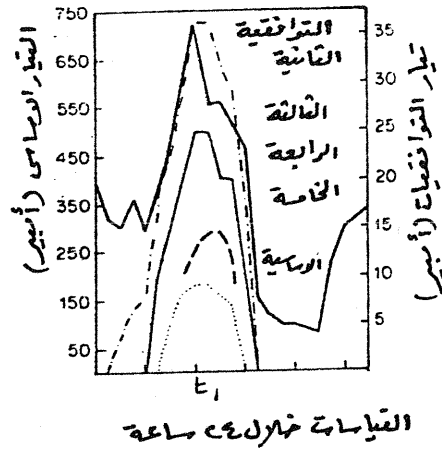
شكل (١١-٢)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

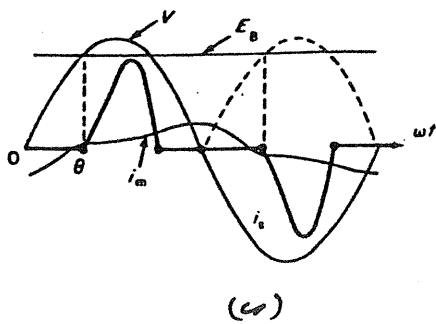
- ١٤٦ -



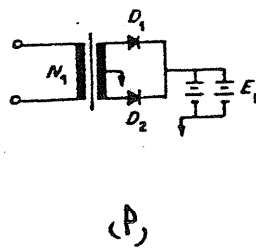
شكل (٨٣-٩)



شكل (٨٤-٩)



شكل (٨٥-٩)



« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١٤٧ -

بشكل (٢-٨٧) ، للمبدل الدورى على توافقيات لها تردد تبعاً للمعادلة

$$f_{har} = (kp + 1)f + 6mf_2$$

$$or \dots\dots\dots (1)$$

$$n = (kp + 1) + 6m \frac{f_2}{f}$$

حيث

$$p = \text{عدد النبضات}$$

$$f_2 = \text{تردد مخرج المبدل الدورى}$$

$$f = \text{التردد الاساسى للمصدر}$$

$$n = \text{الاعداد الترتيبية للتوافقيات} = \frac{f_{har}}{f}$$

$$k = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots\dots\dots$$

$$n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots\dots\dots$$

تتكون معادلة تردد التوافقيات من الجزئين التاليين :

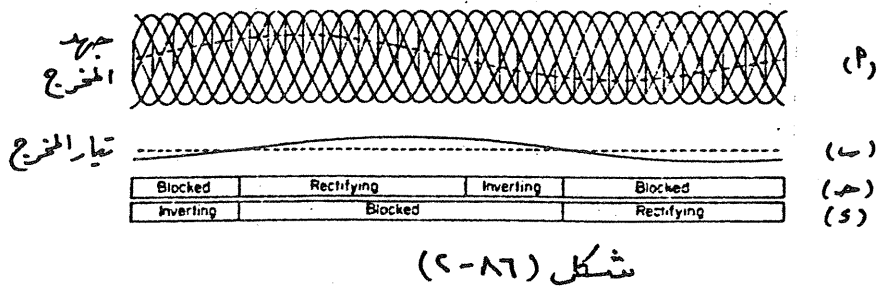
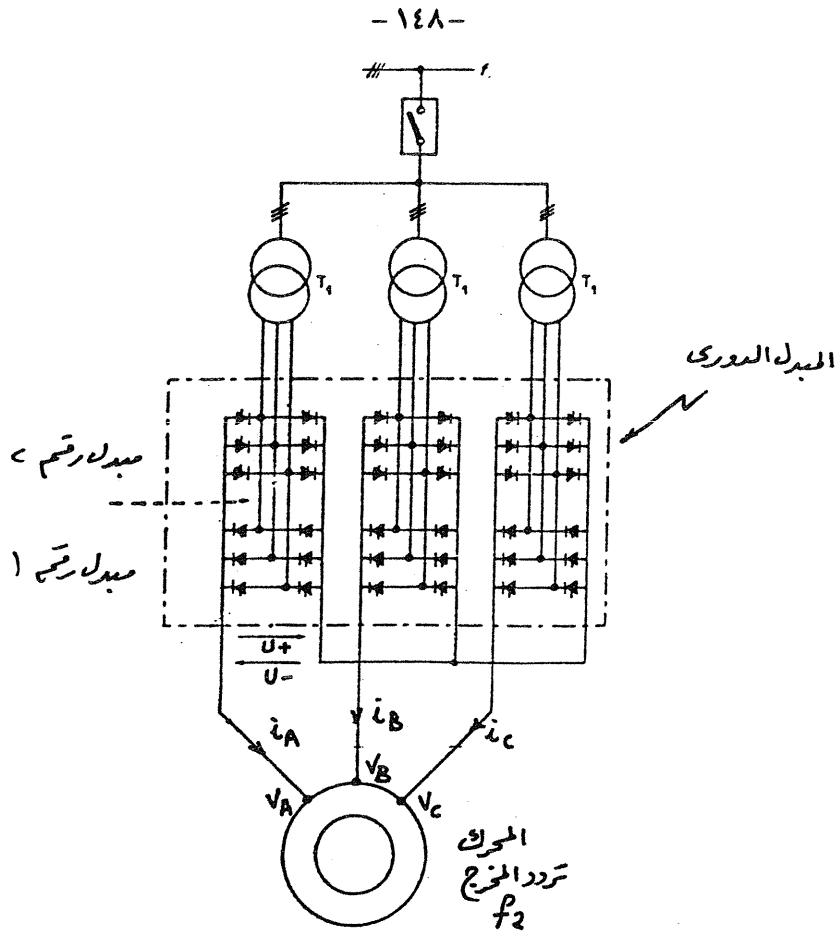
- الجزء الاول $(kp + 1)$ عبارة عن الاعداد الترتيبية نتيجة الموحداث.

- الجزء الثانى $(6m \frac{f_2}{f_1})$ يمثل النطاق الجانبي (sidebands) للتوافقيات الاولى ، ويتغير العرض width مع التردد f_2 أى مع سرعة المحرك. يفضل استخدام طريقة الطيف الترددى (Frequency spectrum) عن استخدام تحليل فوريير لرسم العلاقة بين تردد التوافقيات ونسبة تيار التوافقيات فمثلاً يوضح شكل (٢-٨٨) هذه العلاقة لمبدل دورى - ٦ نبضات - ثلاثة أوجه تردد المخرج ٥ هرتز ، وتردد المدخل ٦٠ هرتز .

بينما يوضح شكل (٢-٨٩) أ العلاقة بين تيار التوافقيات كنسبة من التيار الاساسى (I_n / I_1) والاعداد الترتيبية n من العلاقة رقم (١) وذلك عند تردد مخرج يساوى ٥ ، ٣ هرتز . كذلك يوضح شكل (٢-٨٩) ب العلاقة بين $n_1 = 5, 7, 11, 13$ وتردد المخرج للمبدل تبعاً للمعادلة (١) ايضاً

ويسبب المبدل الدورى ذات السرعات المتغيره مشاكل خطيرة ، نتيجة تغيير تردد المخرج عند تغيير السرعة ، وبالتالي فان الطيف الترددى يتغير وعلى ذلك تكون

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »



« التوافقية في الشبكات الكهربائية »

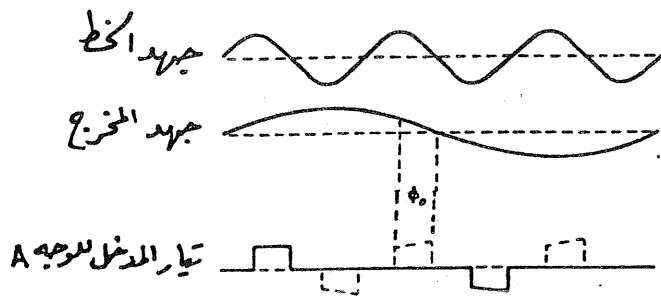
- ١٤٩ -

مرشحات التوليف (*tuned filters*) غير فعالة .

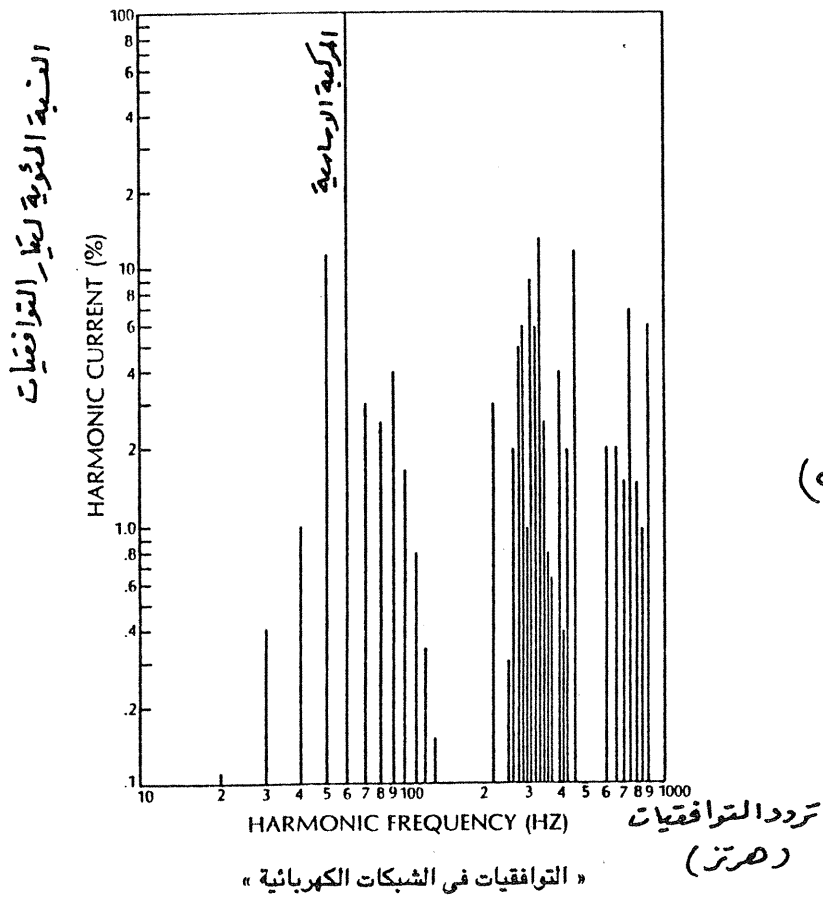
تضمين نبضة مندفعة (*Pulse - Burst Modulation*)

يستخدم هذا النظام فى الافران (*ovens, furnaces*) والسخانات اللولبية (*die heaters*) وماكينات اللحام النقطى (*spot welders*) بدلاً من نظام التحكم فى الزاوية. تسلط موجة التيار ، نبضة مندفعة، كما فى شكل (٩٠-٢) أ على بوابة الثيريزتورات ويحتوى تيار هذه الدائرة على توافقيات ، فمثلاً لوحدة ثلاثية الوجة (٦٠٠ فولت و ٢٠٠٠ فولت) تتحكم فى افران قدرتها ٢ م . وات وسجلت تيارات التوافقيات والتردد كما فى شكل (٩٠-٢) ب وتؤثر هذه التوافقيات على متممات الوقاية ومحولات التيار وتسبب مرور نبضات تيار عالية فى مسار التعادل لشبكة التوزيع .

- ١٥٠ -

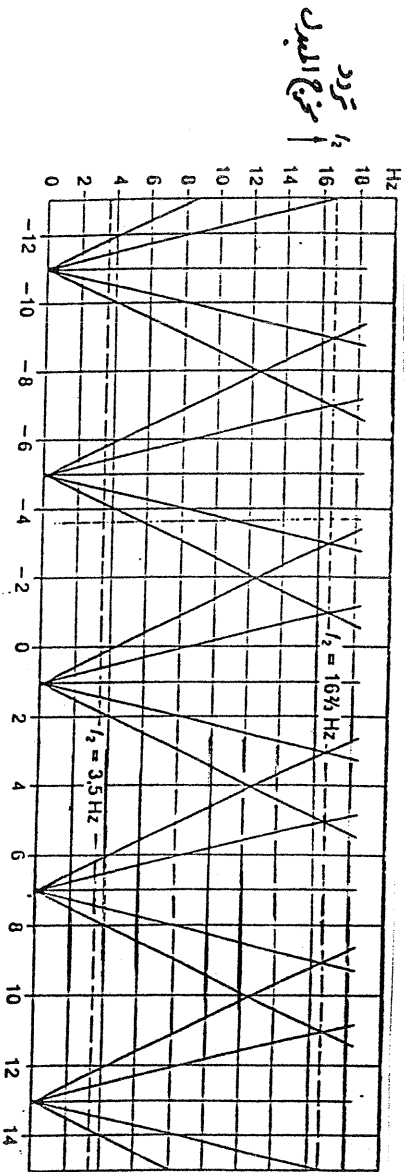
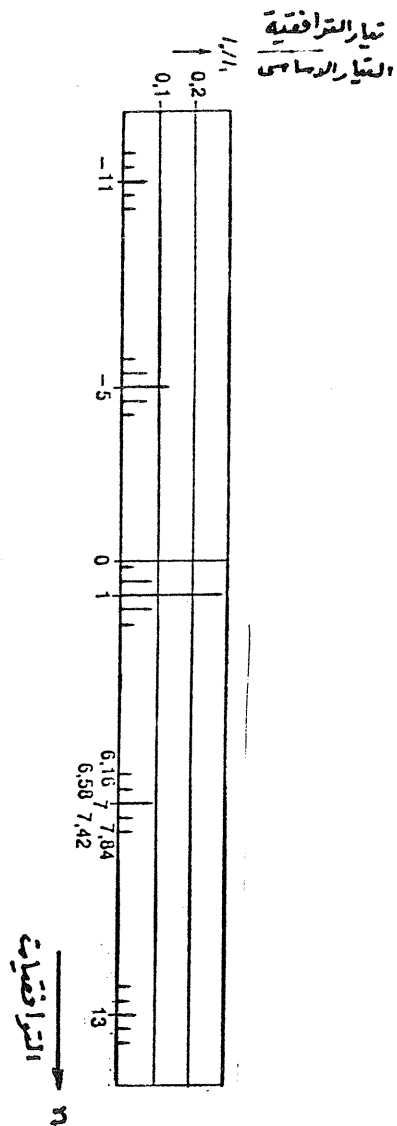


شكل (٨٧-٢)



شكل (٨٨-٢)

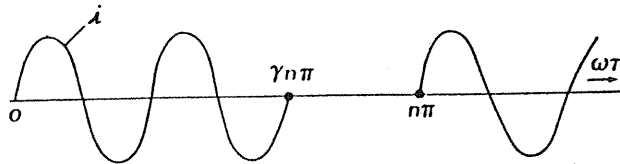
- ١٥١ -



شكل (٨٩-٢٠)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

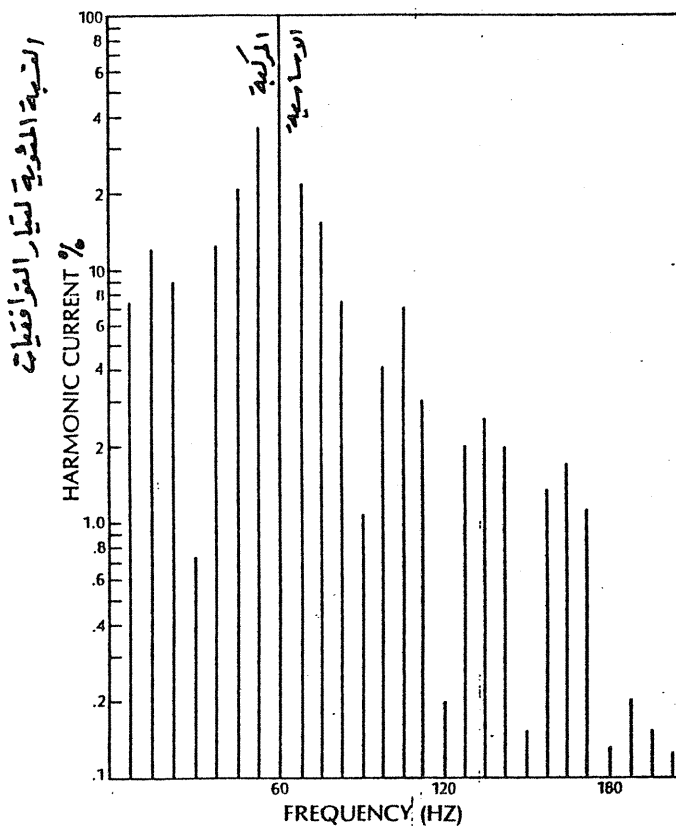
- ١٥٢ -



$$n = 6, \delta = 4/6$$

$$\delta = 6/8$$

(٨)



(٩)

تردد التوافقيات (هرتز)

شكل (٩-٢)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١٥٢ -

الباب الثالث

تأثير التوافقيات

Effect of Harmonics

على مدى اكثر من ٥٠ عاماً ، تم تسجيل وتحليل ومناقشة التوافقيات المسببة للمشاكل فى الشبكات الكهربائية وشبكات الاتصالات وتأثيرها ، وقد تلاحظت التأثيرات التالية :

- ١ - انصهار مصهرات مكثفات القدرة او حدوث انهيار لعزل المكثفات .
- ٢ - مفقودات عالية وسخونة فى الآلات المتزامنة والتأثيرية .
- ٣ - ارتفاع فى الجهد وزيادة فى الحمل نتيجة رنين جهود او تيارات التوافقيات بالشبكة الكهربائية .
- ٤ - انهيار عزل الكابلات نتيجة توافقيات الجهود المرتفعة فى النظام .
- ٥ - التداخل بالتأثير مع نظم الاتصالات عن بعد .
- ٦ - اخطاء فى قراءات عدادات الكيلوات ساعة التأثيرية .
- ٧ - حدوث تداخل فى الاشارات والفصل الخاطى لمتنمات الوقاية خاصة التى تعمل بنظم التحكم بالميكروبروسيسور (*Microprocessor controlled*) وايضاً بالنظم المحتوية على عناصر استاتيكية (*Solid state*) .
- ٨ - حدوث تداخل مع اجهزة تحكم المحركات الكبيرة (*motor controllers*) ومع نظم الاثارة (*excitation*) بمحطات التوليد .
- ٩ - حدوث اهتزازات ميكانيكية بالآلات المتزامنة والتأثيرية .
- ١٠ - التشغيل غير المستقر (*unstable*) لدوائر الاشتعال (*Firing circuit*) المستخدمة فى كاشف النقاطع الصفرى لموجة الجهد (*Zero voltage crossing detector*)

عموماً يصنف تأثير التوافقيات الى قسمين هما :

التأثير على الشبكة الكهربائية - والتداخل مع دوائر الاتصالات .

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٥٤ -

أولاً - تأثير التوافقيات على مكونات الشبكة الكهربائية

تتمثل التأثيرات الرئيسية لتوافقيات التيار والجهد على الشبكات الكهربائية في :

- نتيجة رنين التوازي والتوالي (Series and parallel resonances) يحدث تكبير لمستويات التوافقيات .
- تقل كفاءة توليد ونقل واستخدام القدرة .
- انهيار العزل في المعدات الكهربائية .
- التشغيل الخاطئ للمعدات .

ويحدث الرنين فقط عند تردد محدد لمصدر الطاقة وهو تردد رنين الدائرة وتوجد حالتين للرنين : رنين الجهد او رنين التوالي (Voltage or series resonance) ، ورنين التيار او رنين التوازي (Current or parallel resonance) .

يوضح شكل (١-٣) أ الدائرة المكافئة لدائرة رنين الجهد او التوالي والتي تتكون من العناصر R, L, C والمتصلة على التوالي مع مصدر التغذية ، وتعتمد قيم ممانعة الملف X_L وممانعة المكثف X_C على التردد الزاوي ω ، أي ان

$$X_L = \omega L \quad , \quad X_C = \frac{1}{\omega C}$$

عند رنين الجهد يتحقق الآتي

$$X_L = X_C \quad , \quad \omega = \omega_s$$

او

$$\omega_s L = \frac{1}{\omega_s C} \quad \therefore \text{التردد الزاوي للرنين} = \omega_s = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$\text{تردد الرنين} = f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

ويمكن حدوث الرنين للدائرة بطريقتين مختلفتين هما :

إما تغيير قيم C, L (احدهما او الاثنین معاً) عند ثبوت تردد المصدر .

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١٥٥ -

او تغيير قيمة تردد المصدر عند ثبوت قيم C, L

نلاحظ منحنى العلاقة بين (ω, X_L) , (ω, X_C) من شكل (٣-١) ب وعند تساوى X_C , X_L , تصبح $Z = R$, $\omega = \omega_s$, بينما عندما $\omega < \omega_s$ تتغلب قيمة X_C مؤدية الى زيادة المعاوقة مصحوبة بانخفاض التردد .

وعندما $\omega > \omega_s$, تتغلب قيمة X_C مؤدية الى زيادة المعاوقة مصحوبة بزيادة فى التردد ويوضح شكل (٣-١) ج منحنيات رنين الجهد .

وينفس التتابع يوضح شكل (٣-٢) مكونات دائرة رنين التيار او التوازي ومنحنى العلاقة بين مقلوب المعاوقة (*Susceptance*) ويرمز لها $y = I/Z$ والتردد الزاوى ω كذلك العلاقة بين التيارات I, I_L, I_C مع التردد الزاوى ω .

ويتحقق حالة الرنين للدائرة عندما

$$y_L = \frac{1}{\omega L} \quad , \quad y_C = \omega C \quad , \quad \omega = \omega_p$$

او

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

وتحدث ببساطة نفس الحالتين السابقتين فى الشبكات الكهربائية فمثلاً تبعاً لطريقة توصيل مكثفات القدرة فى الشبكة تحدد ما اذا كان الرنين توالى او توازى .

وفيما يلى توضيح للحالتين فى الشبكات الكهربائية .

(رنين التوازي (*Parallel resonance*)

يمثل رنين التوازي ، نتيجة المعاوقة العالية ، مصدراً للتوافقيات عند تردد الرنين .

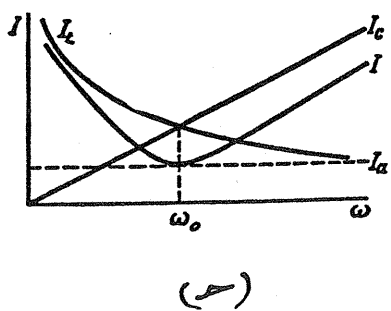
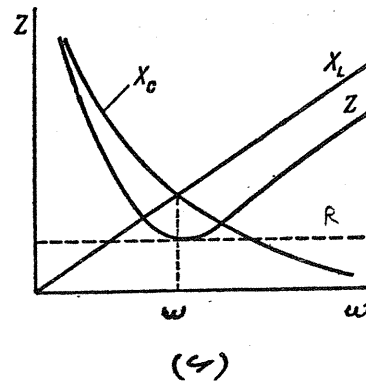
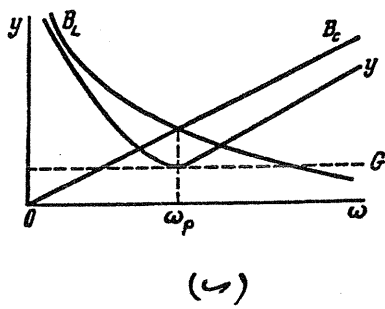
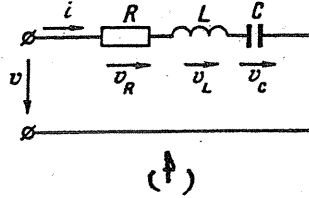
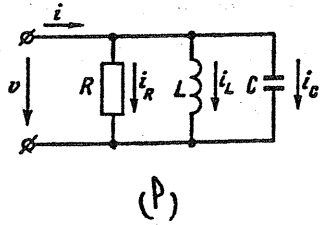
يحدث رنين التوازي بطرق مختلفة ابسطها عند توصيل مكثفات على نفس قضبان مصدر التوافقيات وفى هذه الحالة يكون رنين التوازي بين المصدر والمكثف ويوضح شكل (٣-٣) اماكن مختلفة لتركيب مكثفات على التوازي .

وبفرض ان : p_s مقنن دائرة القصر للمصدر (*MVA*) .

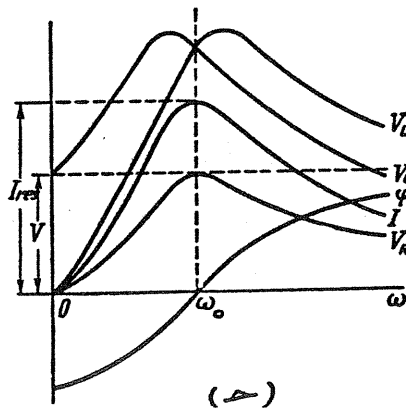
P_c مقنن المكثف (*MVar*)

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٥٦ -



شكل (٣-٢)



شكل (٣-١)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١٥٧ -

$f =$ التردد الاساسى للمصدر (هرتز)

$f_p =$ تردد رنين التوازي (هرتز)

فان معادلة تردد رنين التوازي تكون

$$f_p = f \sqrt{\frac{P_s}{P_c}}$$

فى الشكل (٣-٤) تم تمثيل جزء من شبكة كهربائية تحتوى على مصدر توافقيات

$$X_{sn} = \frac{n E^2}{P_s} \quad \text{بدائرة رنين توازي وتكون ممانعة الشبكة عند التردد } n \text{ هى}$$

$$X_{cn} = \frac{E^2}{nP_c} \quad \text{وتكون ممانعة المكثف عند التردد } n \text{ هى}$$

ولايجاد حالة الرنين بشبكة معينة يجب اخذ قياسات لتيارات التوافقيات لكل حمل للمشاركين والمصدر مع قياسات جهد التوافقية عند القضبان . وعلى العموم ، اذا كان التيار المار الى المصدر من القضبان صغيراً وجهد التوافقيات عالياً ، فهذا لايشير الى رنين فى شبكة المصدر .

بينما اذا كان تيار التوافقيات المار فى الاحمال A كبيراً ومتقدماً (Lead) على جهد التوافقيات عند القضبان ، فهذا يشير الى رنين محاث المصدر وسعوية الحمل .

ويوضح شكل (٣-٥) مثلاً آخر لرنين التوازي والدائرة المكافئة له .

وبتقسيم تيار التوافقيات i_n بين المصدر والمكثف اي ان

$$i_n = i_{sn} + i_{fn} \quad i_{sn} = \frac{Z_f}{Z_f + Z_s} i_n = \rho_s i_n$$

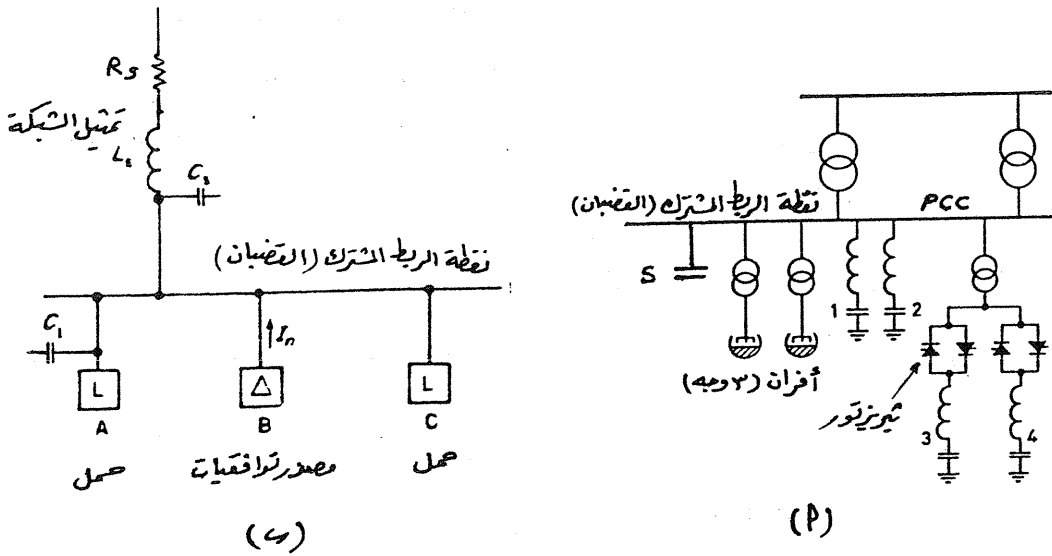
$$i_{fn} = \frac{Z_s}{Z_f + Z_s} i_n = \rho_f i_n$$

حيث : ρ عامل التوزيع (Distribution Factor)

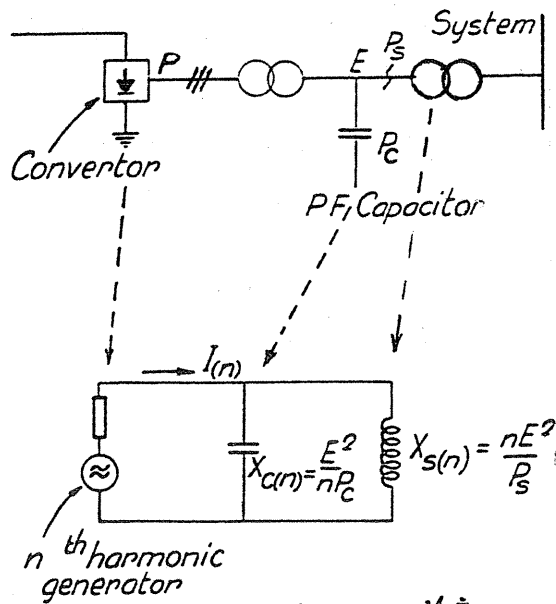
وبفرض ان :

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٥٨ -



شكل (٣-٣)



شكل (٣-٤)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١٥٩ -

$$E = \text{جهد القضبان} = 13.8 \text{ kv}$$

$$P_s = \text{مستوى قصر الدائرة} = 479 \text{ MVA}$$

$$P_c = \text{قدرة المكثف} = 19.04 \text{ MVar}$$

$$\frac{X_s}{R_s} = 10 \quad \text{للشبكة}$$

ونحصل على معاملات الدائرة كالتالى :

$$X = \frac{kV^2}{MVA_{s.c}}$$

وتكون ممانعة الشبكة عند التوافقية n

$$X_s = \frac{n kV^2}{MVA_{s.c}} = \frac{n (13.8)^2}{476} = 0.4 n$$

وتكون ممانعة المكثف عند التوافقية n

$$X_{fc} = \frac{(13.8)^2}{19.04 n} = \frac{10}{n}$$

$$R_s = \frac{X_s}{10} = 0.04 n$$

وفى الشكل (٣-٥) ب بفرض عدم وجود مفاعلة التوليف (tuning reactor) فان

$$X_f = X_{fc}$$

$$\rho_f = \frac{0.04 + j 0.4}{0.04 + j (0.4 - \frac{10}{n^2})}$$

$$\rho_s = \frac{-j 10 / n}{(0.04 + j 0.4) n - j 10 / n}$$

ولورسمنا العلاقة بين كل من ρ_s , ρ_f مع درجة التوافقيات n نحصل على شكل

(٣-٦) أ ، ومنه نجد ان رنين التوازي بين المكثف والمصدر عند التوافقية

الخامسة ($n=5$) ، [اى عندما $\rho_s \simeq \rho_f$] .

واذا اضيفت ممانعة ملف التوليف (X_{fl}) (وهى حالة مرشح للتوافقية الخامسة) فان

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٦٠ -

$$X_{fl} = \frac{X_{fc}}{n} = \frac{10}{n^2} = \frac{10}{25} = 0.4 \Omega$$

وفى حالة اضافة X_{fl} لمعادلتى ρ_s , ρ_f يمكن رسم العلاقة مع درجة التوافقية n كما فى شكل (٣-٦) ب ويلاحظ ان $\rho_f = 1$ عند $n=5$ ويتغير موضع رنين التوازي الى حوالى $n = 3.5$.

ويوضح شكل (٣-٧) أ مثلاً أكثر تعقيداً لجزء من الشبكة الكهربائية يغذى بمصدر للتوافقيات على القضبان رقم ١ ، وتكون تيارات التوافقيات هي i_{c1n} فى المكثف رقم ١ و i_{c2n} فى المكثف رقم ٢ وبالتالي يوجد عاملين توزيع هما ρ_{f1} , ρ_{f2} ويتسجيل العلاقة بين ρ_{f2} , ρ_{f1} مع التردد (هرتز) كما فى شكل (٣-٧) ب نجد اختلاف هذه المنحنيات اذا تم عزل اى من المكثفين .

(رنين التوالى) (Series resonance)

فى شكل (٣-٨) ثم توصيل مكثف على التوازي مع حمل ، وعند الترددات العالية يهمل الحمل وتقل قيمة المعاوقة السعوية ، عندئذ يحدث رنين التوالى

تبعاً للمعادلة :

$$f_s = f \sqrt{\frac{P_t}{P_c Z_t} - \frac{P_t^2}{P_c^2}}$$

حيث : f_s تردد رنين التوالى (HZ)

P_t قدرة المحول

Z_t معاوقة المحول (p.u)

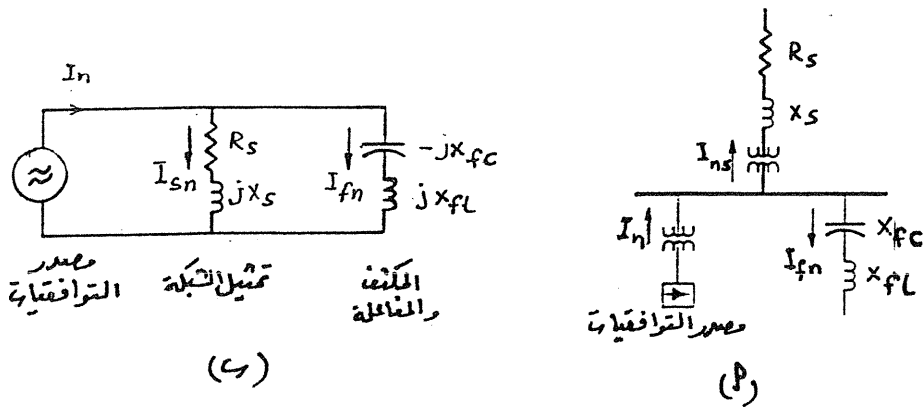
P_t قدرة الحمل (مقاومة)

ونتيجة لذلك تمر تيارات عالية بالمكثف عند حدوث توافقيات فى الجهد صغيرة نسبياً . وعموماً اذا حدث رنين فانه يؤدي الى :

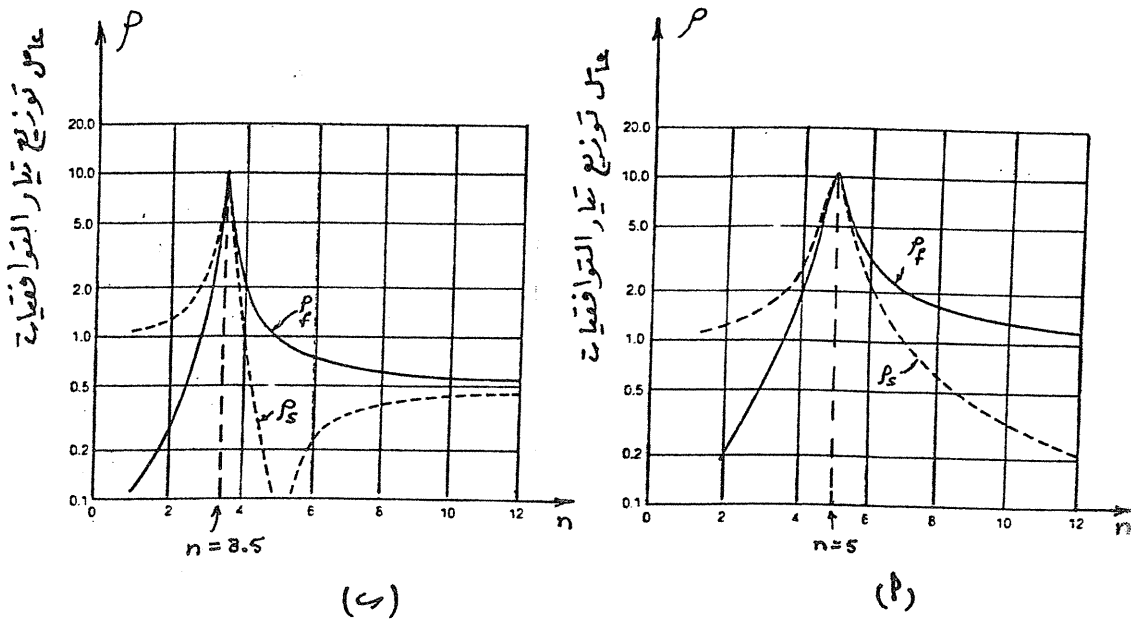
- سخونة زائدة على المكثفات تؤدي الى انهيارها
- سخونة مصهرات المكثفات ثم انفجارها .
- زيادة اجهادات الجهد على المكثف .

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٦١ -

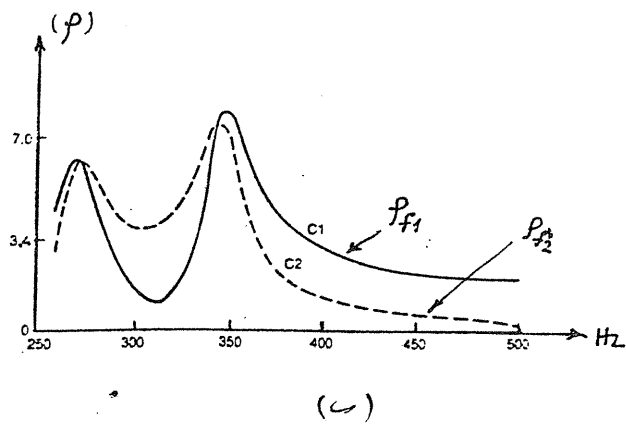
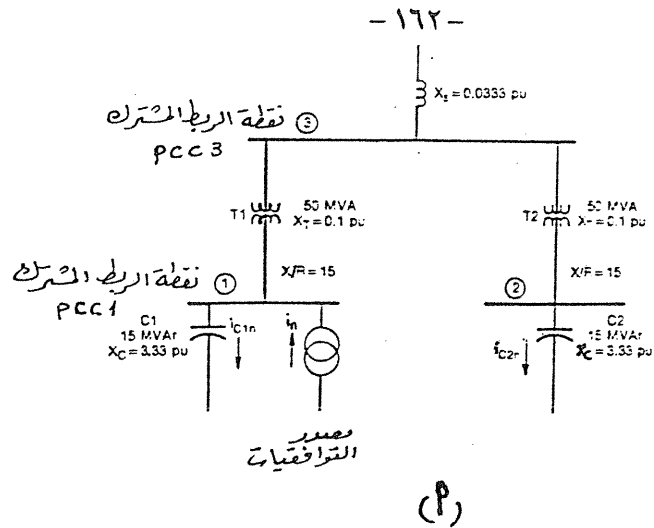


شكل (٥-٣)

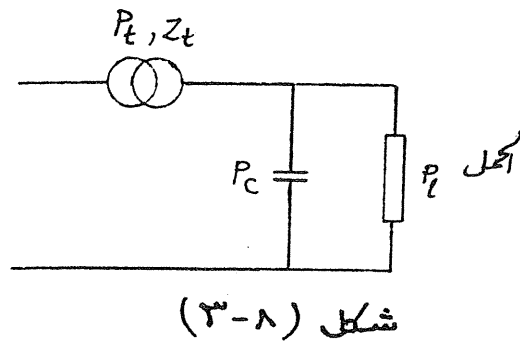


شكل (٦-٣)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »



شكل (٧-٣)



« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١٦٣ -

١ - تأثير التوافقيات على الآلات الدوارة

تحدث تيارات التوافقيات سخونة زائدة على الآلات الدوارة خاصة المولدات المتزامنة ذات الاقطاب غير البارزة (*nonsalient-pole*) وتنتج تيارات التوافقيات قوة دافعة مغناطيسية (*magnetomotive force*) تسبب مرور التيارات في سطح الاقطاب وفي النهاية تحدث سخونة زائدة . ويدور العضو الدوار (*rotor*) في الاتجاه الامامى نتيجة حدوث درجات التوافقيات ٦ ، ١٢ ، ... الحادثة من توافقيات التتابعية الموجبة وهى : ٧ ، ١٣ ، ... ، بينما التوافقيات نتيجة التتابعية السالبة وهى ٥ ، ١١ ، ... تحدث دوران للعضو الدوار في الاتجاه المضاد وتنتج مرة اخرى درجات التوافقيات ٦ ، ١٢ ، ... وتكون المحصلة النهائية حدوث مجال مغناطيسى نابض (*pulsating*) يؤدى الى حدوث سخونة في بعض المواضع على العضو الدوار .

يكون التأثير على المحركات التأثيرية اقل من المولدات المتزامنة ذات الاقطاب غير البارزة . عموماً تحدث تيارات التوافقيات الزائدة سخونة على المحركات التأثيرية خاصة عندما تكون متصلة بشبكة تحتوى على مكثفات تحدث رنين .

كذلك تحدث توافقيات الجهد او التيار زيادة في مفقودات كل من ملفات العضو الثابت (*Stator*) ، ودائرة العضو الدوار ، وشرائح القلب للعضوين . وتكون مفقودات ملفات العضو الثابت والعضو الدوار كبيرة نتيجة التيارات الاعصارية (*eddy currents*) والظاهرة السطحية (*skin effect*) .

كما تنتج مفقودات اضافية نتيجة مجالات التسرب الحادثة من مرور تيارات التوافقيات في نهايات الملفات للعضو الثابت والمتحرك .

وفي المحركات التأثيرية ذات العضو الدوار المتخالف (*Skewed rotors*) [قطرة غير موازى لمحور الدوران] يتغير الفيض في كل من العضو الدوار والعضو الثابت وتنتج من الترددات العالية مفقودات جديدة تعتمد قيمتها على الفيض المتخالف وعلى خاصية فقد الحديد للشرائح تودى في النهاية الى حدوث سخونة زائدة في المحركات .

وتخضع مفقودات النحاس W_c للمعادلة الآتية :

$$W_c = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 R_n$$

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١٦٤ -

حيث :

I_n أقصى قيمة لتيار التوافقية من الدرجة n

R_n مقاومة الملفات عند التوافقية n

وتخضع مفقودات التخلفية (*Hysteresis losses*) W_h تبعاً للمعادلة الآتية :

$$W_h = K_1 B_{\max}^x f \quad \text{watts / lb}$$

حيث :

k_1 = ثابت يعتمد على المادة الحديدية المستخدمة

$B_{\max}$ = أقصى كثافة فيض (*Flux density*)

x = ثابت (ويؤخذ عادة ١,٦)

f = التردد الاساسى (٥٠ هرتز او ٦٠ هرتز)

بينما تعرف مفقودات التيارات الاعصارية (*Eddy-current losses*) W_e من المعادلة الآتية :

$$W_e = K_2 b^2 B_{\max}^2 f^2 \quad \text{watts / lb}$$

حيث :

k_2 = ثابت يعتمد على نوع المادة الحديدية المستخدمة

b = سمك الشرائح

تؤثر توافقيات التيار الموجودة فى العضو الثابت للآلات الترددية (*a.c*) على الحركة (اى تتغير قيمة انزلاق التوافقية الموجبة S_n) ، وتؤدى الى زيادة عزم عمود الدوران فى نفس اتجاه سرعة مجال التوافقيات ، وعلى ذلك فإن جميع توافقيات التتابعية الموجبة تحدث عزم دوران فى اتجاه عزم عمود الدوران بينما تحدث توافقيات التتابعية السالبة تأثيراً فى الاتجاه المضاد .

ويوضح شكل (٩-٣) الدائرة المكافئة للآلة الحاثية عند التوافقية n لكل وجه .

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٦٥ -

ومن تيار التوافقية I_n نحسب العزم لكل وجه عند السرعة التوافقية من المعادلة

$$T_n = I_n^2 \left(\frac{r_{2n}}{s_n} \right) \quad \text{watts}$$

فاذا نسبنا العزم T_n الى التوافقية الاساسية تصبح المعادلة :

$$T_n = \frac{I_n^2}{n} \left(\frac{r_{2n}}{s_n} \right) \quad \text{watts}$$

وتبين اشارة n اتجاه العزم

كما أن s_n تساوى الوحدة تقريباً وعلى ذلك تصبح المعادلة السابقة

$$T_n = \frac{I_n^2}{n} r_{2n} \quad p.u$$

(حيث r_{2n} بوحدة $p.u$ ، I_n)

[يعرف الانزلاق ($slip$) من المعادلة $s = \frac{N_s - N}{N_s}$ حيث N_s هي السرعة التزامنية

وتساوى $\frac{60 f}{p}$ حيث N سرعة المحرك ، f التردد ، $2p$ عدد اقطاب الآلة]

وبالتعويض فى المعادلة السابقة بالقيم

$$V_n = I_n Z_n \quad , \quad Z_n \approx n X_l$$

فاننا نحصل على معادلة العزم T_n بدلالة جهد التوافقية V_n كالاتى :

$$T_n = \left(\frac{V_n^2}{n^3} \right) \left(\frac{r_{2n}}{X_l^2} \right)$$

ويوضح شكل (٩-٣) ب العلاقة بين عزم وتيار التوافقية n وسرعة العضو الدوار

ويلاحظ ان تأثير التوافقيات التتابعية الموجبة (n تساوى ١ ، ٤ ، ٧ ،) كما فى شكل

(٩-٣) تؤدي الى :

- يدور الفيض المغناطيسى الدوار فى العضو الثابت بسرعة تساوى $n\omega$ فى

الاتجاه الموجب للدوران .

- يدور الفيض المغناطيسى الدوار فى العضو الدوار بسرعة تساوى $(1-n)\omega$ للآلات

المتزامنة بينما يدور بسرعة تساوى $(n-1+s)\omega$ فى الآلات الحاثية .

- يكون العزم فى اتجاه الدوران .

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٦٦ -

بينما يؤدي تأثير توافقيات التتابعية السالبة (n تساوى ٢ ، ٥ ، ٨ ، ...) ، كما فى شكل (١٠-٣) ب الى :

- يدور الفيض المغناطيسى الدوار فى عكس اتجاه الدوران اى بسرعة تساوى $n\omega$ -
- يدور الفيض المغناطيسى الدوار فى العضو الدوار بسرعة تساوى $(n+1)\omega$ -
- للآلات المتزامنة بينما يدور بسرعة $(n+1-s)\omega$ - للآلات الحاثية .
- يكون العزم فى عكس اتجاه الدوران .

ويلاحظ ان توافقيات التتابعية الصفرية (n تساوى ٣ ، ٦ ، ٩ ، ...) لاتحدث كثافة فيض مغناطيسى ، ويتركز تأثيرها فى إحداث مفقودات مقاومة أومية (Ohmic losses)

٢ - تأثير التوافقيات على المعدات الاستاتيكية للقدرة

سنتعرض فى هذا الجزء لتأثير التوافقيات على خطوط النقل والمحولات والمكثفات .

أ - تأثير التوافقيات على خطوط النقل الكهربى

يوجد تأثيران لمرور تيارات التوافقيات بالشبكة هما :

١ - يؤدي مرور تيارات التوافقية الى زيادة مفقودات الخط تبعاً للمعادلة :

$$W_c = \sum_{n=2}^k I_n^2 R_n$$

حيث :

I_n : قيمة جذر متوسط المربعات (rms) لتيار التوافقية n

R_n : مقاومة الخط عند تردد التوافقية n

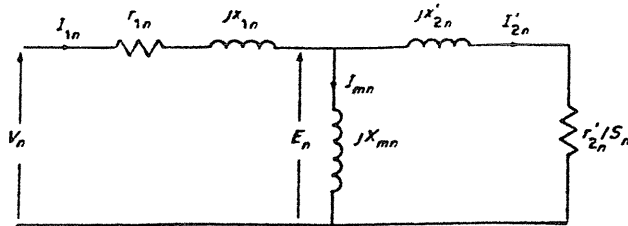
٢ - يحدث مرور تيارات التوافقيات هبوط فى جهد التوافقيات خلال المعاوقات المختلفة للشبكة .

وعلى ذلك نجد ان اضطرابات الجهود تزداد فى الشبكات ذات مستوى القصر المنخفض والمعاوقات الكبيرة بينما تقل فى الشبكات ذات مستوى القصر العالى والمعاوقات صغيرة القيمة .

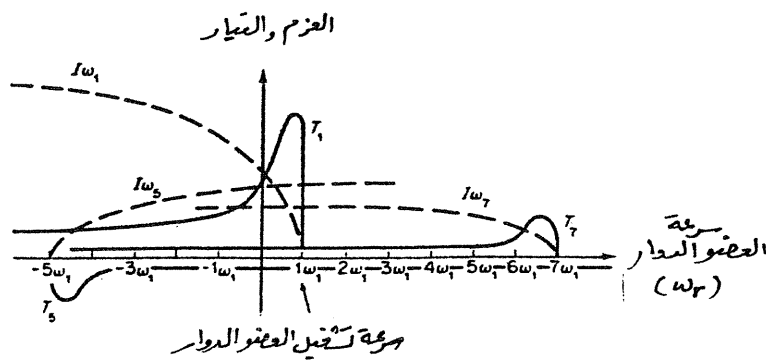
« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٦٧ -

(٢)

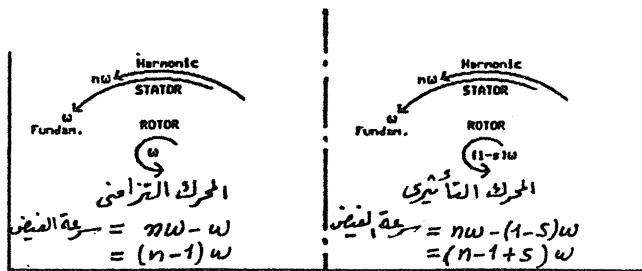


(٤)



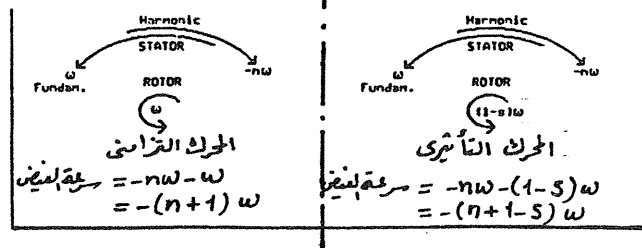
شكل (٩-٣)

(٢)



(٤)

شكل (١٠-٣)



« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١٦٨ -

أما في حالة الكابلات فان توافقيات الجهد (ذات الترددات العالية) تزيد من اجهادات العزل والتي تؤدي الى تقليل العمر الافتراضى للكابل وزيادة عدد الاعطال وبالتالي زيادة تكاليف الاصلاح (عادة يصمم عزل الكابلات ليتحمل مستويات الجهود العالية)

عموماً فان ظهور توافقيات التيار فى الخطوط تعمل على زيادة التحميل وبالتالي سخونة الموصلات ، وتمر التوافقيات الثلاثية الفردية للتيار (٣ ، ٩ ، ١٥ ..) فى مسار التعادل فى النظام الثلاثى الوجة - اربعة اسلاك - مؤدية الى سخونة موصل مسار التعادل .

ب - تأثير التوافقيات على محولات القدرة

وجود توافقيات الجهد يزيد من مفقودات التخلفية (*Hysteresis losses*) ومفقودات التيارات الاعصارية (*Eddy current losses*) بالاضافة الى زيادة اجهادات العزل .

وترتفع قيمة مفقودات النحاس (*Copper losses*) نتيجة مرور تيارات التوافقيات وفى محولات القدرة ذات التوصيل Δ تمر تيارات التوافقيات الثلاثية الفردية (٣ ، ٩ ، ١٥) داخل الدلتا مؤدية الى سخونة المحول . (وتستخدم نفس معادلات الفقد المستخدمة فى حالة الآلات البوارة) .

عموماً جميع هذه المفقودات تؤدي الى سخونة المحول لدرجة حرارة اعلى من الدرجة المفروضة والتي تؤدي الى انهياره وقد يحدث تشبع للقلب ، وفقد فى قدرة المحول وبالتالي انخفاض كفاءته .

ج - تأثير التوافقيات على مكثفات القدرة

نتيجة وجود توافقيات الجهد يحدث فقد فى قدرة المكثف تبعاً للمعادلة

$$W_c = \sum_{n=1}^{\infty} C (\tan \delta) \omega_n E_n^2$$

حيث :

$$\tan \delta = \frac{R}{1/\omega c} = \text{عامل الفقد}$$

$$\omega_n = 2 \pi f_n$$

$$E_n = \text{جذر متوسط مربعات جهد التوافقية } n$$

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٦٩ -

وحيث أن ممانعة (reactance) المكثف تتناسب عكسياً مع التردد فإن القيم الصغيرة نسبياً لجهود التوافقيات تؤدي إلى تشوه ملحوظ في موجة التيار . ولذا يجب أن تختار قيم المكثفات بحيث لا تتعدى القدرة غير الفعالة للمركبة الأساسية والتوافقيات ١٣٥ ٪ من القيمة المقننة على لوحة البيان (name plate) للمكثف .

ويعبر عن احمال KVA_r للمكثف كجزء من قدرته عند تسلط جهد التوافقيات كالآتي :

$$KVA = E_1^2 + 3 E_3^2 + 5 E_5^2 \dots\dots$$

بحيث يتم التعويض عن قيم جهود التوافقيات كنسبة من الجهد المقنن وفي حالة وجود التوافقية n فقط فإن جهد التوافقية E_n يساوى

$$E_n = \sqrt{\frac{1.35 - E_1^2}{n}}$$

ويفضل ان يعبر عن القدرة غير الفعالة الكلية لمجموعة المكثفات (بحيث يؤخذ في الاعتبار المركبات الأساسية والتوافقيات) بالكمية Q والتي يجب ألا تزيد عن القدرة المقننة للمكثفات (rated reactive power) أي ان

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n$$

عادة يؤخذ في الاعتبار ، للكميات القياسية للمكثفات ، وجود توافقيات الجهود في اغلب الشبكات الكهربائية ولذلك فإنها تتعرض لبعض المشاكل البسيطة فقط وتحدث توافقيات التيار بالمكثفات نتيجة تيارات المغنطة لمحولات القدرة .

فاذا كانت المحولات تعمل عند قيم قريبة جداً من الجهود المقننة فإن توافقيات الجهد تكون اقل ما يمكن ولا تصدر المكثفات اية توافقيات جهد ، وعادة تكون ترددات التوافقيات الموجودة هي الثالثة والخامسة ، وللمكثف ممانعة صغيرة عند الترددات العالية وبالتالي تسمح بمرور تيارات عالية .

وعموماً يمكن ان تتعرض المكثفات لجهود زائدة وتيارات عالية نتيجة رنين التوالى والتوازي بين المكثفات ومكونات الشبكة الكهربائية ، ويؤدي هذا الى زيادة المفقودات وسخونة المكثفات وبالتالي انهيارها .

٤ - تأثير التوافقيات على أنظمة التحكم التماثلي

يستخدم نظام التحكم التماثلي (ripple control) خلال فترات نزوة الاحمال

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١٧٠ -

اليومية فى :

- التحكم عن بعد فى دوائر اضاءة الشوارع .

- التحكم فى تخفيض الاحمال (مثل التحكم فى تشغيل سخانات المياه)

وذلك للطرازات القديمة من متمات التحكم من النوع الكهرومغناطيسى ، والحديثة من النوع الاستاتيكي . ويغذى ملف المتم التموجى (ذى معاوقة كبيرة) بالجهد ، وقد يؤدى تداخل التوافقيات بقيمة كافية الى حدوث تشغيل خاطئ (maloperation) للمتم او الى اعطاء اشارة منع (signal blocking) .

وتعنى اشارة المنع وجود جهد تداخل يكفى للوصول بالمتم لعدم استطاعته الكشف عن وجود اشارة التشغيل ، ويمكن ان تحدث المكثفات نفس التأثير تبعاً لمقدرتها لامتناس الاشارات التموجية .

ان وجود جهود التوافقيات يعمل على التشغيل الخاطئ للمتم (وذلك عند غياب الاشارة الاصلية) اى تتغير حالة تشغيل المتم ، ولكى نعالج هذه الحالة يستخدم التوصيل ذات الشفرة (encoded switching Signals) فى متمات توليد التموجات ، ويضاف للمتم مرشح رقمى (digital filter) لكشف ترددات جهود التوافقيات الغير مرغوبة .

هـ - تأثير التوافقيات على أنظمة الوقاية

تتسبب التوافقيات فى تشوه خصائص التشغيل لمتمات الوقاية تبعاً لنوع المتم واساسيات تشغيله ، فعلى سبيل المثال يعتبر تشغيل متمات الوقاية الكهرومغناطيسية من الانواع ذات حافظة الجذب (Attracted armature) والحافظة المفصلية (Hinged armature) والكباس (plunger) والجزء الحديدى المستقطب المتحرك (Polarized moving iron) على معادلة القوة الآتية :

$$F = F_0 - F_r$$

$$= K_1 I^2 - K_2$$

حيث :

$$F_0 = \text{قوة التشغيل والتي تتناسب مع سرعة التيار } (I)$$

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٧١ -

F_r = قوة الكبح ممثلة في عملية الاحتكاك

F = القوة المؤثرة

اذ يعتمد ضبط هذه المتغيرات على قيمة التيار المار بملف المتحم وقت حدوث العطل ولا يعتمد الضبط على تردد الشبكة لذلك لا يؤثر وجود التوافقيات على هذه الانواع .
بينما نجد في متمات الوقاية الكهرومغناطيسية ذات القرص التائيري (Induction Disc) والتي يعتمد تشغيلها على معادلة قوة دوران القرص وهي :

$$F \propto \Phi_1 \Phi_2 \sin \theta$$

حيث ان Φ_1 , Φ_2 هما المجالان المؤثران على القرص والزاوية بينهما θ ومعادلتها :

$$\Phi_1 = \Phi \sin \omega t$$

$$\Phi_2 = \Phi \sin (\omega t + \theta)$$

وبذلك تتأثر بوجود التوافقيات ذات الترددات المختلفة ، حيث انها مصممة عند تردد ٥٠ هرتز ، ويكون تأثيرها بالاسراع او التباطى في عملها . وتكبر معاوقة المدخل (Input impedance) كلما زادت ترددات المتغيرات ذات القرص التائيري التي تغذى بمصدر جهد متردد a.c .

اما في المتغيرات الرقمية (Digital relays) وتبعاً لطريقة الحسابات المستخدمة سواء بالعينات (sampled) او بالتقاطع الصفرى (Zero - crossing) فان وجود التوافقيات يحدث اخطاء في الحسابات .

وفي أغلب الحالات ، عموماً ، فان التغير الحادث في خصائص تشغيل المتحم تكون صغيرة ولا تؤدي الى مشكلة محسوسة . أما اذا كانت مستويات جهود التوافقيات اقل من ٢٠ ٪ فان المتغيرات لا تتأثر .

وتتأثر متمات الوقاية المسافية بوجود التوافقيات في الشبكة الكهربائية ، حيث يتم ضبط المتحم على المعاوقة الاساسية للخط اما وجود توافقيات التيار (خاصة التوافقيات الثالثة) عند موضع العطل فيعمل على تغيير قيمة المعاوقة المقاسة بالنسبة للقيمة

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١٧٢ -

المضبوطة .

وعند مرور تيار العطل خلال ارضية ذات مقاومة (*resistivity*) كبيرة فان هذا التيار يحتوى على توافقيات عالية مؤدياً الى حدوث تشغيل خاطئ الا اذا تغلبت الموجات الاساسية ، واذا كان العطل متصل مباشرة مع الارض فان المركبات الاساسية للتيار والجهد تكون هي الغالبة وحيث ان محولات التيار يحدث لها تشبع فيحدث التشوة لموجة التيار الثانوى خاصة لوجود مركبة التيار المستمر (*d.c offset*) فى موجة التيار الابتدائى . وعلى ذلك فوجود التوافقيات فى موجة التيار الثانوى تعتبر مشكلة حقيقية حيث عند حدوث تشبع لمحولات التيار فانه من الصعب معرفة الموجة الاساسية للتيار .

وفى حالة الاستقرار (*Steady state*) نجد ان القوة الدافعة الكهربائية (*emf*) العالية فى الملف الثانوى ذى معاوقة الاثارة غير الخطية لمحول التيار تؤدي الى وجود التوافقيات الفردية فقط . بينما فى الحالات العابرة (*Transients*) مع حدوث تشبع لمحول التيار تحدث توافقيات لأية درجات وتكون التوافقيات الغالبة هى الثانية والثالثة .

ترشح موجات التيار والجهد المغذية بمتنمات الوقاية الرقمية ويزداد الاهتمام وبعبارة فائقة بمتنمات الوقاية المسافية الرقمية .

وعلى الرغم من وجود التوافقيات فى حالات التشغيل العادية فانها لاتسبب اى مشكلات لمتنمات الوقاية الا الحالة التى يتم فيها ادخال محول قدرة على الشبكة الكهربائية حيث يحتوى تيار المغنطة الاندفاعى (*magnetizing inrush current*) على توافقيات عالية ، مما يحدو بنا الى استخدام متنمات وقاية حديثة مزودة بعنصر منع التوافقيات او باستخدام تأخير زمنى محدد (*Time delayed*) لمتنم الوقاية التفاضلية وهذا لايفضل استخدامه حتى لايتعرض المحول لمخاطر الانهيار اذا صادف وجود عطل على المحول اثناء مرور تيار المغنطة الاندفاعى (اى لحظة توصيل المحول) .

وتعتمد قيمة الذروة لتيار المغنطة الاندفاعى بالمحول على :

١ - محاثية (*inductance*) الثغرة الهوائية للقلب (*air - core*)

٢ - مقاومة الملف (*winding resistance*)

٣ - لحظة التوصيل على موجة الجهد .

٤ - قيمة الفيض المتبقى (*residual flux*) فى القلب قبل عملية التوصيل .

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٧٣ -

و - تأثير التوافقيات على بعض الاجهزة المكتبية والمنزلية :

١ - التلفزيونات (Television)

تحدث التوافقيات المؤثرة عند القيمة القصوى للجهد تغيير فى حجم واضاءة صورة التلفزيون .

٢ - الاضاءة بالفلورسنت والقوس الزئبقى (Fluorescent and mercury arc lighting)

احياناً يضاف مكثف مع ملف كابح التيار (Ballast) وتحدث حالة رنين بين المكثف ومحاثة ملف كابح التيار والدائرة المغذية ، وفى حالة وجود التوافقيات يحدث سخونة زائدة وانهايار .

٣ - الاجهزة المحتوية على مبدلات (convertors)

يؤثر تشوه موجة الجهد الحادث من تيار التوحيد فى تزامن (Synchronizing) الاجهزة الاخرى المحتوية على مبدلات او اية معدات تحكم اخرى متصلة بها .

٤ - معدات تغيير السرعة بالتحكم فى تشغيل الثيريزتور

تؤثر التوافقيات فى هذه المعدات كالاتى :

- تشوه الجهد (بسبب انخفاض فى جهد المصدر) يسبب تشغيل خاطئ خلال فترات عدم اشتغال الثيريزتور .

- تحدث تشوهات الجهد اشعال للثيريزتور فى لحظات غير مرغوبة .

- يؤثر الرنين بين الاجهزة المختلفة عند الجهود المرتفعة .

٥ - الحاسب الالى (Computer)

يصمم الحاسب الالى بحيث يتحمل وجود التوافقيات المسموحة بالشبكات الكهربائية .

٦ - تكون بعض المعدات غير منتجة للتوافقيات ولكن لسوء الحظ تكون متصلة على مصدر تغذية مع مشتركين اخرين منتجين للتوافقيات وعندئذ تتأثر بالتوافقيات التى تسبب السخونة والانهايار احياناً .

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٧٤ -

س - تأثير التوافقيات على أجهزة قياس القدرة

تكون معايرة أجهزة القياس بتيار متردد جيبي نقى لذا عند تغذيتها من مصدر تيار مشوه فإن قياساتها تحتوى على نسبة خطأ .

وتعتمد اشارة خطأ العداد على قيمة واتجاه سريان قدرة التوافقية .

وقد وجد ان الخطأ الراجع الى تيار التوافقيات يتغير تغييراً كبيراً تبعاً لنوع العداد مع احتمال ان تكون اشارة الخطأ سالبة او موجبة .

ومن انواع أجهزة قياس القدرة الاجهزة الكهرومغناطيسية التى تحدث فيض فرملى (*braking flux*) ، وفيض دفع (*driving flux*) يكونان بدورهما عزم العضو الدوار . وتجهز عناصر انتاج الفيض الثانوى بمعوّضات لتحسين درجة الدقة (*accuracy*) لتعويض الكسور فى مسجل العداد . وتكون هذه العناصر المحدثة للفيض ، والتى تحدث العزم الثانوى والابتدائي ، لها خاصية غير خطية للقيمة والتردد .

اما العناصر غير الخطية فهى عناصر التيار والجهد (ملفى التيار والجهد) والمفرغ المغناطيسى لزيادة الحمل (*over loaded magnatic shunt*) وعنصر حساسية التردد والقرص ومسار التعامد (*quadrature*) ومسار مقاومة الاحتكاك (*anti - friction*) .

تكون استجابة العداد غير كافية عند الترددات المختلفة عن تردد التصميم وعندئذ تصبح عديمة الدقة . وتكون القدرة الكلية للعداد تبعاً للمعادلة

$$P_l = P_{dc} + P_t + P_h$$

$$= V_{dc} I_{dc} + V_t I_t \cos \Phi_t + V_h I_h \cos \Phi_h$$

ولا يقيس العداد مركبة قدرة التيار المستمر P_{dc} ولكن حساسيته تشعر بوجودها ويقيس p_t بدقة بينما يقيس p_h بلا دقة ، ونحصل على الخطأ عن طريق التردد . ووجود اى قدرة *d.c* من او الى المشتركين تسبب خطأ يتناسب مع نسبة القدرة $\frac{P_{dc}}{P_t}$ وتعتمد اشارة الخطأ على اتجاه سريان القدرة . وبالمثل اى نقص فى قياس قدرة التوافقيات p_h تسبب خطأ ويمكن تمثيله بالنسبة $\frac{+kP_h}{P_t}$ حيث k يعتمد على خاصية تردد الاستجابة للعداد ، وتعتمد اشارة الخطأ ايضاً على اتجاه سريان القدرة .

ولا يحدث عزم نتيجة قدرة التيار المستمر او نتيجة وجود توافقيات الجهود والتيار

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٧٥ -

ولكن تقلل مقدرة العداد على قياس القدرة عند التردد الاساسى . وجود التيار المستمر يشوه فيض التشغيل ويغير الزيادة فى نفاذية (Permeability) العناصر المغناطيسية. يرتبط الفيض الناتج من تيارات التوافقيات بالفيض الظاهرى عند نفس التردد والتي تحدث نتيجة العجز فى عناصر العداد ويحدث العزم الثانوى، فى عدادات قياس الكيلووات ساعة (kwh) الكهرومغناطيسية يقرأ العداد قيمة اكبر من المفروض عند مستهلك ينتج توافقيات من أجهزة تحكم فى السرعة بواسطة التحكم فى الثيريزتور (خاصة فى وجود التوافقيات الزوجية ومركبة التيار المستمر) مصحوباً بمعامل قدرة منخفض .

يعتمد تشغيل الاحمال المحتوية على مبدلات (convertors) على اساسيات اشغال الثيريزتور (Firing) والذي يسبب زيادة فى قراءة عدادات الكيلووات ساعة بحوالى ٦ ٪ ، وهى نسبة كبيرة بالنسبة لنقص تيار الاخمد (current damping) خلال فترة اللحمل .

وعلى ذلك فوجود التوافقيات فى شبكة مستهلك تؤدي الى زيادة القدرة المستهلكة الظاهرة وزيادة مفقودات الشبكة الكهربائية .

وتمثل عدادات قياس اقصى طلب (maximum demand) عدادات قياس الكيلووات ساعة من حيث تأثيرها بالتوافقيات ولكن تكون الزيادة فى القراءة اقل ، وتتخذ قياسات عدادات اقصى طلب خلال فترة زمنية محددة . تكون العدادات الاستاتيكية (Solid state) أعلى سعراً من العدادات الكهرومغناطيسية ويكون لها المقدرة على قياس القدرة الحقيقية بصرف النظر عن شكل الموجات المقاسة .

ص - تأثير التوافقيات على معامل القدرة

يمكن التعبير عن أية موجة للجهد او التيار بدلالة القيم اللحظية (instantaneous values) للجهد او التيار كالاتى :

$$V = \sum_1^n \sqrt{2} V_n \sin (n\omega t + \alpha_n) + \sum_1^m \sqrt{2} V_m \sin (m\omega t + \alpha_m)$$

$$i = \sum_1^n \sqrt{2} I_n \sin (n\omega t + \alpha_n + \Phi_n) + \sum_1^p \sqrt{2} I_p \sin (p\omega t + \alpha_p)$$

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٧٦ -

$$pf = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T v i dt}{V_{rms} I_{rms}}$$

ويعبر عن معامل القدرة (pf) من المعادلة

$$= \frac{\sum_1^n V_n I_n \cos \Phi_n}{\left\{ \left(\sum_1^n V_n^2 + \sum_1^m V_m^2 \right) \left(\sum_1^n I_n^2 + \sum_1^p I_p^2 \right) \right\}^{1/2}}$$

وإذا كانت موجة الجهد جيبيية فإن معامل القدرة (pf) يكون

$$pf = \frac{V_1 I_1 \cos \Phi_1}{V_1 I_{rms}} = \frac{I_1}{I_{rms}} \cos \Phi_1 = \mu \cos \Phi_1$$

حيث :

$\cos \Phi_1$ = عامل الإزاحة ($displacement factor$) بين المركبتين الأساسيتين للجهد والتيار (أو معامل قدرة زاوية الإزاحة)

μ = عامل التشوه لموجة التيار ($current distortion factor$)

ويكون معامل القدرة (pf) مساوياً للوحدة عندما تكون μ تساوى الوحدة وبالتالي لا يمكن أن تكون $\cos \Phi_1$ أكبر من الواحد الصحيح .

وبذلك لا يكون لتعويض أو تحسين معامل القدرة أية علاقة بالموجات المشوهة .

وتستخدم معدات ليس لها فقد لتعويض معامل القدرة وتؤدي أقل قدرة ظاهرية ($apparent power$) إلى أفضل معامل قدرة ($optimum pf$) ، فمثلاً عند إضافة مكثفات تحسين معامل القدرة بسعة C متصلة على التوازي مع الحمل الذي له جهد V وتياره i تبعاً للمعادلات السابقة ، فإن معادلة القدرة الظاهرية (s) بدلالة C تكون

$$S = \left(\sum_1^n V_n^2 + \sum_1^m V_m^2 \right)^{1/2} \left\{ \sum_1^n (I_n^2 + V_n^2 n^2 \omega^2 C^2 + 2 V_n I_n n \omega C \sin \Phi_n) + \sum_1^m V_m^2 m^2 \omega^2 C^2 + \sum_1^p I_p^2 \right\}^{1/2}$$

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١٧٧ -

ويتفاضل المعادلة السابقة بالنسبة للسعة C ثم مساوتها بالصفر نحصل على افضل سعة خطية (Optimum linear capacitance)

$$C_{op} = \frac{\frac{1}{\omega} \sum_1^n V_n I_n \sin \Phi_n}{\sum_1^n V_n^2 + \sum_1^m V_m^2}$$

وتعرف القدرة غير الفعالة (reactive power) من المعادلة

$$Q = \sum_1^n V_n I_n \sin \Phi_n$$

$$= \frac{1}{2\pi} \sum_1^n \frac{1}{n} \int_0^T V_n di_n$$

والخلاصة ان معامل القدرة هو النسبة بين القدرة الفعالة (active power) الى القدرة الظاهرية (apparent power) ، ويختلف عن معامل قدرة زاوية الازاحة عند وجود تشوه بالموجات (العامل μ) ، ويتغير معامل القدرة الحقيقى ، اى فى وجود توافقيات او تشوه الموجة ، من صفر الى الواحد الصحيح معتمداً على طبيعة الاحمال .

ثانياً : تأثير التوافقيات على نظم الاتصالات

ترجع الاضطرابات الحادثة من تأثير توافقيات نظام القدرة على نظم الاتصالات المجاورة الى قربها من أوجودها فى وسط كهربي ناتج من :

١ - التأثير الكهرومغناطيسى ، كما فى شكل (١١-٣) .

٢ - التأثير الكهروستاتيكى ، كما فى شكل (١٢-٣)

ويلاحظ فى الشكلين وقوع خط الاتصالات فى المجالين

تصنف نظم الاتصالات الى

- دوائر التليفونات (Telephone circuit)

- دوائر التلغراف (Telegraph circuit)

» التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٧٨ -

- دوائر الاشارات (Signal circuit)

ويكون تردد المركبات الاساسية للتيارات المارة بدوائر التلفزيون والاشارات اقل من ٣٠٠ هرتز ، وعلى ذلك فانها تتأثر فقط بالتردد الاساسى ، وتردد التوافقيات الاقل من ٣٠٠ هرتز ، بينما يقع تردد التيارات بدوائر التليفونات فى حدود ١٠٠ هرتز - ٤ ك. هرتز (وهى حدود الترددات السمعية audio range) وتكون دوائر التليفونات هى الاكثر حساسية وتأثراً بالتوافقيات .

فى شكل (٣-١٣) تم تمثيل موصل للاتصالات (Communication conductor) موازياً وقريباً من موصل قدرة حاملاً للتيار (خط هوائى overhead line) ويعتمد على الجهد الحادث فى دوائر الاتصالات ، نتيجة المجال الكهرومغناطيسى لموصل القدرة على قيمة تيار موصل القدرة والتردد وطول الجزء من الدوائر المتوازية والمحاثّة التبادلية ، ويوضح شكل (٣-١٤) المسار الكامل لمرور التيار فى موصل القدرة وانتقالها الى دائرة الاتصالات متمثلة فى خط تليفون مثلاً

ويفرض ان : L : طول الجزء المتوازي من الدائرتين .

M : المحاثّة التبادلية (mutual inductance) لوحدة الطول

فان الجهد الحادث نتيجة تيار التوافقية n يكون

$$E'_n = -j.n.\omega.M.L.I_n$$

ويفرض ان معاوقة الجانبين للجزء المتوازي بين موصل الاتصالات والارض هما Z_A, Z_B فان التيار المار فى هذا الجزء هو

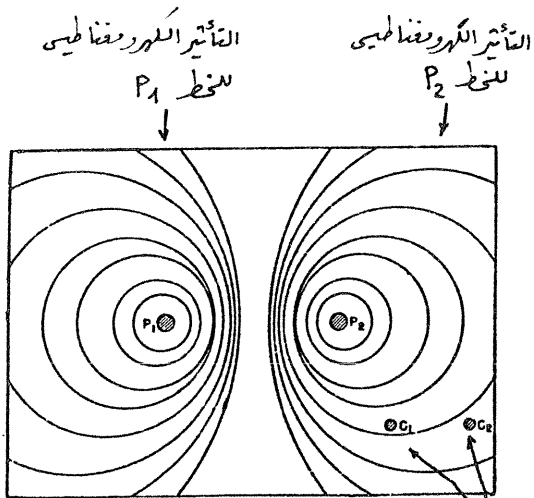
$$I_m = \frac{E'_n}{Z_A + Z_B}$$

ويكون هذا التيار مساوياً للصفر اذا كانت اى من المقاومتين Z_A و Z_B مفصولة ويمكن تمثيل الجهد الحادث فى دوائر الاتصالات نتيجة المجال الكهرومغناطيسى بمصدر جهد E'_n موصلاً على التوالى مع الموصل كما فى شكل (٣-١٣) ، (٣-١٤) .

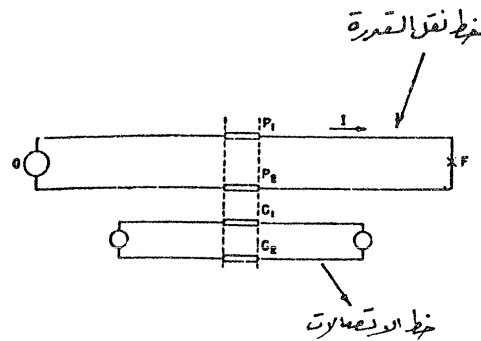
ولحساب قيمة المعاوقة التبادلية بين خط الاتصالات وخط القدرة الكهربائية تستخدم المعادلة التالية والتي تعرف بمعادلة كارسون (Carson's Equation)

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٧٩ -



(أ)

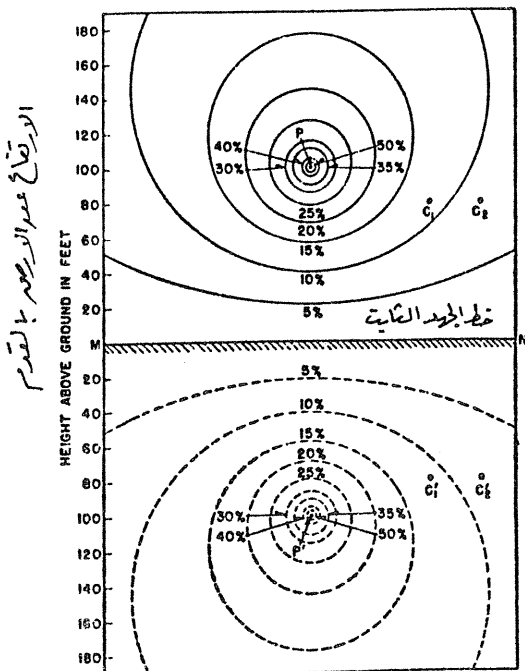


(ب)

موقع خط التوصيلات
في مجال الخط P_2

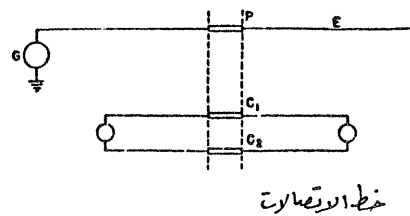
شكل (١١-٣)

المجال الكهرومغناطيسي لخط القدرة



(أ)

خط نقل القدرة



(ب)

شكل (١٢-٣)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١٨٠ -

$$Z_m = \frac{j \omega \mu_0}{2\pi} \left\{ \ln \frac{d'_{12}}{d_{12}} - 2j \int_0^x \frac{e^{-u \alpha (h_1 + h_2)}}{\sqrt{(u^2 + j) - u}} \cos(u \alpha x) du \right\}$$

ويوضح شكل (١٥-٣) المسافات المستخدمة

حيث x : المسافة الأفقية بين خطى القدرة والاتصالات

h_1 : ارتفاع خط القدرة عن الأرض

h_2 : ارتفاع خط الاتصالات من الأرض

d_{12} : المسافة بين خطى القدرة والاتصالات وتساوى

$$d_{12} = \sqrt{(h_1 - h_2)^2 + x^2}$$

d'_{12} : المسافة بين خط الاتصالات وصورة لخط القدرة وتساوى

$$d'_{12} = \sqrt{(h_1 + h_2)^2 + x^2}$$

μ_0 : سماحية المسافة الحرة (permeability of free space)

δ : عمق السطح المنتظم من الأرض ذات المقاومة ρ (resistivity)

ρ : مقاومة تربة الأرض بوحدة (أوم - متر)

$$\alpha = \sqrt{2} / \delta \quad , \quad \delta = \sqrt{(2\rho / \mu_0 \omega)}$$

وبذلك يمكن كتابة معادلة الجهد الحادث نتيجة تيار التوافقية كالآتي

$$E'_n = Z_m I_n$$

وفى حالة ماذا كان خطى القدرة والاتصالات تحت الأرض فان اشارتى h_1 , h_2 تصبحان سالبتان .

ونتيجة لقرب خط الاتصالات من موصل القدرة المحاط بمجال كهربى (electric field) فان شحنة كهربائية تحدث بخط الاتصالات ، وتختلف قيمة الشحنة تبعاً لقيمة

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٨١ -

جهد خط القدرة وتعتمد على القيم السعوية بين الخطين وبين أى منهما والارض ، كما فى شكل (٣-١٦) . والذى يمثل فيه ايضاً مصدر التوافقيات E_n الحادثة من المجال الكهربى وتأثيرها على خط الاتصالات من خلال المكثف C_{12} .

وبفرض ان قيم المعاقتين Z_A, Z_B مالا نهاية فان الجهد الحادث يساوى

$$E''_n = \frac{E_n C_{12}}{C_{12} + C_2}$$

واذا كانت أى من المعاقتين Z_A او Z_B مساوية للصفر ، او حدثت دائرة قصر (Short - circuit) على دائرة الاتصالات ، فان تيار دائرة القصر المار يكون

$$I''_n = \omega \cdot C_{12} \cdot E_n$$

اما اذا حدثت دائرة القصر عند الجانبين فان التيار المار فى كل دائرة قصر يساوى $0.5 I''_n$

وعلى العموم يعرف تأثير كل من المجال المغناطيسى والكهربى على دائرة الاتصالات بأنه جهود طولية *Longitudinal voltages* تبعاً للترددات المختلفة ، وحيث ان اسلاك دوائر الاتصالات تكون غير متماثلة فى بعدها بالنسبة لخط القدرة فتكون الجهود الطولية الحادثة اكبر قليلاً على سلك الاتصالات الاقرب لخط القدرة من جهود الاسلاك الاخرى . ونتيجة الاختلاف فى الجهود الطولية تحدث جهود معترضة (*Transverse voltages*) والتي تكون صغيرة بالنسبة لقيمة الجهود الطولية .

وحيث ان دائرة التليفون تتكون ببساطة من زوجين من الاسلاك الملتوية (*Twisted pair of wires*) متصلين مع جهاز التليفون ، كما فى شكل (٣-١٧) فانه يمكن تمثيل الجهود الحادثة E'_n, E''_n على التوالى والتوازي لكل سلك . كذلك يوضح الشكل الجهد المعترض الحادث بين السلكين وخاصة فى اسلاك التليفونات الهوائية ، بينما فى اسلاك التليفونات الارضية فان الجهود الطولية تكون متساوية وهناك سماحية بحدود معينة لعدم الاتزان فى الخطوط التليفونية (اى عدم تساوى معاوقة السلكين وكذلك عدم تساوى السعوية والتسرب الارضى) تختلف فى الخطوط الهوائية عنها فى الخطوط الارضية ويعرف اتزان دائرة التليفون بالنسبة للارض من العلاقة

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٨٢ -

$$20 \log_{10} \frac{\text{Longitudinal voltage}}{\text{Transverse voltage}}$$

وتكون حدود هذه القيمة من ٤٥ - ٥٠ ديسبل

عادة تكون كابلات التليفونات محاطة بغلاف خارجي (sheath) وإذا كان هذا الغلاف مؤرضاً ولو عند نقطة واحدة على الأقل ، فانها لا تتأثر بالجهود الناتجة من المجال الكهروستاتيكي . بينما يسبب المجال الكهرومغناطيسي مرور تيار في الغلاف والذي يحجب عن الموصل داخله أى يحمى موصل التليفون من المجال الكهرومغناطيسي وتزيد هذه الحماية كلما زاد التردد ، فمثلاً كابل تليفون له غلاف من الرصاص ، والمقطع المستعرض (cross - section) يساوى ٢٠٠ ملمتر ، ولا يحتوى على درع (armour) فان نسبة الجهد الحادث (induced voltage) تقل تبعاً لزيادة التردد كما في الجدول رقم (٣-١)

جدول رقم (٣-١)

التردد (هرتز)	٥٠	٢٥٠	٥٥٠	٨٥٠	١١٥٠	١٤٥٠	١٧٥٠	٢٠٥٠
الجهد الحادث %	٨٥	٢٠	١٤,٢	٩,٣	٦,٩	٥,٥	٤,٥	٣,٩

بينما يمثل الجهد الحادث ١٠٠ % بالجهد الحادث في سلك مفتوح مفرد (Single open - wire) .

اما اذا كان الكابل يحتوى على درع (armoured cable) فان قيم الجهد الحادث % تقل بدرجة كبيرة جداً .

ومن الاهمية معرفة كمية الشوشوة (noise) الحادثة من التوافقيات والتي تعتمد في المقام الاول على التردد المستجاب في دوائر الاتصالات . وتكون خطوط التليفونات هي الاكثر حساسية لهذه التأثيرات . وتحدد الاستجابة الترددية (Frequency response) . لمستقبلات التليفونات (Telephone receiver) من ٢٠٠ هرتز الى ٣٥٠٠ هرتز ، بينما يكون التردد المستجاب لاذن الانسان من ١٥ هرتز الى ١٥ ك. هرتز . وتتغير الاستجابة

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١٨٣ -

مع التردد ويؤخذ التردد ٨٠٠ هرتز كمرجع لمعدات التليفونات (أحياناً يؤخذ ١٠٠٠ هرتز) بينما للتيار والجهود (المؤثرة والمتأثرة) والتي تعمل عند ترددات أخرى فإنها تحول الى تردد المرجع ٨٠٠ هرتز باستخدام عامل الوزن (*weighting factor*) ويوضح شكل (١٨-٣) العلاقة بين عامل الوزن A_n ودرجات التوافقيات ويسمى المجموع الكلى بجهود التوافقيات المحولة بجهود الاضطراب المكافئ (*Equivalent disturbing voltage*) ، وإذا عبرنا عنه كنسبة من جهد الخط فيعرف بعامل توافقية التليفون (*Telephone harmonic factor*) ويعطى من العلاقة

$$V_{800} \% = \frac{\sqrt{\sum A_n^2 \cdot V_n^2}}{V} \times 100$$

$$I_{800} \% = \frac{\sqrt{\sum A_n^2 \cdot I_n^2}}{I} \times 100$$

او باستخدام قيم التيارات كالاتى

ويكون معيار الاضطرابات هو النسبة بين قيمة الاشارة الصوتية الى جهد الشوشرة الحادث (*Signal / noise ratio*) .

وللتبسيط يقترح الاسترشاد بالقيم القياسية الآتية

- يكون مستوى الشوشرة الكلى للوزن (وهو جذر متوسط المربعات لجميع الجهود الحادثة منسوبة الى ٨٠٠ هرتز) يساوى ٢ مللى فولت للكابلات .

- يكون مستوى الشوشرة الكلى للوزن يساوى ٥ مللى فولت لخطوط الهوائية .

- تكون قيمة $V_{800} \%$ (محسوبة من المعادلة السابقة) من ١ - ٢ ٪ عند أى موضع

على الشبكة وعلى ذلك تصبح قيمة معامل الوزن $\frac{A_n f}{800}$ بدلاً من A_n وفى هذه الحالة

يعرف $V_{800} \%$ بأنه عامل تداخل التليفون (*Telephone interference factor*) .

وفيما يلى مثالاً عملياً للمسافة بين خطوط التليفونات وخطوط القوى الكهربائية فى شبكة روسيا التى تعتمد على جهد الشبكة :

- مسافة ٣٠ م لخطوط النقل جهد ٣٥ ، ١١٠ ك.ف

- مسافة ٥٠ م لخطوط النقل جهد ٢٢٠ ك.ف

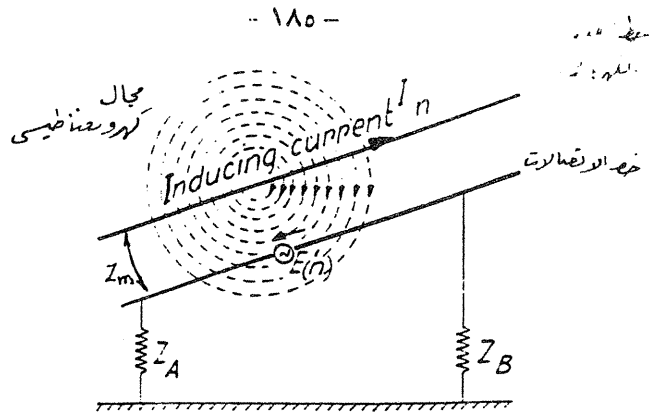
« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٨٤ -

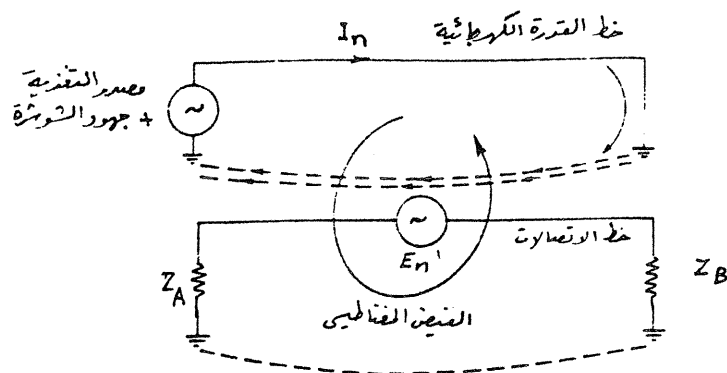
- مسافة ٦٠ م لخطوط النقل جهد ٤٠٠ ك.ف.

فى هذه الحالة تهمل الاضطرابات الناتجة من المجال الكهربى ويؤخذ فى الاعتبار الاضطرابات الناتجة من المجال الكهرومغناطيسى .

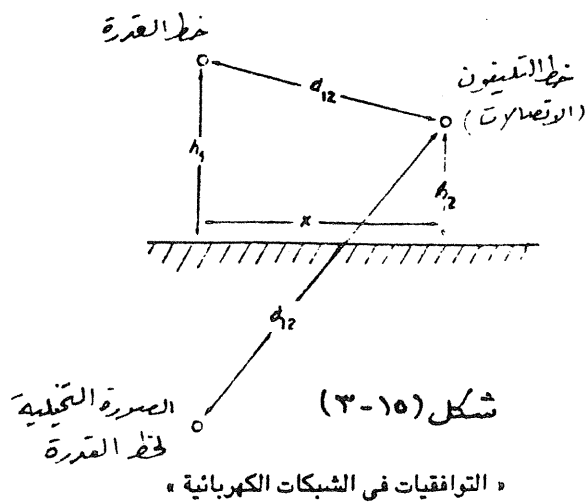
وفى حالة ما اذا كانت المسافة اكبر من ٢٠٠ م فان التأثير الوحيد على خطوط التليفونات يكون نتيجة التتابعية الصفرية (*Zero - sequence current*) المار بمسار التعادل والارضى والحادث من عدم اتزان الشبكة .



شكل (٣-١٣)

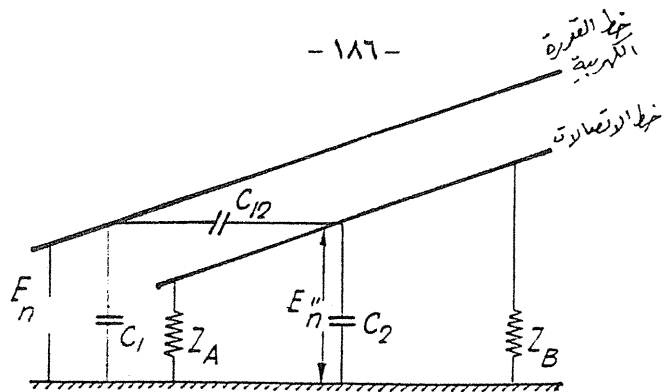


شكل (٣-١٤)

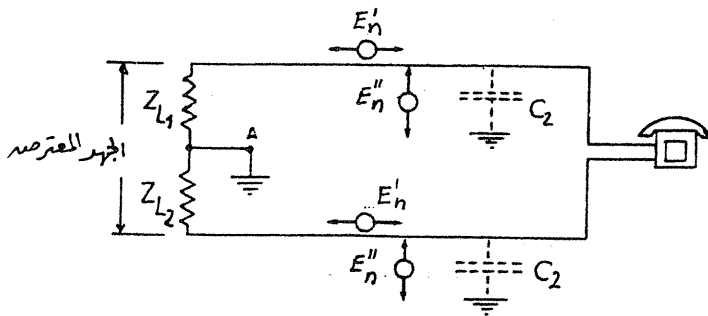


شكل (٣-١٥)

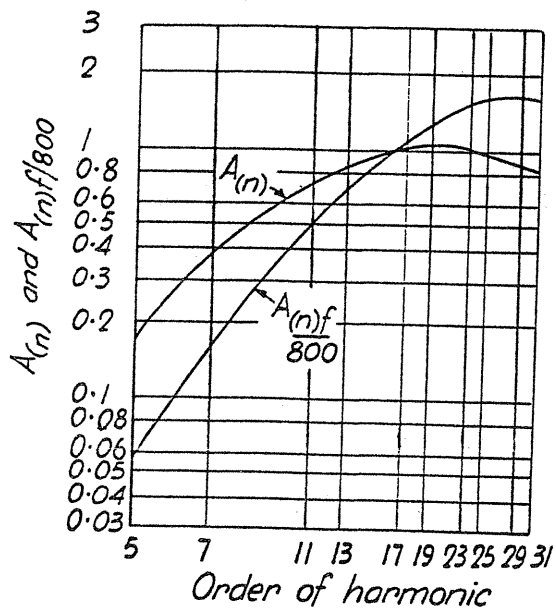
« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »



شكل (٣-١٦)



شكل (٣-١٧)



شكل (٣-١٨)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١٨٧ -

الباب الرابع

البيانات الأساسية للشبكة الكهربائية

عند القيام بعمل دراسة للتوافقيات لشبكة كهربائية يلزم معرفة الآتى :

- رسم خطى للشبكة *Single line diagram* .

- البيانات المكونة لهذه الشبكة والمثلة فى معاوقة كل جزء من مكونات هذه الشبكة وعموماً تتكون أى شبكة كهربائية من : كابلات - محولات - ممانعات - مكثفات

وتستخدم هذه البيانات لحساب المعاوقة الكلية للمدخل والتي تساوى محصلة المعاوقات (توالى / توازى) على القضبان التى تحتوى على مصدر للتوافقيات ، ويتم تمثيل مصدر التوافقيات بمصدر تيار . ويوضح شكل (١-٤) أ رسم خطى لشبكة تحتوى على موحداث كمصدر تيار توافقيات ومحول ومحرك ومكثف ، ونحتاج لحساب جهد التوافقيات ان نحسب معاوقة المدخل ، باستخدام طريقة تمثيل المعاوقات كما فى شكل (١-٤) ب ، وهى محصلة معاوقات المحول والمحرك والمكثف .

وفيما يلى توضيح البيانات اللازمة لكل مكون حتى يمكن حساب المعاوقة المكافئة للشبكة (Z) .

١ - الكابلات (Cables)

لحساب المقاومة (R) والممانعة (X) للكابل يلزم معرفة الآتى :

- طول الكابل (length) .

- مقطع الكابل (mm^2 : size : MCM or m^2)

- مادة الموصل (الومنيوم اونحاس)

- الموصلات (أحادية أو ثلاثية)

- عدد الموصلات / وجه

- شكل التسليح (shield information)

ولحساب المعاوقة (Z) للكابل عند تردد التوافقيات ، فيجب اتباع الآتى :

١ - نحسب مقاومة الكابل ($R_{d.c}$) بوحدة ohm / km عند درجة حرارة $20^\circ C$

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٨٨ -

١ - طبقاً للمواصفات القياسية البريطانية I.S; 1753 - 1961

& I.S : 434 - 1964

- للكابلات الألومنيوم ذات الموصلات المصمته (solid) والموصلات الدائرية المجدولة (stranded circular)، يستخدم جدول (١-٤).

- للكابلات النحاس ذات الموصلات المصمته (solid) والموصلات الدائرية المجدولة (stranded circular)، يستخدم جدول (٢-٤).

وعندما تتغير درجة الحرارة عن $20^{\circ}C$ تضرب المقاومة في عامل تصحيح تبعاً لدرجة الحرارة الجديدة ويستخدم لذلك الجدول رقم (٣-٤).

أو يمكن استخدام المعادلات الآتية للحصول على المقاومة الجديدة عندما تتغير درجة الحرارة :

$$R_{\delta} = R_{20} \left(\frac{234.5 + \delta}{254.5} \right) \quad \text{في حالة موصلات من النحاس}$$

$$R_{\delta} = R_{20} \left(\frac{228 + \delta}{248} \right) \quad \text{في حالة موصلات من الألومنيوم}$$

حيث :

δ = درجة الحرارة الجديدة

R_{20} = المقاومة عند درجة الحرارة $20^{\circ}C$ بوحدة Ω/km

R_{δ} = المقاومة عند درجة الحرارة δ

ب - طبقاً للمواصفات الألمانية DIN

يوضح جدول (٤-٤) قيمة $R_{d.c}$ للكابلات الألومنيوم والنحاس عند درجة حرارة $20^{\circ}C$

وعندما تتغير درجة الحرارة من $20^{\circ}C$ إلى $\theta^{\circ}C$ تصبح معادلة المقاومة

$$R_{\theta} = R_{20} [1 + \alpha_{20} (\theta - 20)]$$

حيث :

R_{θ} = مقاومة الكابل عند $\theta^{\circ}C$ بوحدة Ω/km

« التوافق في الشبكات الكهربائية »

- ١٨٩ -

جدول (٤-١)

مساحة المقطع mm^2	$R_{d.c}$ at $20^{\circ}C$	مساحة المقطع mm^2	$R_{d.c}$ at $20^{\circ}C$
1.5	18.48	95	0.31
2.5	11.18	120	0.235
4	7.219	150	0.198
6	4.620	185	0.159
10	2.874	240	0.11
16	1.821	360	0.096
25	1.049	400	0.067
35	0.842	500	0.057
50	0.584	625	0.045
70	0.387		

I.S : 1753 - 1961

جدول (٤-٢)

مساحة المقطع mm^2	$R_{d.c}$ at $20^{\circ}C$	مساحة المقطع mm^2	$R_{d.c}$ at $20^{\circ}C$
1	17.5	50	0.363
1.5	11.2	70	0.234
2.5	6.775	95	0.188
4.0	4.375	120	0.142
6.0	2.8	150	0.12
10	1.627	185	0.096
16	1.104	240	0.073
25	0.635	300	0.058
35	0.510	400	0.040

I.S : 1753 - 1961

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١٩٠ -

جدول (٣-٤)

درجة الحرارة C°	النحاس	الالومنيوم
10	0.9607	0.960
15	0.9804	0.980
20	1.000	1.000
25	1.0197	1.020
30	1.0393	1.040
35	1.0590	1.060
40	1.0786	1.080
50	1.1179	1.120
60	1.1572	1.160
70	1.1965	1.200
80	1.2358	1.240

جدول (٤-٤)

مساحة المقطع mm^2	$R_{dc} \text{ at } 20^{\circ}C \ \Omega / km$	
	النحاس	الالومنيوم
1.5	11.9	12.1
2.5	7.14	7.58
4	4.46	5.05
6	2.98	3.03
10	1.79	1.89
16	1.12	1.21
25	0.714	0.866
35	0.510	0.606
50	0.357	0.433
70	0.255	0.319
95	0.188	0.253
120	0.149	0.202
150	0.119	0.164
185	0.097	0.126
240	0.074	0.101
300	0.0595	0.0758
400	0.0446	0.0606
500	0.0357	

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١٩١ -

α_{20} = معامل الحرارة (Temperature coefficient) للمقاومة الكهربائية
 $= 0.00393 \text{ deg}^{-1}$ للنحاس
 $= 0.00403 \text{ deg}^{-1}$ للألومنيوم

وتكون المقاومة الفعالة (effective resistance) للتردد 50 Hz عند درجة حرارة التشغيل θ [وتعرف أيضاً بمقاومة التردد المتغير $a.c$ resistance] هي

$$R_{\omega\theta} = R_{\theta} + \Delta R$$

حيث ΔR هي مقاومة إضافية بوحدة Ω/km لتحويل مقاومة $d.c$ لمقاومة $a.c$ وهي راجعة الى الظاهرة السطحية (skin effect) بالإضافة الى الظاهرة التجاورية (proximity effect). ويوضح شكل (٢-٤) العلاقة بين ΔR ومساحة مقطع الكابل .

عموماً عند تغيير التردد الاساسي فيجب ايجاد R_{ac} عند التردد الجديد كالآتي
 من المنحنى الموضح بشكل (٣-٤) وبعد حساب $\sqrt{\frac{f}{R_{d.c}}}$ نحصل على النسبة $\frac{R_{a.c}}{R_{d.c}}$
 فمثلاً عند تردد التوافقية السادسة ، أي $f = 300 \text{ Hz}$ ، ولقيمة

$$R_{d.c} = 0.0595 \Omega/\text{km} \text{ لكابل نحاس } 300 \text{ mm}^2 \text{ فان}$$

$$\sqrt{\frac{f}{R_{d.c}}} = 71 \quad \& \quad \frac{R_{d.c}}{R_{a.c}} \simeq 1.4$$

$$R_{a.c} = 1.4 \times 0.0595 = 0.0833 \Omega / \text{km}$$

٢ - نحسب ممانعة (reactance) الكابل عند تردد التوافقية n .

$$X_n = n X \quad \text{حيث :}$$

X_n ممانعة الكابل عند تردد التوافقية n .

X ممانعة الكابل عند التردد الاساسي 50 Hz تبعاً لجداول الشركة الصانعة او المواصفات القياسية .

أ - طبقاً للمواصفات القياسية البريطانية 1554-1964, I.S : 694 - 1946 , I.S :
 يستخدم جدول (٥-٤) لقيم الممانعة X للكابلات الألومنيوم المعزولة بمادة P.V.C للجهود المنخفضة .

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١٩٢ -

ب - طبقاً للمواصفات القياسية البريطانية

I.S : 434 - 1955 , I.S : 694 - 1960

يستخدم جدول (٤-٦) لقيم الممانعة X لكابلات نحاس معزولة بمادة PVC للجهود المنخفضة (وحدات المساحة بهذا الجدول هي البوصة المربعة (in^2) ووحدات الممانعة $\Omega / 1000 \text{ yards}$ ولتحويل 1000 yard إلى km نضرب في 1.0936) .

جدول (٤-٥)

مساحة المقطع mm^2	250 / 440 V	650 / 1100 V
	$X \ \Omega / km$	$X \ \Omega / km$
1.5	0.09997	0.1091
2.5	0.09716	0.1047
4.0	0.09483	0.1012
6.0	0.08927	0.09485
10	0.08418	0.08895
16	0.08221	0.08589
25	0.08142	0.08429
35	0.07986	0.08251
50	0.07986	0.08207
70	0.07726	0.07640
95	-	0.07674
120	-	0.07356
150	-	0.07367
185	-	0.07359
240	-	0.07260

- ١٩٣ -

جدول (٦-٤)

مساحة المقطع in^2	250 v	660 v
	$X \Omega / 1000 \text{ yard}$	$X \Omega / 1000 \text{ yard}$
0.0015	0.1121	0.1330
0.002	0.1064	0.1262
0.003	0.1008	0.1177
0.0045	0.09454	0.1106
0.007	0.09230	0.1060
0.01	0.08769	0.09985
0.0145	0.08636	0.09516
0.0225	0.08213	0.09103
0.03	0.07917	0.08434
0.04	0.07782	0.08241
0.06	0.07575	0.07840
0.1	-	0.07512
0.15	-	0.07245
0.2	-	0.07201
0.3	-	0.07038
0.4	-	0.07026
0.5	-	0.06998
0.75	-	0.06837
1.0	-	0.06724

ج - طبقاً للمواصفات القياسية الألمانية VDE

يستخدم جدول (٦-٤) الممانعة X لكابلات ثلاثية الأوجه للجهد المنخفض والمتوسط .

ملحوظة :

يمكن إهمال معاوقة الكابلات جهد ١١ ك . ف بالنسبة لمعاوقة المحولات .

٢ - الخطوط الهوائية (Aerial lines)

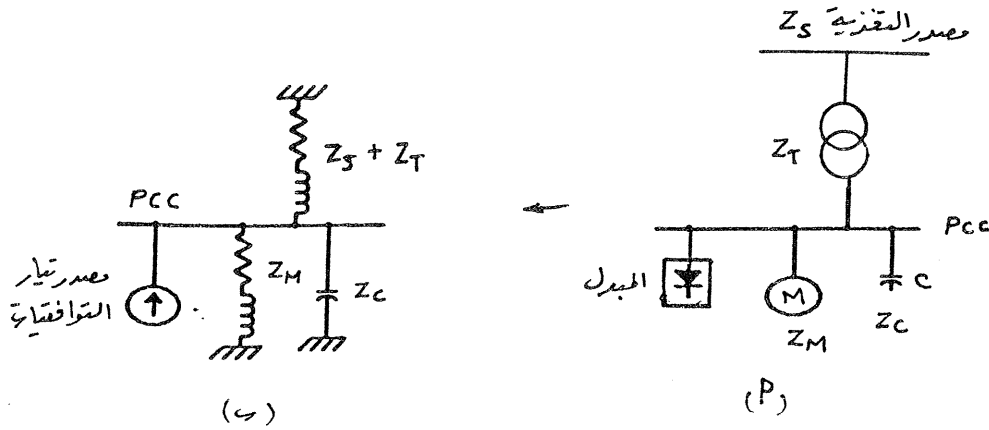
لحساب المقاومة (R) والممانعة (X) للخطوط الهوائية يلزم معرفة الآتى :

- طول الخط

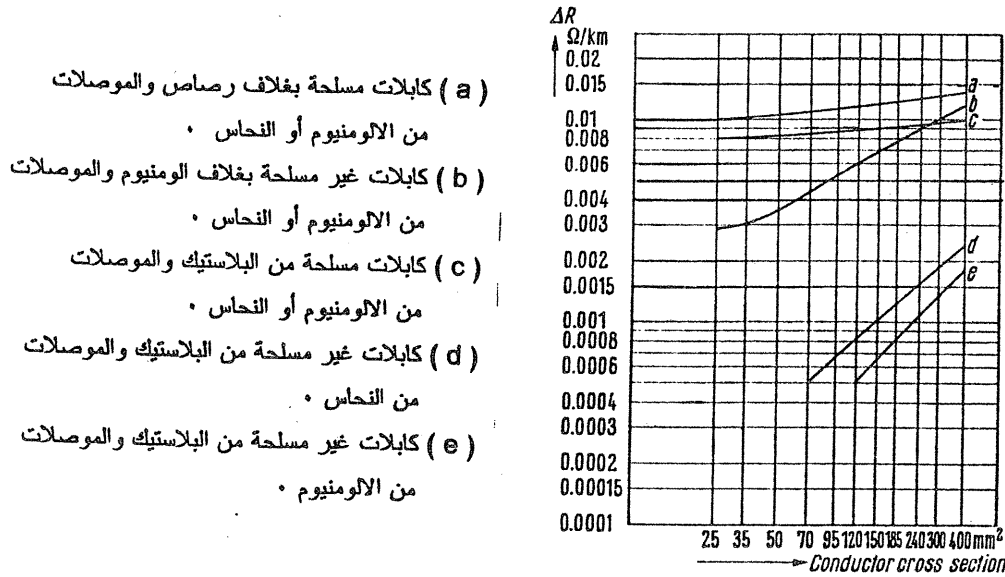
- مقطع الكابل (mm^2 size)

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ١٩٤ -



شكل (١-٢)



شكل (٢-٣)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١٩٥ -

- مادة الموصل (الومنيوم او نحاس)

- عدد الموصلات / وجه

- الموصلات (احادية او ثلاثية)

٣ - المحولات (Transformers)

لحساب المقاومة (R) والممانعة (X) للمحولات يلزم معرفة البيانات الآتية للمحول:

- قدرة المحول (KVA or MVA)

- النسبة المئوية لمعاوقة ($\% impedance$) المحول

- نسبة تحويل الجهد

- النسبة X/R للمحول (ان امكن)

- المجموعة الاتجاهية للمحول

- نظام تأريض نقطة التعادل (مؤرضة مباشرة مع الارض او من خلال معاوقة)

- نوع المحول (جاف او مملوء بالزيت)

ويوضح كلا الجدولين (٧-٤) ، (٨-٤) قيم المعاوقة X (عند التردد $50 Hz$) تبعاً لقدرة المحول وتكون معاوقة المحول عند تردد التوافقية n

$$X_n = n X$$

ويفضل تحويل قيم $\%Z$ للمحولات تحت الدراسة الى وحدات $p.u$ باستخدام العلاقة

$$Z_{p.u} = \frac{(Z\%) (KVA_b)}{(KVA_T)}$$

حيث:

KVA_b قيمة تختار كمراجع او اساس ($base$)

KVA_T قدرة المحول .

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١٩٦ -

جدول (٧-٤)

مساحة المقطع mm^2	$0.6 / 1 \text{ k.v}$ $\times \Omega / Km$	$5.8 / 10 \text{ k.v}$ $\times \Omega / Km$
3 x 6	0.102	-
3 x 10	0.095	0.142
3 X 16	0.090	0.132
3 X 25	0.086	0.122
3 X 35	0.083	0.112
3 X 50	0.081	0.106
3 X 70	0.079	0.101
3 X 95	0.077	0.098
3 X 120	0.077	0.095
3 X 150	0.077	0.092
3 X 185	0.076	0.090
3 X 240	0.076	0.088
3 X 300	0.075	0.086
3 X 400	0.075	-

جدول (٨-٤)

قدرة المحول KVA	$V \leq 36 \text{ kv}$ X %	$V > 36 \text{ kv}$ X %
up to 630	4	-
630 - 3150	6	-
3150 - 10000	8	10
10000 - 40000	10	11
40000 - 200000	-	12.5

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١٩٧ -

جدول (٩-٤)

قيمة المعاوقة %Z لمحولات ذات ملفين عند تردد 50 Hz

قدرة المحول MVA	قيمة جهد ملفات الجهد العالي				
	للجهود حتى 11 kv	22 kv	33 kv	66 kv	132 k
0.10	4.75	5.00	5.00	-	-
0.25	4.75	5.00	5.00	-	-
0.50	4.75	5.00	5.00	-	-
0.75	4.75	5.00	5.00	-	-
1.00	4.75	5.00	5.00	6.00	-
1.50	5.50	6.00	6.00	7.00	-
2.00	6.00	6.00	6.00	7.00	-
2.50	6.00	6.00	6.00	7.00	-
3.00	6.00	7.00	7.00	7.50	-
4.00	6.00	7.00	7.00	7.50	-
5.00	6.00	7.00	7.00	7.50	-
7.50	7.00	8.00	8.00	8.50	9.00
10.00	9.00	9.00	9.00	9.00	10.00
15.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
20.00	-	10.00	10.00	10.00	10.00
30.00	-	-	10.00	10.00	10.00
45.00	-	-	-	10.00	12.50
60.00	-	-	-	10.00	12.50
75.00	-	-	-	-	12.50

للمحولات 150 kv تؤخذ 15 % - 12 % Z

للمحولات 275 kv تؤخذ 20 % - 15 % Z

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ١٩٨ -

إذا كانت (X/R) للمحول معلومة عند التردد 50 Hz أو بالحصول على هذه النسبة من شكل (٤-٤)، فإنه باستخدام الجدول رقم (١٠-٤) يمكن إيجاد قيم R_n, X_n باستخدام عاملى الضرب للممانعة والمقاومة أى أن :

$$R_n = K R$$

$$X_n = n X$$

كما يمكن الحصول على قيمة عامل الضرب (k) للمقاومة بدلالة n من المنحنى الموضح بشكل (٤-٥).

٤ - بيانات المصدر أو المنفعة (Utility Data)

يجب حساب قدرة النظام KVA_{syst} وذلك لحساب درجة التوافقية n التى يحدث عندها حالة الرنين فى حالة وجود مكثفات قدرتها $KVAR$ بالشبكة حيث :

$$n = \sqrt{\frac{KVA_{syst}}{KVAR}}$$

ولحساب KVA_{syst} يلزم معرفة :

$KVA_{sc} \text{ of utility}$: قدرة دائرة القصر للمصدر .

$KVA_{s.c(T)}$: قدرة دائرة القصر للمحول وتساوى $\frac{KVA_t}{Z\%} \times 100$.

وتكون معادلة KVA_{syst} كالآتى :

$$KVA_{syst} = \frac{KVA_{sc} \text{ of utility} \times KVA_{s.c(T)}}{KVA_{sc} \text{ of utility} + KVA_{s.c(T)}}$$

٥ - المكثفات (Capacitors)

نحتاج الى معرفة قدرة المكثف $KVAR$ أو $MVAR$ والجهد المقنن KV_{LL} ونحسب ممانعة المكثف X_c من المعادلة

$$X_c = - \frac{(KV_{LL})^2}{MVAR} \Omega$$

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

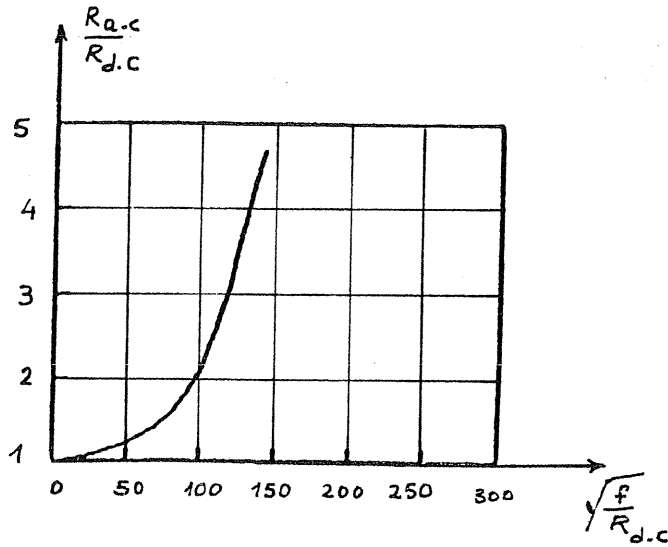
- ١٩٩ -

جدول (١٠-٤)

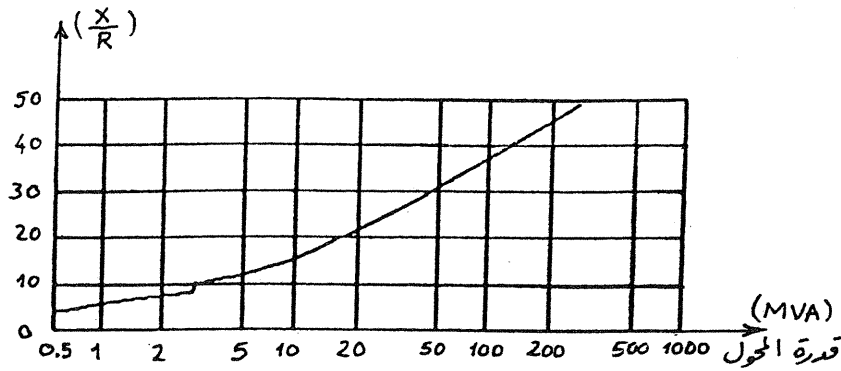
درجة التوافقية n	عامل الضرب للمقاومة (K)	عامل الضرب للممانعة (n)
1	1	1
2	1.5	2
3	2	3
4	3	4
5	4	5
6	5	6
7	6	7
8	8	8
9	10	9
10	11	10
11	12	11
12	16	12
13	17	13
14	21	14
15	23	15
16	27	16
17	29	17
18	33	18
19	37	19
20	40	20
21	43	21
22	47	22
23	53	23
24	56	24
25	61	25

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٠٠ -



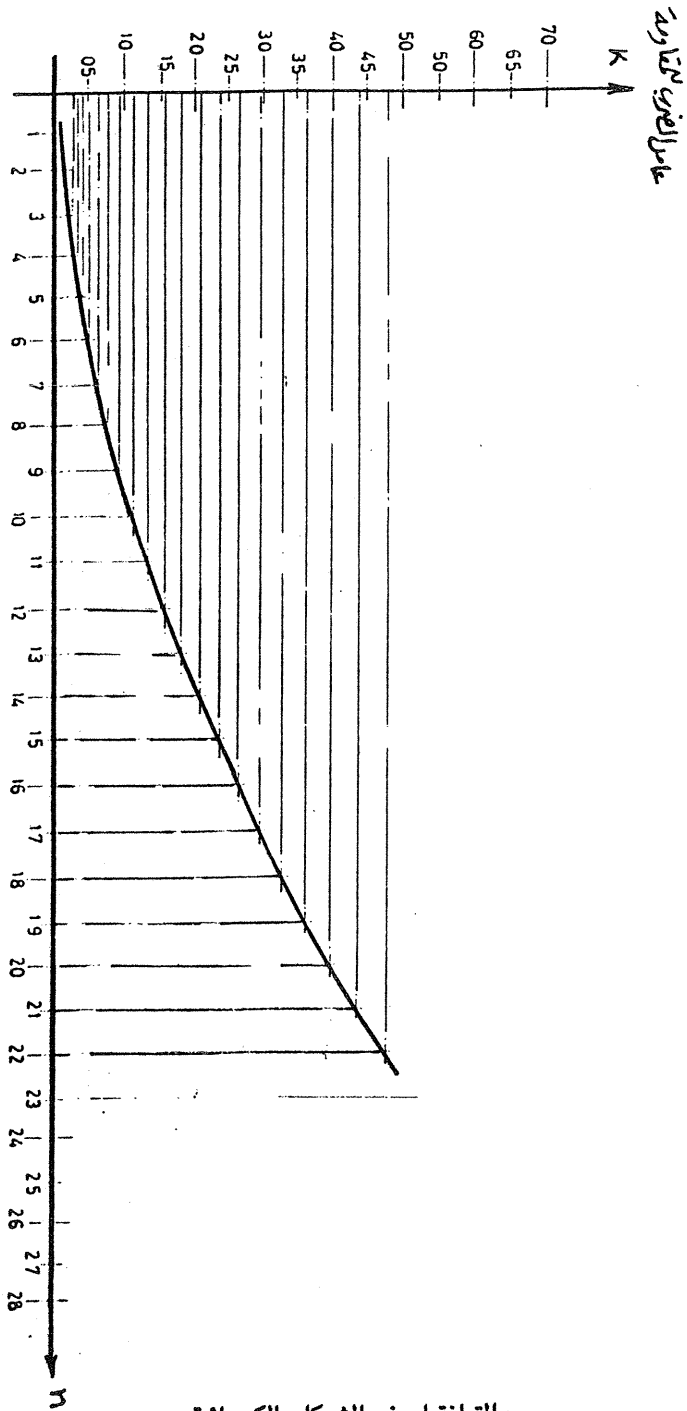
شكل (٣-٤)



شكل (٤-٤)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٠١ -



شكل (٥-٤)

- ٢٠٢ -

وتتغير ممانعة المكثف X_c مع تردد التوافقية n كالآتي :

$$X_{cn} = \frac{1}{n} X_c \quad \Omega$$

ثم تحول الى وحدات $p.u$ من المعادلة

$$X_{cn} = \left(\frac{1}{n} X_c \right) \left(\frac{MVA_b}{KV_{LL}^2} \right)$$

٦ - المفاعلات (Reactors)

نحتاج للبيانات الآتية لحساب المقاومة (R) والممانعة (X) للمفاعل :- قيمة الممانعة X بالاهم- العامل Q والذي يساوي $\frac{\omega L}{R}$ لحساب R, X عند تردد التوافقية n نتبع الآتي

في حالة مفاعل من الألومنيوم تستخدم المعادلة التالية

$$R_n = \left(\frac{0.115 n^2 + 1}{1.115} \right) R = K_1 R$$

اما في حالة مفاعل من النحاس فنستخدم المعادلة التالية

$$R_n = \left(\frac{0.055 n^2 + 1}{1.055} \right) R = K_2 R$$

ويمكن الحصول من جدول رقم (١١-٤) على قيمتي K_2, K_1 وتكون ممانعة المفاعل عند التردد n تساوي

$$X_n = n X$$

٧ - المحركات (Motors)

تعتبر المحركات كأحمال ، ونحتاج للبيانات التالية

- قدرة المحرك بالحصان

- الممانعة دون العابرة (Subtransient reactance) للمحرك والتي يرمز لها X''_d .

- معامل القدرة (في حالة المحركات المتزامنة)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٠٢ -

وتكون مقاومة المحرك عند تردد التوافقية n تساوى

$$R_n = nR$$

وممانعة المحرك عند تردد التوافقية n تساوى

$$X_n = nX$$

كما يجب تحويل قدرة المحرك من الحصان الى KVA حيث $(1 HP = 1 KVA)$ ونحول قيم الممانعة الى وحدات $p.u$ كالآتى :

$$X = X''_d \left(\frac{KVA_b}{KAV_{motor}} \right) \quad p.u$$

ويوضح شكل (٤-٦) أ العلاقة بين $\frac{X}{R}$ وقدرة المحركات التأثيرية ثلاثية الاوجه كما

يوضح شكل (٤-٦) ب العلاقة بين $\frac{X}{R}$ وقدرة المحركات المتزامنة (والمولدات ذات

الاقطاب البارزة) .

٨ - المولدات الموضعية (Local Generators)

تمثل المولدات الموضعية كأحمال على الشبكة الكهربائية . ونحتاج لعدة بيانات عند دراسة التوافقيات مثل :

أ - قدرة المولد KVA

ب - ممانعة المولد (*subtransient reactance*) والتي يرمز لها X''_d

ج - معامل القدرة

ولحساب معاوقة المولد عند تردد التوافقيات فان :

$$R_n = nR$$

$$X_n = nX$$

حيث R, X ممانعة ومقاومة المولد عند التردد الاساسى

R_n, X_n ممانعة ومقاومة المولد عند التردد n

ويمكن الحصول على النسبة $\frac{X}{R}$ من الشكل (٤-٦) ب .

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٠٤ -

جدول (١١-٤)

درجة التوافقية n	عامل الضرب للمقاومة الالومنيوم (K_1)	عامل الضرب للمقاومة النحاس (K_2)
1	1	1
2	1.3094	1.1563
3	1.8251	1.4170
4	2.5471	1.7819
5	3.4753	2.2511
6	4.6098	2.8246
7	5.9506	3.5024
8	7.4977	4.2844
9	9.2511	5.1706
10	11.2107	6.1611
11	13.3766	7.2559
12	15.7488	8.4549
13	18.3273	9.7583
14	21.1121	11.1658
15	24.1031	12.6777

مثال (١-٤)

احسب معاوقة المدخل عند نقطة الربط المشتركة (pcc) لتردد التوافقيات بالشبكة
الموضحة بشكل (٧-٤) أ

الحل :

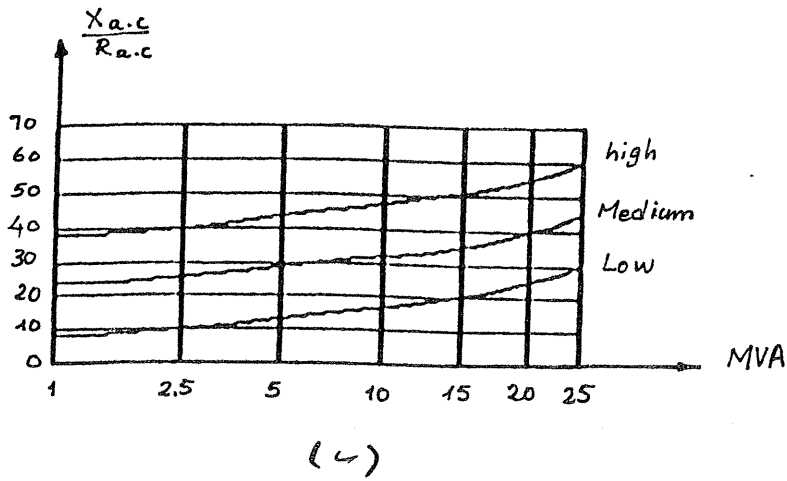
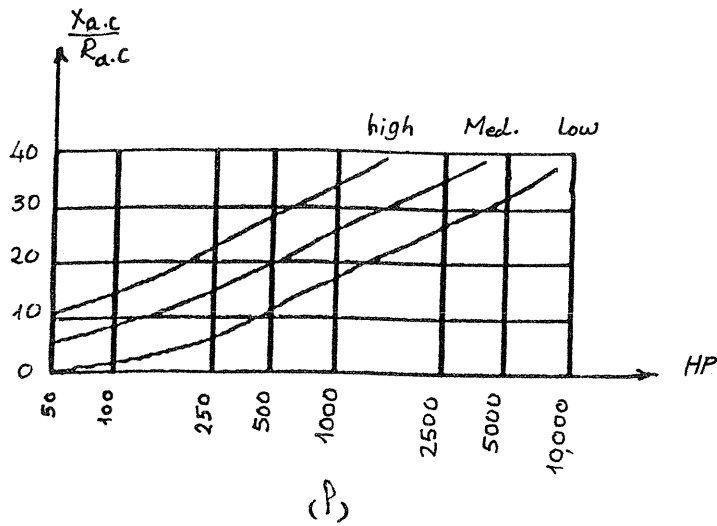
نبدأ بتمثيل معاوقات الشبكة . كما في شكل (٧-٤) ب ونختار $MVA_b = 100$

حساب معاوقة المصدر Z_s

$$Z_{p.u} = \frac{MVA_b}{MVA_{s.c}}$$

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٠٥ -



شكل (٦-٢)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٠٦ -

$$Z_{p.u} = \frac{100}{1000} = 0.1 \text{ p.u}$$

$$R_s = \frac{Z_{p.u}}{\sqrt{\left(\frac{X}{R}\right)^2 + 1}} = \frac{0.1}{\sqrt{(10)^2 + 1}} \simeq 0.01 \text{ p.u}$$

$$X_s = R_s \left(\frac{X}{R} \right) = 0.01 \times 10 \simeq 0.1 \text{ p.u}$$

$$Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2} \simeq 0.0999 \text{ p.u}$$

ونفترض ان معاوقة المصدر Z_s لا تتغير مع تردد التوافقيات

حساب معاوقة المحول T_I

$$Z_{p.u} = \frac{Z \% (MVA_b)}{MVA_T}$$

$$= \frac{0.06 \times 100}{20} = 0.3$$

عند 20 MVA

من شكل (٤-٤) نحصل على $\frac{X}{R} = 20$

$$R_{T_I} = \frac{Z_{p.u}}{\sqrt{\left(\frac{X}{R}\right)^2 + 1}} = 0.015 \text{ p.u}$$

$$X_{T_I} = R_{T_I} \left(\frac{X}{R} \right) = 0.3 \text{ p.u}$$

ثم نحسب R_{T_I} , X_{T_I} عند تردد التوافقيات باستخدام جدول (١٠-٤) كالآتي :

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٠٧ -

عدد التوافقيات n	عامل الضرب للمقاومة k	عامل الضرب للممانعة n	$R_{n(T1)}$	$X_{n(T1)}$
1	1	1	0.015	0.3
2	1.5	2	0.0225	0.6
3	2	3	0.03	0.9
4	3	4	0.045	1.2
5	4	5	0.06	1.5
6	5	6	0.075	1.8
7	6	7	0.09	2.1
8	8	8	0.120	2.4
9	10	9	0.150	2.7
10	11	10	0.165	3.0
11	12	11	0.18	3.3
12	16	12	0.24	3.6
13	17	13	0.255	3.9

حساب معاوقة المحول T_2

$$Z_{p.u} = \frac{Z\% (MVA_b)}{MVA_T} = 1.2$$

من شكل (٤-٤) نحصل على $\frac{X}{R} = 12$ عند 5 MVA

$$R_{T2} = \frac{Z_{p.u}}{\sqrt{\left(\frac{X}{R}\right)^2 + 1}} = \frac{1.2}{\sqrt{(12)^2 + 1}} = 0.0996 \text{ p.u}$$

$$X_{T2} = R_{T2} \frac{X}{R} \simeq 1.1952 \text{ p.u}$$

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٠٨ -

ثم نحسب X_{T2} , R_{T2} عند تردد التوافقيات باستخدام جدول (١٠-٤) كالاتى :

عدد التوافقيات n	عامل الضرب للمقاومة k	عامل الضرب للممانعة n	$R_{n(T2)}$	$X_{n(T2)}$
1	1	1	0.0996	1.1952
2	1.5	2	0.1494	2.3904
3	2	3	0.1992	3.5856
4	3	4	0.2988	4.7808
5	4	5	0.3984	5.9760
6	5	6	0.498	7.1712
7	6	7	0.5976	8.3664
8	8	8	0.7968	9.5616
9	10	9	0.9960	10.7568
10	11	10	1.0956	11.9520
11	12	11	1.1952	13.1472
12	16	12	1.5936	14.3424
13	17	13	1.6932	15.5376

حساب معاوقة المكثف C

$$X_c = \frac{-(KV_{LL})^2}{MVAc}$$

$$X_{c(p.u)} = \frac{X_c (MVA_b)}{(KV_{LL})^2} = - \frac{(MVA_b)}{(MVAc)} = \frac{-100}{0.9} = -111 p.u$$

وتهمل مقاومة المكثف

$$X_{cn} = \frac{X_c}{n}$$

ثم نحسب X_c عند تردد التوافقيات من العلاقة

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٠٩ -

درجة التوافقية n	X_{cn}
1	-111
2	-55.2
3	-37
4	-27.75
5	-22.2
6	-18.5
7	-15.857
8	-13.875
9	-12.333
10	-11.1
11	-10.1
12	-9.25
13	-8.538

حساب معاوقة المحرك

$$X_{p.u} = \frac{X_d'' MVA_b}{MVA_M}$$

$$= \frac{0.17 \times 100}{2} = 8.5 p.u$$

من شكل (٦-٤) أ نحصل على $\frac{X}{R} = 32$ عند 2000 HP

$$R_{p.u} = \frac{X_{p.u}}{32} = \frac{8.5}{32} = 0.2656 p.u$$

ونحسب معاوقة المحرك عند تردد التوافقيات باستخدام العلاقتين :

$$R_n = n R$$

$$X_n = n X_n$$

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢١٠ -

درجة التوافقية n	R_n	X_n
1	0.2656	8.5
2	0.5312	17
3	0.7968	25.5
4	1.0624	34
5	1.328	42.5
6	1.5936	51
7	1.8592	59.5
8	2.1248	68.0
9	2.3904	76.5
10	2.6560	85.0
11	2.9213	93.5
12	3.1872	102
13	3.4528	110.5

ثم نبدأ فى تجميع المعاوقات

١ - محصلة Z_M , Z_C على التوازي

$$= \frac{Z_M Z_C}{Z_M + Z_C}$$

للتوافقية الأولى

$$= \frac{(0.2656 + j 8.5)(-j 111)}{0.2656 + j 8.5 - j 111}$$

$$= 0.3115 + j 9.203$$

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢١١ -

درجة التوافقية n	$R_{C,M}$	$X_{C,M}$
1	0.3115	9.203
2	1.1028	24.475
3	8.1729	81.297
4	20.5778	-148.275
5	1.5891	-46.473
6	0.5169	-29.0522
7	0.2451	-21.6414
8	0.1039	-17.426
9	0.088	-14.701
10	0.0516	-11.027
11	0.0402	-10.7491
12	0.0316	-10.1714
13	0.0242	-9.2577

٢ - تضاف للمحصلة السابقة قيمة معاوقة المحول T_2 على التوالى

درجة التوافقية n	$R_{C,M, T2}$	$X_{C,M, T2}$
1	0.4111	10.3982
2	1.2522	26.8664
3	8.3721	84.8826
4	20.8766	-143.4942
5	1.9875	-40.497
6	1.0149	-21.881
7	0.8427	-13.2483
8	0.9007	-7.8644
9	1.0840	-3.9442
10	1.1472	0.925
11	1.2356	2.3981
12	1.6252	4.171
13	1.7174	6.2799

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢١٢ -

٣ - نحسب محصلة $Z_{S,TI}$ على التوالى

درجة التوافقية n	$R_{S,TI}$	$X_{S,TI}$
1	0.025	0.4
2	0.0325	0.7
3	0.04	1.0
4	0.055	1.3
5	0.07	1.6
6	0.085	1.9
7	0.10	2.2
8	0.13	2.5
9	0.160	2.8
10	0.175	3.1
11	0.19	3.4
12	0.25	3.7
13	0.265	4

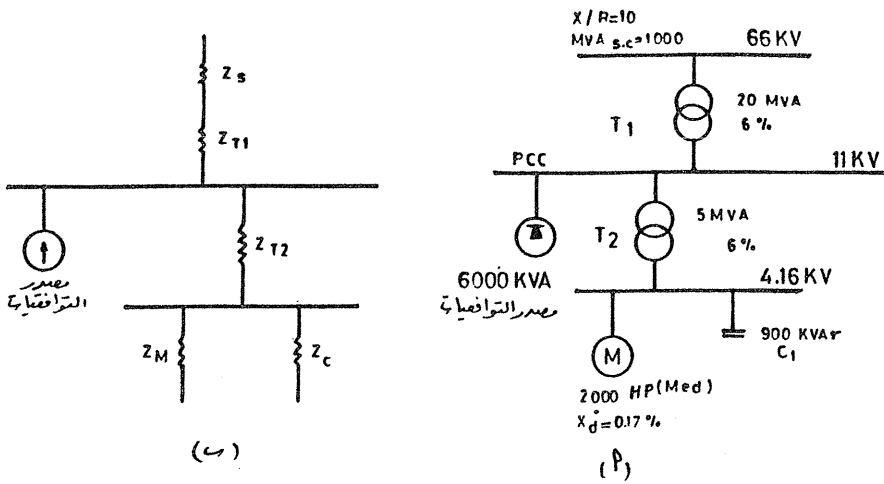
٤ - نحسب محصلة معاوقات البندين ٢ ، ٣ على التوازي :

درجة التوافقية n	المقاومة المكافئة R_{eq}	الممانعة المكافئة X_{eq}	المعاوقة الكلية Z_{eq}
1	0.0238	0.3802	0.3809
2	0.0202	0.6837	0.6840
3	0.0402	0.9884	0.9892
4	0.0576	1.3114	1.3127
5	0.0793	1.6652	1.6671
6	0.1040	2.0722	2.0748
7	0.1765	2.6307	2.6366
8	0.4622	3.5982	3.6277
9	3.9218	5.5397	6.7874
10	2.7003	4.366	5.1335
11	0.4407	1.4741	1.5386
12	0.4189	2.0086	2.0518
13	0.3588	2.4676	2.4935

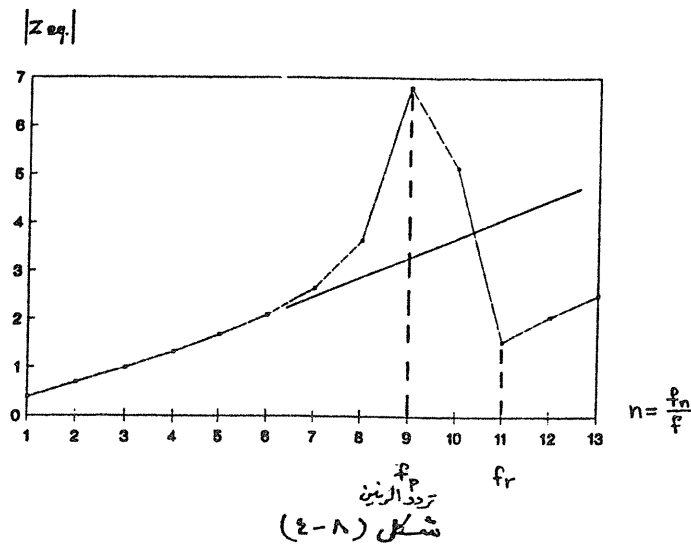
« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢١٣ -

نرسم العلاقة بين معاوقة المدخل الكلية للنظام Z_{eq} والتردد n كما في شكل (٤-٨) ونلاحظ في ان تردد الرنين لهذا المثال عند درجة التوافقية التاسعة .



شكل (٤-٧)



« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢١٤ -

الباب الخامس

الحدود القياسية لقيم التوافقيات

بالشبكة الكهربائية

للمحافظة على المعدات الكهربائية ومكونات الشبكة الكهربائية من الآثار الناتجة من وجود توافقيات التيار والجهد ، فقد نصت اغلب المواصفات القياسية على الحدود المسموحة للعوامل الآتية :

- عامل تشوه الجهد (VDF)

- عامل تشوه التيار (CDF)

- عامل تداخل التليفونات (IT)

وفيما يلي توضيح الحدود القياسية لكل عامل :

١ - عامل تشوه الجهد (Voltage distortion factor)

ان معادلة عامل تشوه الجهد (VDF) هي

$$VDF = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2 \right)^{1/2}$$

حيث

V_1 = جذر متوسط المربعات (rms) لجهد المركبة الاساسية

V_n = جذر متوسط المربعات (rms) لجهد التوافقية n .

وطبقاً للمواصفات القياسية IEEE 519 - 1992 فان حدود تشوه الجهد تبعاً

لجهود الشبكة ومقاساً عند نقطة الربط المشترك (PCC) كما في جدول (١-٥)

جدول (١-٥)

جهد الشبكة الكهربائية	جهد التشوه % عند (pcc)	< 69 KV	69 - 161 KV	>161 KV
اقصى تشوه جهد للتوافقيات المنفصلة Max. for individual harmonics	3	1.5	1	
التشوه الكلي للتوافقيات (THD)	5	2.5	1.5	

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢١٥ -

بينما يجب الا يتعدى التشوه الكلى لتوافقيات الجهد فى الشبكات الصناعية عن القيم المسجلة فى جدول رقم (٥-٢) تبعاً لمستوى الجهد وطبيعة الصناعة. وذلك طبقاً للمواصفات .

IEEE Guide for Harmonic Control and Reactive compensation of static power convertors - 1981 .

جدول (٥-٢)

شبكة عامة	شبكة تحتوى على مبدلات	مستوى الجهد للنظام
5 %	8 %	الجهد المتوسط (2.4-69) kv
1.5 %	1.5 %	الجهد العالى (> 115 kv)

ويوضح جدول (٥-٣) المستويات المناسبة لجهد التوافقيات (كنسبة مئوية من الجهد المقنن للتردد الاساسى) والشبكات الكهربائية للجهود المختلفة وذلك طبقاً للمواصفات القياسية العالمية :

IEC standard 1000 - 2 - 2 1990

Electromagnetic compatibility part 2 : section 2

وطبقاً للمواصفات القياسية لاستراليا 1979 - Australian standard As 2279
نتبع القيم الواردة بجدول (٥-٤)

يوضح جدول (٥-٥) قيم توافقيات الجهد طبقاً للمواصفات القياسية لفنلندا

The Finnish power supply authorities, document restriction of Harmonics in Electrical Networks (1978)

وتكون قيم توافقيات الجهد طبقاً للمواصفات القياسية لنيوزيلاندا

The New Zealand Limitation of harmonic levels notice (1981) .

لخطوط جهد ٦٦ ك. ف او الاعلى . تعبيراً عن توافقيات جهد الوجه بالنسبة للجهد المقنن للوجه ، وذلك كما فى جدول (٥-٦) .

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢١٦ -

جدول (٥-٣)

التوافقيات الفردية (odd) الغير ثلاثية			التوافقيات الفردية (odd) (Triplen) الثلاثية			التوافقيات الزوجية (even)		
درجة التوافقية	جهد التوافقية		درجة التوافقية	جهد التوافقية		درجة التوافقية	جهد التوافقية	
n	الجهد المنخفض LV والجهد المتوسط MV	الجهد العالي H.V	n	الجهد المنخفض LV والجهد المتوسط MV	الجهد العالي H.V	n	الجهد المنخفض LV والجهد المتوسط MV	الجهد العالي H.V
5	6	2	3	5	2	2	2	1.5
7	5	2	9	1.5	1	4	1	1
11	3.5	1.5	15	0.3	0.3	6	0.5	0.5
13	3	1.5	21	0.2	0.2	8	0.5	0.2
17	2	1	>21	0.2	0.2	10	0.5	0.2
19	1.5	1				12	0.2	0.2
23	1.5	0.7				>12	0.2	0.2
25	1.5	0.7						
>25	$0.2 + \frac{12.5}{n}$	$0.2 + \frac{12.5}{n}$						

تشوه التوافقيات الكلي (THD)
 في شبكات الجهد المنخفض والمتوسط = 8 %
 في شبكات الجهد العالي = 3 %

جدول (٥-٤)

التوافقيات الزوجية %	التوافقيات الفردية %	التشوه الكلي للتوافقيات THD %	جهد الشبكة
2	4	5	التوزيع الابتدائي والثانوي حتى جهد 33 kv
1	2	3	خطوط النقل 22.33 - 66 kv
0.5	1	1.5	خطوط النقل 110 kv and above

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢١٧ -

جدول (٥-٥)

مستوى التشوه للتوافقيات المنفصلة (%)	التشوه الكلى للتوافقيات THD%	جهد الشبكة
4	5	11 kv
3	4	3 - 20 kv
2	3	30 - 45 kv
1	1.5	110 kv

جدول (٥-٦)

حدود الجهد	درجة التوافقية الزوجية n	حدود الجهد	درجة التوافقية الفردية n
1.2	2	2.3	3
0.6	4	1.4	5
0.4	6	1.0	7
0.3	8 - 10	0.8	9
0.2	12 - 50	0.7	11
		0.6	13
		0.5	15
		0.4	17 - 21
		0.3	23 - 49

وتكون تشوهات الجهد طبقاً للمواصفات البريطانية

*Electricity Council (1976) Limits for Harmonics in the United
kingdom Electricity supply system*

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢١٨ -

كما فى جدول (٥-٧)

كما أن المستويات المناسبة المقترحة لتوافقيات الجهد بالمصانع (*industrial plant*) طبقاً للمواصفات القياسية (IEC 1000 - 2 - 4 (1992 - 07 - 24) Draft standard) وهى مقسمة الى الثلاثة اقسام التالية :

- القسم ١ خاص بالبيئة المحمية (*Class 1 : Protected environment*)

- القسم ٢ طبقاً لطبيعة استعمال الشبكات (*Class 2 : utility network condition*)

- القسم ٣ خاص بالبيئة الصناعية (*Class 3 : Industrial environment*)

والموضحة بجدول رقم (٥-٨) ويلاحظ فى هذا الجدول ان محتويات القسم ٢ هى نفسها المواصفات القياسية العالمية IEC الموضحة بجدول رقم (٥-٣)

فى جدول (٥-٨) أ ثم عمل مقارنة بين قيم تشوه الجهد للمواصفات القياسية المختلفة والتي يتضح منها ان التشوه الكلى لتوافقيات الجهود المنخفضة والمتوسطة تكون فى حدود ٥ ٪ - ٨ ٪ .

جدول (٥-٧)

تشوه توافقيات الجهد		التشوه الكلى لتوافقيات الجهد ٪	جهد الشبكة kv
التوافقيات الزوجية	التوافقيات الفردية		
2	4	5	0.415
1.75	3	4	6.6 - 11
1	2	3	33 - 66
0.5	1	1.5	132

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢١٩ -

جدول (٨-٥)

التوافقيات الفردية (odd) الغير ثلاثية				التوافقيات الفردية (odd) الثلاثية				التوافقيات الزوجية (even)				التوافقيات البينية inter harmonics			
درجة التوافقية n	جهد التوافقية			درجة التوافقية n	جهد التوافقية			درجة التوافقية n	جهد التوافقية			درجة التوافقية n	جهد التوافقية		
	class 1	class 2	class 3		class 1	class 2	class 3		class 1	class 2	class 3		class 1	class 2	class 3
5	3	6	8	3	3	5	6	2	2	2	3	<11	0.2	0.2	2.5
7	3	5	7	9	1.5	1.5	2.5	4	1	1	1.5	11-13	0.2	0.2	2.25
11	3	3.5	5	15	0.3	0.3	2	6	0.5	0.5	1	13-17	0.2	0.2	2
13	3	3	4.5	21	.2	0.2	1.75	8	0.5	0.5	1	11-19	0.2	0.2	2
17	2	2	4	>21	0.2	0.2	1.0	10	0.5	0.5	1	19-23	0.2	0.2	1.75
19	1.5	1.5	4					>10	0.2	0.2	1	23-25	0.2	0.2	1.5
23	1.5	1.5	3.5									>25	0.2	0.2	1
25	1.5	1.5	3.5												
>25	0.2+	0.2+	5+												
	$\frac{12.5}{n}$	$\frac{12.5}{n}$	$\sqrt{\frac{11}{n}}$												

التشوه الكلي للتوافقيات THD

5 % in class 1
8 % in class 2
10 % in class 3

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٠ -

جدول (٨-٥) ١

طبقة	المواصفات القياسية			IEC 1000-2-2		طبقة	المواصفات القياسية
	البريطانية	البريطانية	يفتندا	باسترايا	H.V L.V- M.V		
المقترحة	56-11 KV	0.415 KV	11 KV	UP 10 33 KV		2.3 - 69 KV	التشوه
	1.75 % 3 %	النوعية 2% الفردية 4%	4%	النوعية 2% الفردية 4%		3%	أقصى تشوه للتوافقيات المنفصلة
البيئة الحية 5% تبدأ لاستعمال الشبكات 8% البيئة الصناعية 10%	4 %	5 %	5 %	5 %	3% 8 %	شبكة عامة 5% شبكة تحصى 8% على معدلات	THD

- ٢٢١ -

٢ - عامل تشوه التيار (Current Distortion Factor)

ان معادلة عامل تشوه التيار (CDF) هي

$$CDF = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \right)^{1/2}$$

حيث :

I_1 = جذر متوسط المربعات (rms) لتيار المركبة الاساسية .

I_n = جذر متوسط المربعات (rms) لتيار التوافقية n .

يوضح جدول (٥-٩) وشكل (٥-١) حدود تشوه التيار طبقاً للمواصفات القياسية الامريكية IEEE - 519 للاحمال غير الخطية والجهود من 2.4kv وحتى 69kv وذلك للتوافقيات الفردية . بينما يحدد تشوه التيار للتوافقيات الزوجية بقيمة ٢٥ ٪ من قيمة تشوه التيار للتوافقية الفردية الاعلى .

يستخدم جدول (٥-٩) ايضاً للجهود من 69 kv وحتى 138 kv ولكن باستخدام 50% من القيم الواردة بالجدول .

ويوضح جدول (٥-١٠) حدود تشوه التيار طبقاً للمواصفات القياسية البريطانية (Engineering recommendation G5-3 september 1976)

وتكون حدود تشوه التيار طبقاً للمواصفات القياسية لنيوزيلاندا

The New Zealand Limitation of Harmonic level notice (1981)

للجهود 110 KV , 66 KV , 220 KV هي الموضحة بجدول رقم (٥-١١)

بينما تكون مستويات تيارات التوافقية في المواصفات الفنلندية .

The Finnish power supply authorities document "Restriction of Harmonics in Electrical Networks".

منسوبة الى استهلاك المشترك وليس الى القيمة المطلقة لمستوى التيار عند pcc ويحسب هذا التيار من العلاقة الآتية :

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٢٢ -

جدول (٩-٥)

أقصى تشوه لتيار التوافقية كنسبة من القيمة الأساسية %						
I_{sc}/I_L	درجة التوافقية الفردية					THD
	$n < 11$	$11 < n < 17$	$17 < n < 23$	$23 < n < 35$	$35 < n$	
< 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

حيث

I_{sc} = أقصى تيار قصر عند pcc .

I_L = أقصى تيار الحمل (للتردد الأساسي) عند pcc .

جدول (١٠-٥)

n رتبة لتوافقة جهد kv النظام	تيار التوافقيات (A rms)																		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
0.415	48	34	22	56	11	40	9	8	7	19	6	16	5	5	5	6	4	6	
6.6 - 11	13	8	6	10	4	8	3	3	3	7	2	6	2	2	2	2	1	1	
33	11	7	5	9	4	6	3	2	2	6	2	5	2	1	1	2	1	1	
132	5	4	3	4	2	3	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1	

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٢٣ -

جدول (١١-٥)

درجة التوافقية <i>n</i>	حدود تيار التوافقية (بوحدة الامبير - عند الجهد الاسمي للشبكة)		
	220 kv	110 kv	66 kv
3	5.7	2.9	1.7
5	3.4	1.7	1.1
7	2.5	1.3	0.8
9	1.9	1.0	0.6
11	1.6	0.8	0.5
13	1.4	0.7	0.4
15	1.2	0.6	0.4
17	1.0	0.5	0.3
19 - 21	0.9	0.5	0.3
23	0.8	0.4	0.3
25 - 49	0.7	0.4	0.3
2	2.9	1.5	0.9
4	1.5	0.8	0.5
6	1.0	0.5	0.3
8	0.8	0.4	0.3
10	0.6	0.3	0.2
12,14	0.5	0.3	0.2
16,18	0.4	0.2	0.2
20 - 50	0.3	0.2	0.2

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٢٤ -

$$I_{ref} = \frac{P_e}{\sqrt{3} V}$$

حيث :

V = الجهد الاسمي للنظام

P_e = القدرة المتوسطة في الساعة للمستهلك (Consumer's hourly mean power)

ويوضح جدول رقم (١٢-٥) التشوه الكلي لتيار التوافقيات (THD) وتيار التوافقيات المنفصلة .

وطبقاً للمواصفات القياسية IEEE standard 519 - 1981 فان جدول (١٣-٥) يوضح نسبة تيارات التوافقيات الناتجة من الموحّدات (rectifiers) ويلاحظ اختلاف القيمة النموذجية عن القيمة النظرية ويرجع هذا الى أن تيار التوحيد لا يتحول من حالة الفصل الى حالة التوصيل لحظياً ويوضح شكل (٢-٥) تمثيل بياني للقيم النموذجية والنظرية في حالة مبدل ٦ - نبضات.

تخضع الانشاءات المحتوية على مبدلات (convertors) في المواصفات القياسية الفرنسية . لسماحية لكل مشترك عند pcc كالآتي :

- تكون التوافقيات الزوجية ٠,٦ ٪ من الاساسية .

- تكون التوافقيات الفردية ١ ٪ من الاساسية

- يكون التشوه الكلي للتوافقيات ١,٦ ٪

وهذا يضمن الا يزيد التشوه الكلي للتوافقيات عند pcc عن ٥ ٪ عندما يتصل جميع المشتركين معاً .

ولحساب حجم المبدل (converter size) تستخدم معاوقة التوافقية (harmonic impedance من المعادلة الآتية

$$Z_n = \alpha n Z_{cc}$$

حيث Z_n = معاوقة التوافقية عند نقطة الربط .

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٢٥ -

جدول (١٢-٥)

جهد النظام	التشوه الكلى لتيار للتوافقيات % THD	تيار التوافقيات %
3 - 20 kv	10	8
30 - 45 kv	7	6
110 kv	5	4

جدول (١٣-٥)

درجة التوافقية <i>n</i>	٦ نبضات - ثلاثة أوجه		١٢ نبضة - ثلاثة أوجه	
	القيمة النظرية	القيمة النموذجية	القيمة النظرية	القيمة النموذجية
5	20.0	17.5	-	2.6
7	14.3	11.1	-	1.6
11	9.1	4.5	9.1	4.5
13	7.7	2.9	7.7	2.9
17	5.9	1.5	-	0.2
19	5.3	1.0	-	0.1
23	4.3	0.9	4.3	0.9
25	4.0	0.8	4.0	0.8

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٢٦ -

$$Z_{cc} = \frac{V}{S_c}$$

حيث :

 Z_{cc} = معاوقة دائرة القصر عند المصدر V = قيمة الجهد الاساسى (فولت) S_c = تيار القصر - ثلاثة اوجه (أمبير) n = درجة التوافقية α = معامل يؤخذ كالاتى $\alpha = 2$ فى شبكات الجهد العالى $\alpha = 3$ فى شبكات الجهد المتوسط $\alpha = 1$ فى شبكات الجهد المنخفض S_n = قدرة المبدلوتكون القيمة $\frac{S_c}{S_n}$ كما فى جدول رقم (١٤-٥)

وتحدد المواصفات القياسية السويدية (Sweden) حدود قدرة المبدل للجهود حتى ٢٤ ك.ف كما فى جدول (١٥-٦) حيث تسمح بتشويه كلى للتوافقيات THD كما فى جدول

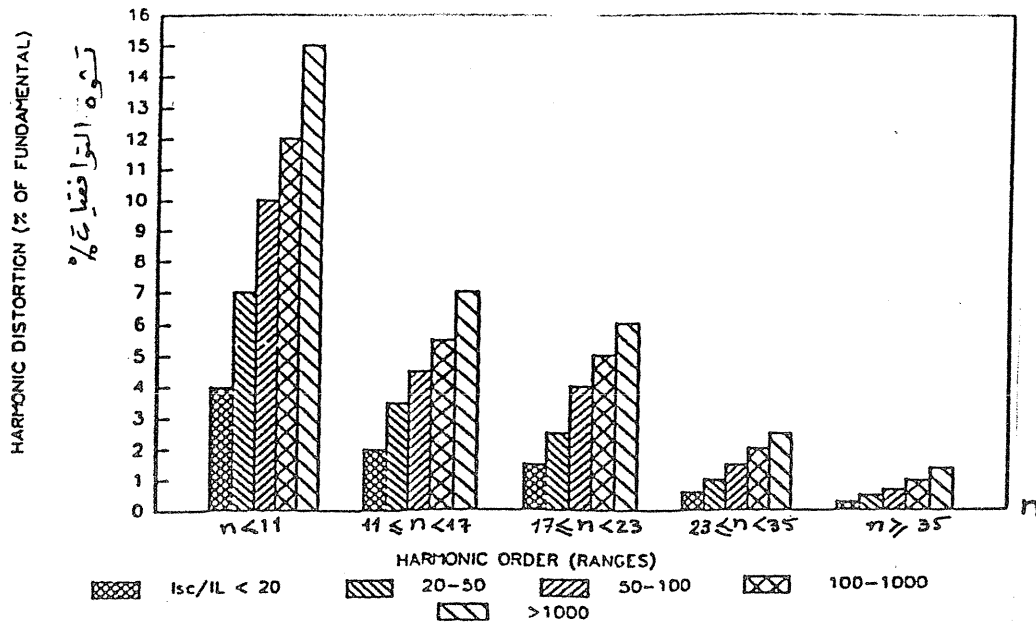
(١٦-٥)

تحدد المواصفات القياسية الفنلندية (Finland) حدود قدرة المبدل للجهود ٢٠ ك.ف، ٣٠ ك.ف كما فى جدول (١٧-٦) .

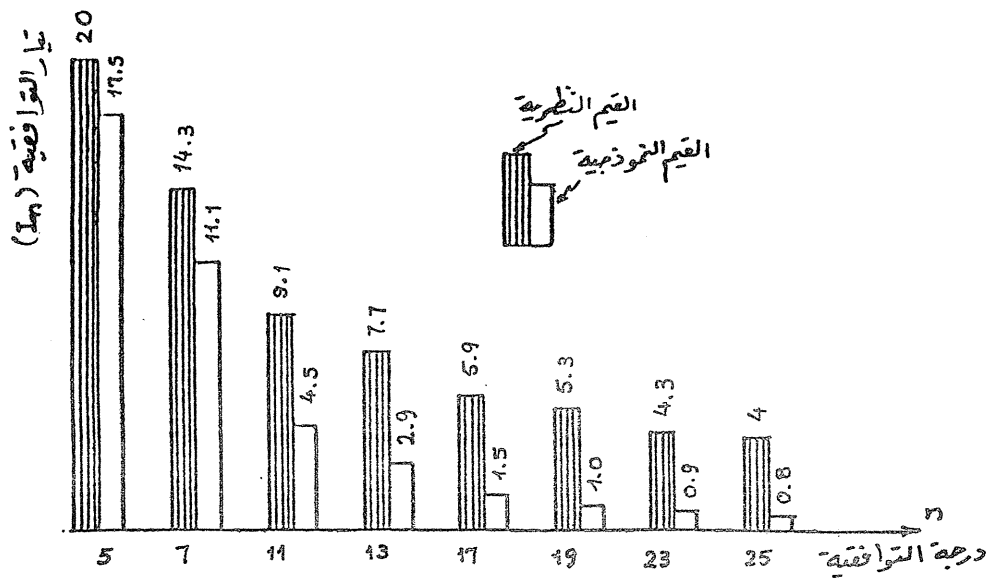
وفى المواصفات البريطانية Engineering Recommendation G 5/3 حددت اقصى حجم للمبدلات التى عند توصيلها بالشبكة لايؤخذ فى الاعتبار مستويات التوافقيات الناتجة . وقد سجلت هذه القيم فى جدول رقم (١٨-٥) ولكن إذا زادت الاحجام عن هذه القيم فانها تصدر توافقيات تبعاً للجدول القياسية لتوافقيات التيار والجهد ويكون اقصى حمل للمبدلات احادية الانشاء للحصول على تيارات توافقيات فى الحدود المسموحة مسجلاً بجدول رقم (١٩-٥) تبعاً لجهد الشبكة ولنوع المبدل .

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

٢٢٧



شكل (٥-١)



شكل (٥-٢)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٢٨ -

جدول (١٤-٥)

جهد النظام	مبدل ٦ نبضات	مبدل ١٢ نبضة
الجهد العالي	240	150
الجهد المتوسط	360	225
الجهد المنخفض	120	75

جدول (١٥-٥)

عدد النبضات	قدرة القصر للنظام %
< 6	0.5
6	1.0
12	2.0
> 12	3.0

جدول (١٦-٥)

جهد النظام	THD %
430 / 250 V	4
3.3 - 24 kv	3
≤ 84 kv	1

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٢٩ -

جدول (١٧-٥)

عدد النبضات	جهد النظام 20 kv	جهد النظام 30 kv
< 6	0.5	-
6	1	0.5
12	2	1
> 12	3	2

جدول (١٨-٥)

جهد النظام PCC عند (KV)	مبدلات ثلاثية الاوجه			منظمات تيار متردد ثلاثية الاوجه	
	٣ نبضة KVA	٦ نبضة KVA	١٢ نبضة KVA	٦ ثيريزتوات KVA	٣ ثيريزتوات / موحد KVA
0.415	8	12	-	14	10
6.6 - 11	85	130	250	150	100

- ٢٣٠ -

جدول (١٩-٥)

جهد الشبكة (KV) عند PCC	نوع المبدل	الفترة المسموحة KVA وعدد النبضات المؤثرة المقابلة للانشاءات ثلاثية الوجة		
		٣ نبضات	٦ نبضات	١٢ نبضة
0.415	بدون تحكم uncontrolled	-	150	300
	تحكم نصفى Half controlled	-	65 *	-
	نوتحكم Controlled	-	100	150
6.6 - 11	بدون تحكم	400	1000	3000
	تحكم نصفى	-	500 *	-
	نوتحكم	-	800	1500
33	بدون تحكم	1200	3000	7600
	تحكم نصفى	-	1200 *	-
	نوتحكم	-	2400	3800
132	بدون تحكم	1800	5200	15000
	تحكم نصفى	-	2200 *	-
	نوتحكم	-	4700	7500

* بالنسبة الى قناطر نصف تحكم ٣ ديود / ٣ ثيريزتور .

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٣١ -

حدود تيار وجهد التوافقيات للجهد المنخفض

(طبقاً للمواصفات العالمية القياسية 2- IEC 555)

للمعدات احادية الوجة والجهد المقنن ٢٢٠ - ٢٦٠ فولت والتردد ٥٠ هرتز فان القيم القياسية للنسبة المئوية لاقصى جهد توافقية *Maximum voltage Harmonic ratios* تبعاً لدرجة التوافقية موضحة فى الجدول رقم (٢٠-٥)

جدول (٢٠-٥)

النسبة المئوية لاقصى جهد التوافقية % <i>Maximum voltage harmonic ratios %</i>	درجة التوافقية <i>Harmonic order</i>
التوافقيات الفردية (<i>odd</i>)	
0.85	3
0.65	5
0.6	7
0.4	9
0.4	11
0.3	13
0.25	15 - 39
التوافقيات الزوجية (<i>even</i>)	
0.3	2
0.2	4 - 40

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٣٢ -

ونحصل على حدود تيار التوافقيات باستخدام الجدول رقم (٢٠-٥) وبافتراض ان المعاوقة الداخلية (internal impedance) والتي تعرف ايضاً بمعاوقة الاسناد (reference impedance) عند كل تردد توافقية تساوى

$$Z_{ref} = (0.4 + jn 0.25) \Omega$$

حيث n درجة التوافقية

ويوضح جدول (٢١-٥) اقصى تيار توافقية مسموح لكل درجة توافقية

جدول (٢١-٥)

اقصى تيار توافقية مسموح به (امبير) Max. permissible harmonic current (A)	درجة التوافقية harmonic order
التوافقيات الفردية	
2.3	3
1.14	5
0.77	7
0.4	9
0.33	11
0.21	13
$0.15 \left(\frac{0.15}{n} \right)$	15 - 39
التوافقيات الزوجية	
1.08	2
0.43	4
0.3	6
$0.23 \left(\frac{8}{n} \right)$	8 - 20

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٢٢ -

ولاعتبار قيم نسبة أقصى جهد توافقية وقيم المعاوقة الداخلية لقيم نموذجية بنظام توزيع الجهود المنخفضة ، ولكن تستخدم للاسترشاد وإدراك الاضطرابات نتيجة المعدات .

٣ - تداخل التليفونات Telephone Interference

يدل هذا العامل عن الاضطرابات الحادثة في خطوط التليفونات ويعبر عنه بالمعادلة العامة التالية .

$$IT = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (I_n W_n)^2}$$

حيث :

I_n = قيمة جذر متوسط المربعات (rms) لتيار التوافقية n المار بالشبكة

W_n = عامل تأثير التليفون (TIF) او عامل الوزن والذي يعتمد على الترددات .

ويوضح جدول (٢٢-٥) العلاقة بين التردد (لشبكة 60 Hz) وعامل تأثير التليفون تبعاً للمواصفات القياسية العالمية 1981 - IEEE 519 .

جدول (٢٢-٥)

f	W_n	f	W_n	f	W_n	f	W_n
60	8.5	1020	5100	1860	7820	3000	9670
180	30	1080	5400	1980	8330	3180	8740
300	225	1140	5630	2100	8830	3380	8890
360	400	1260	6050	2160	9880	3540	6730
420	650	1380	6370	2220	9330	3660	6130
540	1320	1440	6650	2340	9840	3900	4400
660	2260	1500	6680	2460	10340	4020	3700
720	2760	1620	6970	2580	10680	4260	2750
780	3360	1740	7320	2820	10218	4380	2190
900	4350	1800	7570	2940	9020	4980	840

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٣٤ -

الباب السادس

قياس التوافقيات

Harmonic Measurements

ان وجود التوافقيات فى الشبكة الكهربائية مؤكد نتيجة طبيعية الاحمال الصناعية ، ولكن هل هى فى حدود القيم المسموحة عالمياً او اكبر . وهل يوجد اكثر من مصدر للتوافقيات على قضبان الربط المشتركة (pcc) . وهل سيتم اضافة احمال مصدرة للتوافقيات على نفس القضبان مستقبلاً وعموماً وفى حالة وجود اكثر من مصدر للتوافقيات فان تيارات التوافقيات تجمع اتجاهياً وحيث ان قيمة وزاوية كل توافقية تكون منسوبة الى المركبة الاساسية . فانهما سوف يتغيرا مع تغير الاحمال . ولذلك فإنه من الصعب جداً التنبؤ بقيم التوافقيات او التشوه الحادث فى موجات الشبكات الكهربائية .

علماً بان القياس هو افضل الطرق لتحديد التوافقيات بالشبكات الكهربائية .

وفى هذا الباب سنتعرض لفكرة مبسطة عن أجهزة قياس التوافقيات او محلات التوافقيات (*Harmonic Analysers*) كما سنذكر بعض امثلة لهذه الاجهزة والتي يمكن ان تقيس توافقيات التيار والجهد عند كل توافقية ، كما تقيس التشوه الكلى للتيار والجهد . وهذه الاجهزة اما ان تكون احادية الوجه او ثلاثية الوجة . ومعظمها لها درجة دقة عالية جداً .

وقد تطورت أجهزة محلات التوافقيات (*Harmonic Analysers*) تطوراً كبيراً جداً فى الآونة الاخيرة نتيجة التقدم الكبير فى صناعة الالكترونيات ، وفيما يلى امثلة من الاجهزة القديمة والحديثة .

يوضح شكل (١-٦) مثلاً لمكونات محلل توافقيات من الطرازات القديمة حيث يتم من خلاله قياس قيمة التوافقيات المختلفة الموجودة فى موجة المدخل بطريقة مباشرة ويتكون الجهاز من :

- دينامومتر غير استاتيكي (*astatic dynamometer*) يحتوى على ملفين احدهما الملف المتحرك (*moving coil*) والذى يمر به تيار يتناسب مع الجهد المراد قياس توافقياته وملف ثابت (*Fixed coil*) يمر به التيار I_a والذى يعرف بتيار

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٣٥ -

التحليل (analysing current) ويتغير تردده بحيث يساوى التردد الاساسى او تردد التوافقيات الموجوده فى الموجة المقاسة . ونحصل على التردد المتغير باستخدام محرك المتزامن (synchronous motor)، يقوم بتشغيل قرص التلامس الذى يحتوى على مجموعة من نقط التلامس على شكل حلقات مركزية ، حلقة لكل توافقية ، وتكون نقط التلامس كافية لعدد التوافقيات المطلوب قياسها ، ويرتبط القرص بصمام ثلاثى (triode valve) ، ويتحول التيار I_a الى أنود (Anode) الصمام من خلال محول ربط . ويمكن قياس التوافقيات الفردية حتى الدرجة الخامسة والثلاثين .

وعند تساوى تردد تيارى الملفين الثابت والمتحرك فان انحراف الدينامومتر يستقر .

وتكون معادلة التيار المار بالملف المتحرك هى :

$$i = I_0 + I_1 \sin (\theta + \Phi_1) + I_2 \sin (2\theta + \Phi_2) + I_3 \sin (3\theta + \Phi_3) \\ + \dots + I_n \sin (n\theta + \Phi_n)$$

ويعبر عن التيار i_a كالآتى :

$$i_a = I_a \sin (m\theta + \Phi_a)$$

اى ان التيار i_a له تردد التوافقية رقم m

ويتناسب العزم اللحظى T مع i_a ، i

$$T \propto i i_a$$

ويكون متوسط العزم T_m

$$T_m \propto \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i i_a d\theta$$

وبالتعويض عن قيمتى i_a ، i تصبح معادلة T_m كالآتى

$$T_m \propto \frac{I_a I_m}{2} \cos (\Phi_m - \Phi_a)$$

$$\propto I_a' I_m' \cos (\Phi_m - \Phi_a)$$

$$\text{or } D' = K I_a' I_m' \cos (\Phi_m - \Phi_a)$$

حيث $D' =$ أنحراف الدينامومتر ويتناسب مع T_m .

$I_a' =$ جذر متوسط مربعات (rms) تيار التحليل

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٣٦ -

$I_m' =$ جذر متوسط مربعات (rms) تيار التوافقية m بالملف المتحرك
 $K =$ ثابت المعايرة للدينامومتر .

يتم تغيير زاوية التيار I_a بتدوير حامل الفرش ($brush arm$) على القرص حتى
 نحصل على $\Phi_a = \Phi_m$ وعندئذ نحصل على أقصى انحراف

$$D_{max}' = K I_a' I_m'$$

وتكون قيمة التوافقيات كنسبة من الجهد الاساسى المقاس بالفولتميتر (v) .

وتعتمد الاجهزة الحديثة على وجود مرشح (او مرشحات) امرار الترددات العالية
 ($High pass filter$) لعزل التوافقيات عن المركبة الاساسية ولقياس كل من المركبة
 الاساسية والتوافقيات ، ويوضح شكل (٦-٢) تمثيلاً لحلل التوافقيات باستخدام مرشح
 (F) ويكون عامل التشوه ($Distortion Factor$) هو النسبة بين جذر متوسط المربعات
 للكميتين V, V_n أى ان : $D = V_n / V$

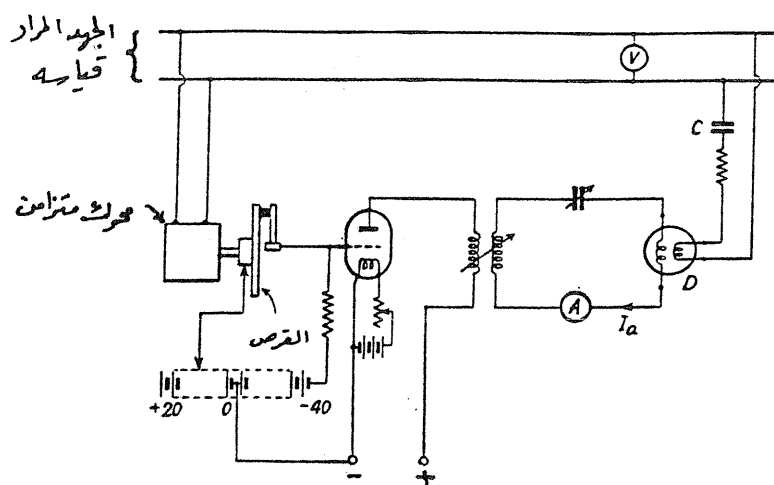
ويوضح شكل (٦-٢) ب تمثيل توضيحي لحلل التوافقيات لقياس التوافقيات الثالثة
 والخامسة والسابعة والتاسعة من خلال مرشحات توالى ويتم قياس جهد المدخل من خلال
 فولتميتر ، وتقاس التوافقيات كنسبة من المركبة الاساسية .

ويوضح الشكل (٦-٣) نوعاً آخر من محلل التوافقيات باستخدام مكبر رفض
 ($rejection amplifier$) يتكون من قنطرة "وين" ($Wein Bridge$) ومكبرين
 ($amplifiers$) ويكون مخرج مكبر الرفض عبارة عن التوافقيات الموجودة فى موجة
 المدخل . وتحتوى دائرة مكبر الرفض على مرحلتين للتكبير من خلال مكبر متقدم
 ($Preamplifier$) ومكبر قنطرة ($Bridge amplifier$) ، وتعمل قنطرة "وين" كمرشح ،
 ويحدث اتزان القنطرة عند تردد واحد فقط .

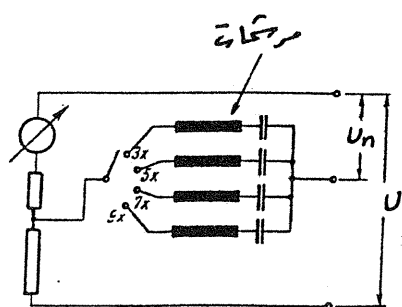
وعند حدوث الاتزان ينتج اقل جهد مخرج . وتولف مكونات القنطرة عند التردد
 الاساسى المطلوب . ويمثل الكاشف الصفرى ($Null detector$) بالمفتاح s . عند
 توصيل المفتاح s فان موجة المدخل تمر من خلال R_1, R_2 ويقرأ العداد موجه المدخل
 (المركبة الاساسية والتوافقيات) بينما عند فتح s فان العداد يقرأ التوافقيات فقط .
 ويمكن التحكم فى تدريج قراءة العداد عن طريق مقاومة التحكم فى دائرة المدخل .

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

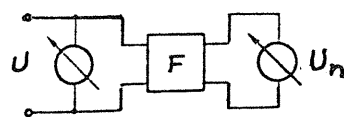
- ٢٣٧ -



شكل (٦-١)



(٦)



(٦)

شكل (٦-٢)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٣٨ -

عموماً تصنف اجهزة قياس التوافقيات الى النوعين التاليين :

- المحلل الطيفي *Spectrum analyser*

يعمل هذا المحلل لمدى ترددات محددة ، حيث يقيس قيمة الإشارة (*Signal amplitude*) عند كل الترددات خلال هذا المدى . وعند قياس التوافقيات يجب ان تكون ترددات التوافقيات محددة بالنسبة للتردد الاساسى لنفس الموجة .

- محلل التوافقيات *Harmonic analyser*

هذا المحلل يقيس قيمة الإشارة عند ترددات التوافقيات فقط وتقاس الترددات بالنسبة للتردد الاساسى ويجهز محلل التوافقيات بطيف مخرج (*output spectrum*) وهو عبارة عن مجموعة فرعية معينة لقيمة إشارة الطيف المنتجة بواسطة المحلل الطيفي الذى يغطى فقط مدى التردد المحتوى على التوافقيات .

ويوضح شكل (٦-٤) تمثيلاً لموجة مدخل مشوهه للمحلل (على محورى الزمن والقيمة) ومخرج المحلل وهو عبارة عن قيمة التوافقيات عند ترددات التوافقيات (على محورى التردد والقيمة) ، مع تمثيل الموجات على الثلاثة محاور معاً (الزمن - القيمة - التردد).

وتعتبر المرشحات من المكونات الرئيسية للمحلات لذلك سنتعرض لبعض انواعها .
يوضح شكل (٦-٥) أ خاصية مرشح امرار نطاقى (*Band pass filter*) نموذجى له مدى نطاق (*Bandwidth*) يساوى

$$B = f_u - f_l$$

بينما يوضح شكل (٦-٥) ب ، الخاصية الحقيقية لمرشح الامرار النطاقى .

مرشحات التحليل الطيفي

يستخدم نوعين من المرشحات فى التحليل الطيفي هما :

- مرشح ذو عرض نطاق مطلق ثابت *Constant absolute bandwidth filter*

- مرشح ذو عرض نطاق مئوى ثابت *Constant percentage bandwidth filter*

يعبر عن تردد المركز (*center frequency*) لمرشح ذى عرض نطاق مطلق ثابت

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٣٩ -

بالمعادلة :

$$f_c = \frac{f_l + f_u}{2}$$

حيث :

$$f_l = \text{اقل تردد للمرشح}$$

$$f_u = \text{اعلى تردد للمرشح}$$

يحدد هذا المرشح عرض النطاق B_a لموجة المدخل بغض النظر عن تردد المركز ويفضل استخدام هذا النوع لقياس التوافقيات حيث انه يحافظ على نفس الثبات ويحدث فصل للتوافقيات عند كل تردد على الرغم من انخفاض مدى التردد .

بينما يعبر عن تردد المركز لمرشح ذى عرض نطاق مئوى ثابت من المعادلة :

$$f_c = \sqrt{f_l f_u}$$

وهذا النوع عبارة عن مرشح له ثابت Q ، واما عرض النطاق B_p لموجة المدخل فيخضع للمعادلة الآتية :

$$B_p / f_c = \text{constant}$$

ويوضح شكل (٦-٦) العلاقة بين مدى النطاق للمرشحين المطلق والمئوى فى حالة التدرجين الخطى واللوغرىمى .

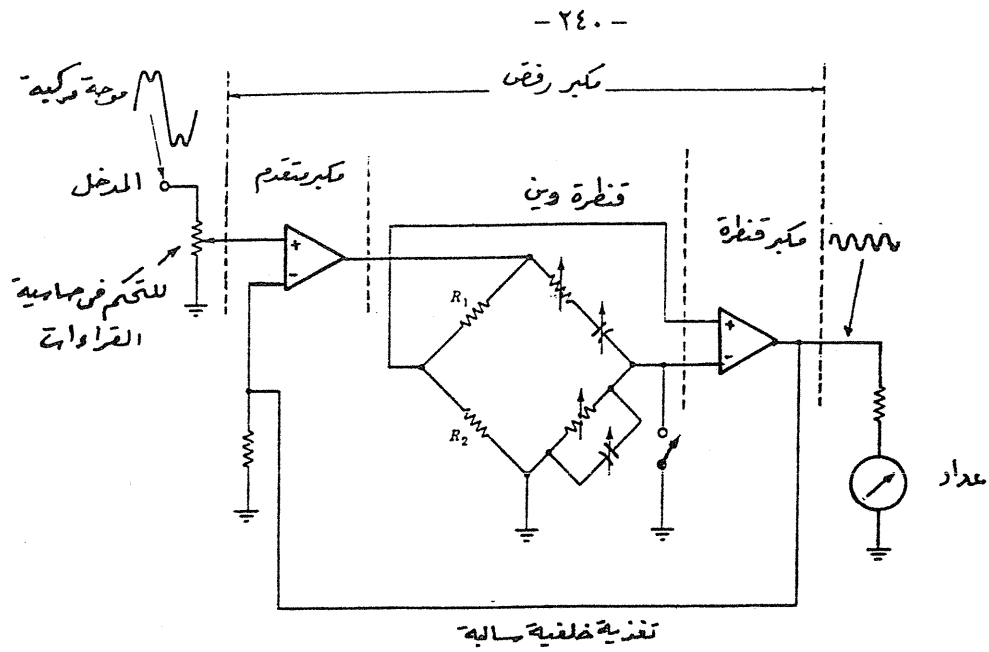
وفى شكل (٦-٧) تتضح العلاقة بين التردد وعرض النطاق للمرشحين المطلق والمئوى وعلى سبيل المثال ، لتحليل التوافقيات فى شبكة ترددها ٥٠ هرتز باستخدام نوعى المرشحين المطلق والمئوى مع العلم ان لكل من المرشحين عرض نطاق يساوى 10 Hz (ويكون تردد المركز عند $\pm 5 \text{ Hz}$) عند التوليف للتردد الاساسى . وعلى ذلك فعند التوافقية العشرين (اى عند التردد $1000 \text{ Hz} = 20 \times 50$) يكون عرض النطاق كالاتى :

$$\text{مرشح ذى عرض نطاق مطلق ثابت} = 10 \text{ Hz}$$

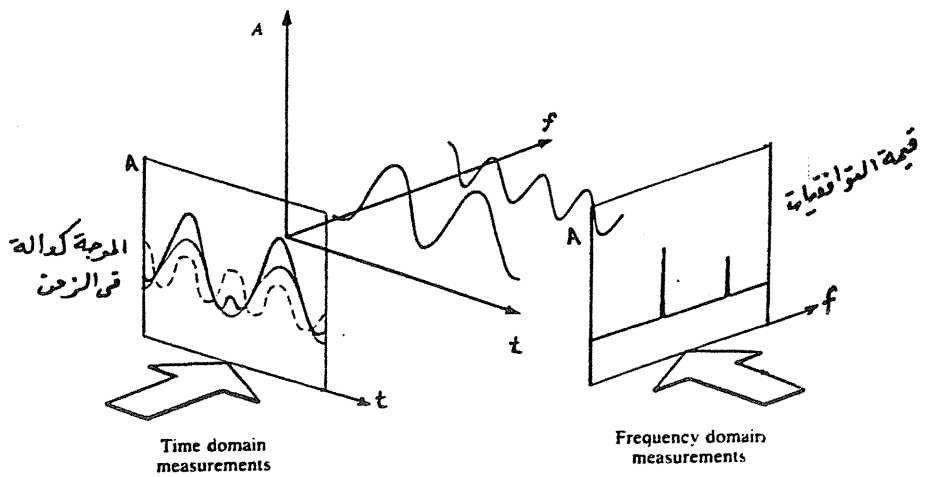
$$\text{مرشح ذى عرض نطاق مئوى ثابت} = 200 \text{ Hz}$$

وهكذا فان عرض النطاق للمرشح المئوى يشمل كل التوافقيات من الثامنة

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »



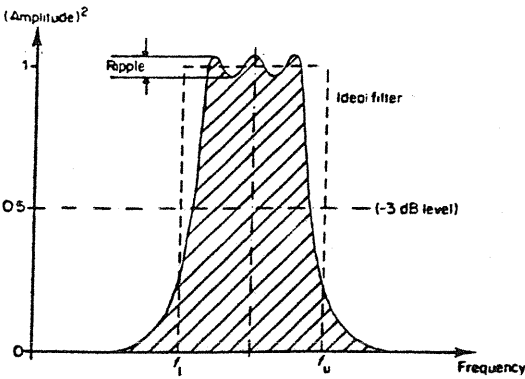
شكل (٦-٣)



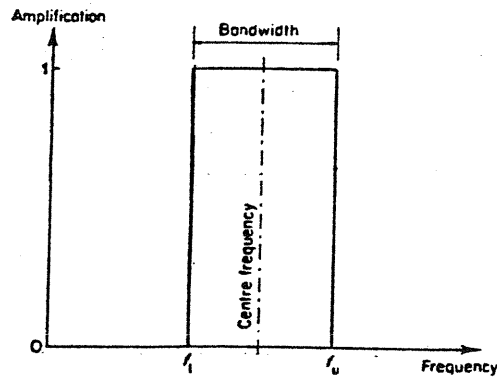
شكل (٦-٤)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٤١ -

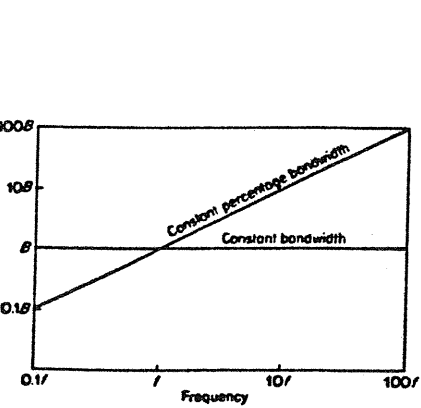


(أ)

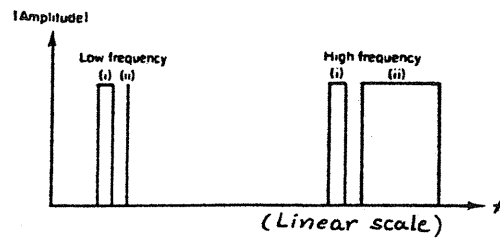


(ب)

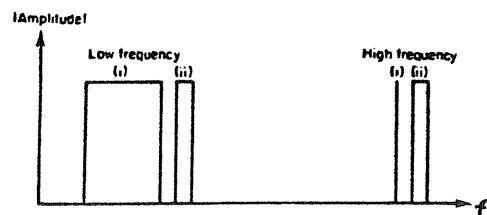
شكل (٦-٥)



شكل (٦-٧)



(أ)



(ب) (log scale)

(أ) مرشح نطاقى مقلد ثابت
(ب) مرشح نطاقى مقلد ثابت
شكل (٦-٦)

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٤٢ -

عشر (900 Hz) الى الثانية والعشرين (1100Hz) .

وبهذا يتميز نوع المرشح بعرض نطاقه ، وبالإضافة الى معرفة عرض النطاق للمرشح فيجب معرفة خاصيتين أخريتين هما : الانتقائية (*selectivity*) وزمن الاستجابة (*response time*) ، وتعرف الانتقائية بدرجة مقدرة المرشح على فصل المركبات للترددات المختلفة ويعبر عن الانتقائية بعامل الشكل (*shape factor*) . ويعرف هذا العامل ، للمرشحات ذات عرض النطاق الثابت ، من العلاقة :

$$shape\ factor = \frac{B_{60}}{B_3} = \text{عامل الشكل}$$

حيث :

 B_{60} = عرض نطاق المرشح عند توهين (*attenuation*) يساوى 60 dB .

 B_3 = عرض نطاق المرشح عند توهين يساوى 3dB

ونلاحظ في شكل (٨-٦) توضيح للعلاقة بين عرض النطاق والتوهين .

ويمكن استخدام B_{40} بدلاً من B_{60} اذا كان الشكل لا يحتوى على B_{60} .

والمرشحات ذات عرض نطاق مئوى ثابت يستخدم انتقائية الثماني (*Octave selectivity*) وهو عبارة عن التوهين عند الثمن (*octave*) على اى من جانبي مركز التردد .

ويحتاج المرشح لفترة زمنية لكي يستجيب حيث ان استجابته لا تكون لحظية وذلك للتغير الحادث فى مستوى موجة المدخل . كما ان الزمن الحقيقى المطلوب لوصول اشارة المخرج للمستوى النهائى لحالة الاستقرار يساوى $\left(\frac{1}{B}\right)$ حيث :

$$B = \text{عرض النطاق للمرشح}$$

بمعنى آخر فانه يعبر عن الاستجابة كالاتى

$$\text{عرض النطاق } (B) \propto \text{زمن استجابة المرشح } (T_f)$$

اى ان :

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٤٣ -

$$\therefore BT_f \simeq 1$$

ويعرف عرض النطاق النسبي b_r (Relative band width) كالآتي :

$$b_r = B / f_c \quad \text{حيث :}$$

$$f_c = \text{مركز التردد للمرشح}$$

وان عدد الدورات n_f (number of cycles) الموجودة في زمن الاستجابة هي

$$n_f = f_c T_f$$

وباستخدام المعادلات الثلاثة السابقة نحصل على العلاقة $b_r n_f \simeq 1$

الطيف النظيري وقياسات التوافقيات

تعتمد فكرة الطيف النظيري (Analogue spectrum) على استخدام المرشحات النظرية لعزل التوافقيات من موجة المدخل الرئيسية .

ونحتاج الى العلاقتين التاليتين :

أ - جذر متوسط المربعات (rms) لاشارة المدخل :

$$y_{rms} = \left\{ \frac{1}{T} \int_{t-\tau}^t [y(\tau)]^2 d\tau \right\}^{1/2}$$

ب - توحيد اشارة مخرج المرشح . وتكون القيمة المتوسطة (average) للاشارة

هي :

$$y_{av} = \frac{1}{T} \int_{t-\tau}^t y(\tau) d\tau$$

وتوجد انواع مختلفة من محلات التوافقيات والطيف النظيري نذكر منها :

١ - محلات المرشحات المنفصلة (Discrete Filter analysers)

او المحلات ذات مجموعة المرشحات (Bank of filter analysers)

ويتكون المحلل من :

- مجموعة من المرشحات $F_1, F_2, \dots, F_k, \dots, F_N$ ، ويواف (Tuned) كل مرشح عند مركز التردد (f_c) لمدى التردد المحدد .

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٤٤ -

- مكبر (amplifier) لإشارة مدخل المحلل .

- كاشف (Detector)

- مكبر (Amplifier) لإشارة مخرج الكاشف .

ويوضح شكل (٦-٩) أ المكونات الرئيسية للمحلل . ويوضح شكل (٦-٩) ب مخرج المحلل بدلالة مركز تردد التوافقية . وإذا كانت المرشحات مثالية فأننا نحصل على مخرج له عرض ثابت (عرض النطاق) كما موضح في شكل (٦-٩) أ وبالتالي فإن المخرج المثالي للمحلل عبارة عن خط افقى بطول التوافقية وعند مركز تردد التوافقية ويعتبر هذا النوع غير دقيق نظراً لأن الموجات تكون غير مستقرة .

٢ - محلات التوازي (Parallel Analysers)

فى هذا النوع يتكون كل مرشح توافقية من دائرة عبارة عن : مرشح - كاشف - مكبر مخرج ، وتكون عدد الدوائر بعدد التوافقيات المراد قياسها وهذه الدوائر متصلة على التوازي كما فى شكل (٦-١٠) وتغذى من مكبر مدخل . وتتصل مخرج هذه الدوائر بشاشة مخرج متعددة (Multiple output display) .

الطرق الرقمية للتحليل الطيفي

يستخدم تحويل "فورير" المنفصل (Discrete Fourier Transform) للحصول على التحليل الرقمية . وتكون العلاقة العامة لتحويل فورير المنفصل هي

$$X(f) = \sum_{n=0}^{N-1} w(n) x(n) e^{-j2\pi kn/N} \quad 0 < k < N-1$$

حيث

 $w(n) =$ المسافة المتماثلة لعينات نافذة الزمن (time window)

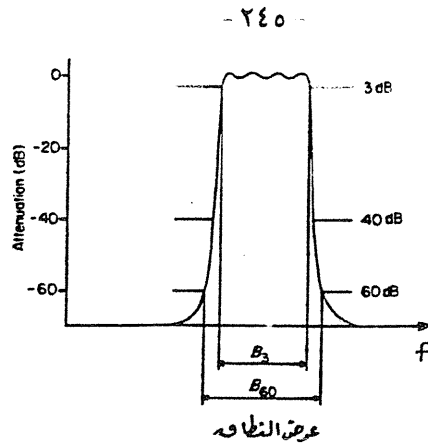
(لاحظ تعريف نافذة الزمن من شكل (٦-١١))

 $x(n) =$ المسافة المتماثلة لعينات الموجة

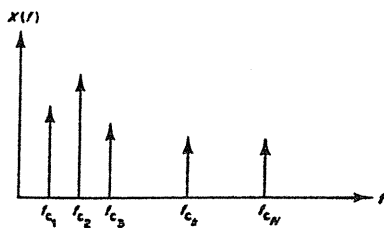
 $N =$ عدد العينات الموجودة فى النافذة والموجة خلال طول النافذة .

تحسب المعادلة السابقة باستخدام طريقة تحويل "فورير" السريع (Fast Fourier Transform)

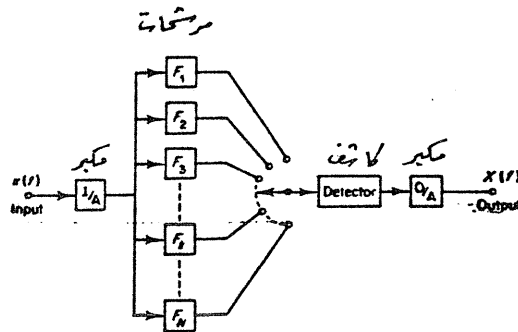
« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »



شكل (٨-٦)

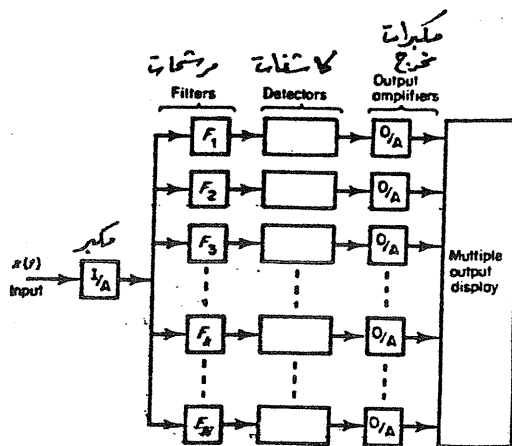


(٤)



شكل (٩-٦)

(٩)



شكل (١٠-٦)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٤٦ -

(Transform) وذلك بأفترض ان

$$N = 2^m$$

حيث m رقم موجب ، نموذجياً يستخدم $m = 10$ وبالتالي تكون

$$N = 1024$$

وبعمل تحويل عكسى للمعادلة السابقة نحصل على

$$w(n) x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi kn/N} \quad 0 \leq n \leq N-1$$

ولو افترضنا ان $w(n) = 1$ لجميع قيم n فانه يمكن الحصول على معاملات سلسلة فوريير (Fourier - series coefficient) لموجة المدخل ، اى نحصل على $x(n)$.

تعتمد المحلات الرقمية على تحويل الموجة النظرية (على محور الزمن) (Time domain analogue signal) الى سلسلة من البيانات الرقمية (على محور التردد) (Digital data on frequency domain) ، كما فى شكل (١٢-٦)

والحصول على ذلك يحتوى المحلل على مبدل نظيرى / رقمى (Analogue to digital converter) والذي يرمز له عادة بالرموز (A/D) ويتحكم فى عملية التحويل عدد خوينات (bits) المبدل . فمثلاً مبدل (10-Bit A/D) عشرة خوينات اى يستعمل 1024 مستوى لتمثيل اشارة تتغير من 0 إلى V .

علماً بأن أصغر تغيير فى قيمة الاشارة يساوى $\frac{V}{1024}$ (والذى يكون قادراً على التسجيل عند مخرج المبدل) وهذا يمثل الحد الديناميكي (Dynamic range) لحوالى 60 dB .

ومن الناحية العملية تستخدم بتوسع مبدلات ١٢ خوية (12-Bit A/D) وتعطى حد ديناميكي حوالى 72 dB ويوضح شكل (١٢-٦) تحويل اشارة نظيرية الى سلسلة رقمية على مستويات بينهما ΔV ، وينتج عن ذلك خطأ يعرف بخطأ الكمية (Quantizing error) والذي يتغير بين $\pm 1/2$ من اقل خوية (Least significant bit) . ويقل خطأ الكمية كلما زاد عدد خوينات المبدل .

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٤٧ -

تمثيل بيانات التوافقيات :

أ - فى حالة استخدام محلات التوافقيات النظرية فإنها تحتاج لعدة دقائق للحصول على بيانات التوافقيات والتي تتكرر على مسافات ثابتة .

ويمكن تمثيل التوافقيات (مخرج المحلل) على شكل جدول بيانات او تمثيل فى صورة شكل بياني (*chart*) . ويوضح جدول (٦-١) بيانات مخرج محلل نظيرى

جدول (٦-١)

التردد f (Hz)	القيمة (v)
50	240.0
100	0.1
150	12.0
200	0.1
250	2.7
300	0.0
350	2.1
400	0.0
450	0.3
500	0.0
550	0.6
600	0.0
650	0.4
700	0.0
750	0.3
800	0.0
850	0.2
900	0.0
950	0.1
1000	0.0

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٤٨ -

ونحصل على البيانات أيضاً على شكل بياني كما في شكل (٦-١٤) وله مركبة أساسية 240 v (وهي تقابل 0 dB) ومدى النطاق للمرشح 3 Hz ، ومعدل المنحنيات (Sweep rate) يساوي 5 Hz/s ومن الشكل البياني نستنتج ان جمع البيانات قد تم على فترات زمنية كبيرة ، والتي يمكن ان تؤدي الى مشاكل عند عمل التحليل .

فمثلاً في شكل (٦-١٥) سجل تيار التوافقية السابعة مع الزمن ، فاذا سجلت هذه التوافقية كل ١٢ دقيقة فمعنى ذلك ان النتيجة ستختلف اذا ما اختلفت فترة التسجيل وهذا يعطى دلالة لاختلاف النتائج تبعاً لفترة التسجيل .

ب - في حالة استخدام محلات التوافقيات الرقمية نحصل على مخرج عبارة عن قيم (أو نسب) التوافقيات عند درجات التوافقيات المختلفة ويوضح شكل (٦-١٦) الشكل البياني لمخرج هذه المحلات ، ففي شكل (٦-١٦) أ مثلت التوافقيات كنسبة مئوية للقيم الخطية ($\text{Linear amplitude \%}$) بينما مثلت قيم التوافقيات في شكل (٦-١٦) ب كقيم لوغاريتمية مئوية ($\text{Logarithmic amplitude \%}$) حيث التدرج الكلي يساوي 110 V . وعند التوافقية الخامسة ، أي التردد 250 Hz ، تكون القيمة 10.33 V . ويوضح شكل (٦-١٦) ج تمثيل لوغاريتمي للجهد والتيار وفيه يكون التدرج الكلي للجهد يساوي 110 V والتيار 2 A ويكون تيار التوافقية 0.33 بينما جهد التوافقية يساوي 10.33 V .

توجد محلات التوافقيات لقياس توافقيات التيار والجهد لوجه واحد أو للثلاثة أوجه ومسار التعادل .

ويوضح جدول (٦-٢) القياسات الناتجة باستخدام محلل توافقيات صناعة ايطالية للثلاثة اوجه R, S, T حيث يسجل الجهاز لكل وجه البيانات التالية :

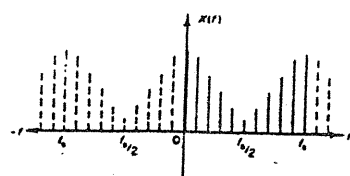
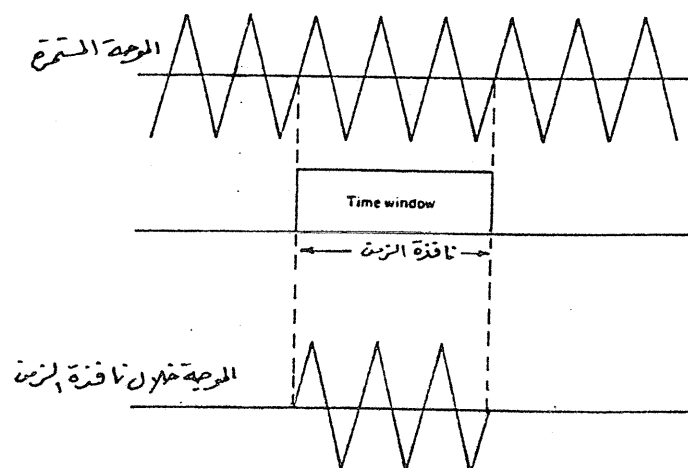
الجهد (V) ، التيار (A) ، تشوه الجهد ($DV\%$) ، تشوه التيار ($DI\%$) ، التردد (Hz) ، كذلك يسجل لكل توافقية (n) الآتي : قيمة الجهد - نسبة الجهد - قيمة التيار - نسبة التيار - جيب تمام الزاوية .

بينما يوضح الشكلان (٦-١٧) أ، ب مثالان آخران لقياس تيار التوافقيات لأحد الأوجه ومسار التعادل (الأرضي) بقيست بجهاز محلل التوافقيات الايطالي الصنع .

ومن أمثلة أجهزة محلات التوافقيات لقياس توافقيات وجه واحد . محلل توافقيات

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

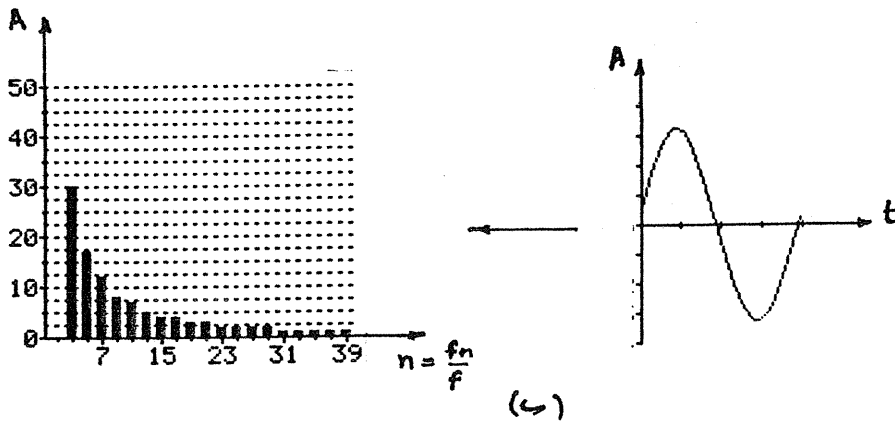
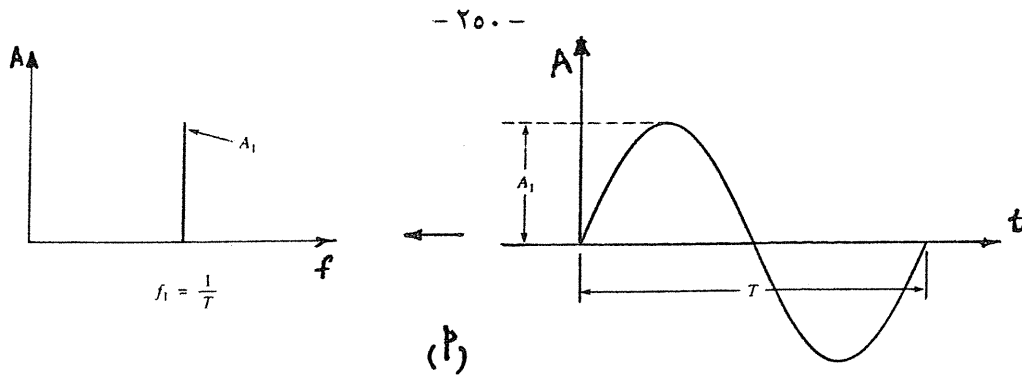
- ٢٤٩ -



مثال لعينة موجبة في نافذة الزمن

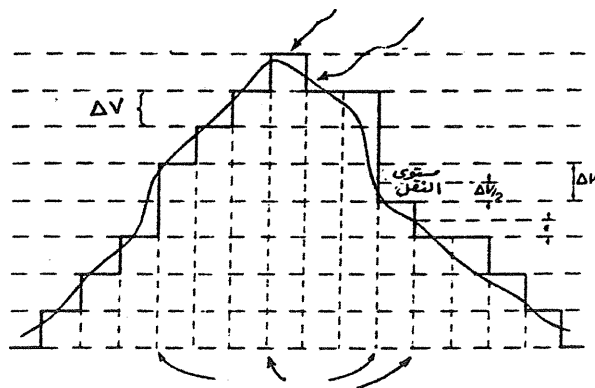
شكل (١١-٦)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »



شكل (٦-١٢)

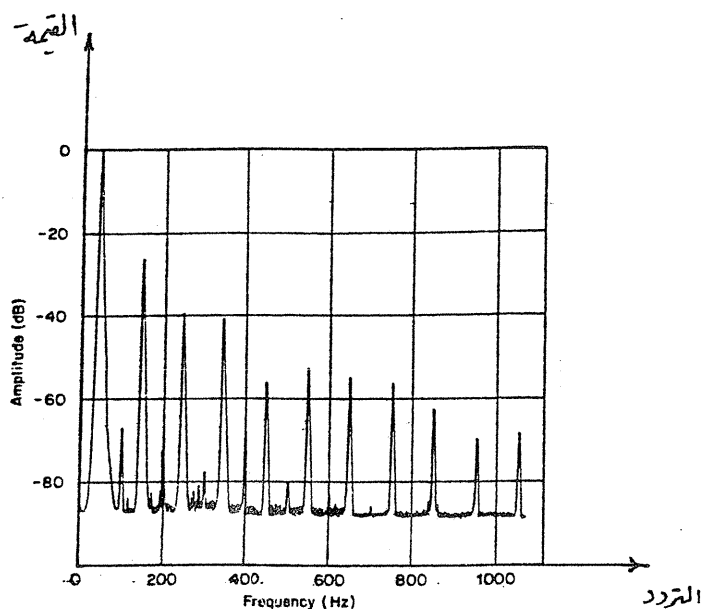
الموجة النظرية الموجة الرقمية



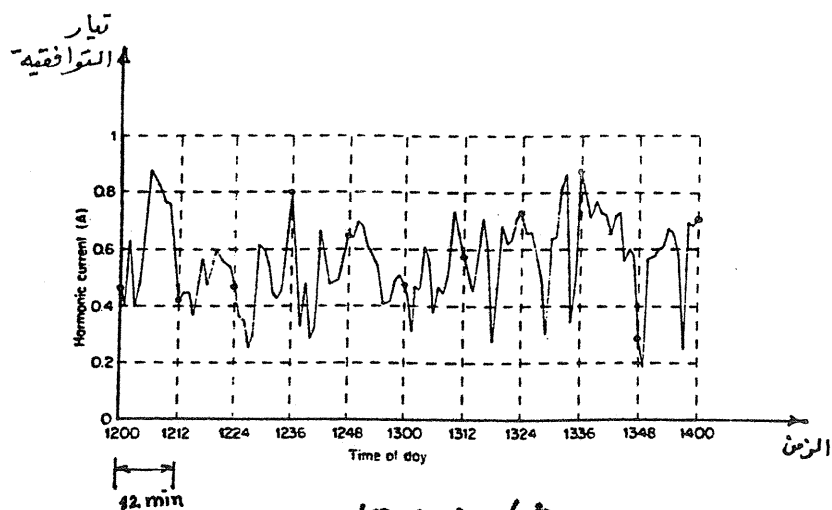
شكل (٦-١٣)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٥١ -



شكل (٦-١٤)



شكل (٦-١٥)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٥٢ -

اسبانى الصنع - نحصل منه على:

أ - رسم لقيم توافقيات التيار والجهد ممثلة بقضبان (*Bar graphs*) رأسية عند التوافقيات المختلفة ، كما فى شكل (١٨-٦) .

ب - شكل موجتى التيار والجهد (*oscilograph wave*) ، كما فى شكل (١٨-٦) ب .

ج - جدول رقمى ، كما فى الجدول (٢-٦) ، والذي يحتوى على البيانات الآتية لكل من التيار والجهد :

قيمة جذر متوسط المربعات (*rms*) ، المركبة الاساسية ، قيمة التشوه الكلى (*THD%*) بالاضافة الى معامل القدرة والقدرة غير الفعالة والتردد .

بينما تسجل عند كل توافقية البيانات الآتية :

- القيمة المتوسطة (*average value*) كنسبة مئوية للتيار والجهد .

- أقصى قيمة (*maximum value*) كنسبة مئوية للتيار والجهد .

ومن الاهمية التنوية على ان تحليل موجة التيار او الجهد يمكن ان تحتوى بالاضافة الى درجات التوافقيات الثانية - الثالثة - الرابعة - ... (اى الزوجية والفردية) ، على التوافقيات عند انصاف درجات التوافقيات مثل $1/2 f$ او $3/2 f$ وتعرف هذه التوافقية بالتوافقية الفرعية (*Subharmonic*) ، اما التموجات الحادثة عند اجزاء من درجات التوافقية (غير $1/2 f$, $3/2 f$,) . تعرف بالاستجابة الزائفة (*Spurious response*) وعادة تعرف التوافقيات الحادثة بين درجات التوافقيات سواء الزوجية او الفردية بالتوافقيات البينية (*interharmonics*) ويوضح شكل (١٩-٦) هذه التعريفات لمثاليين مختلفين .

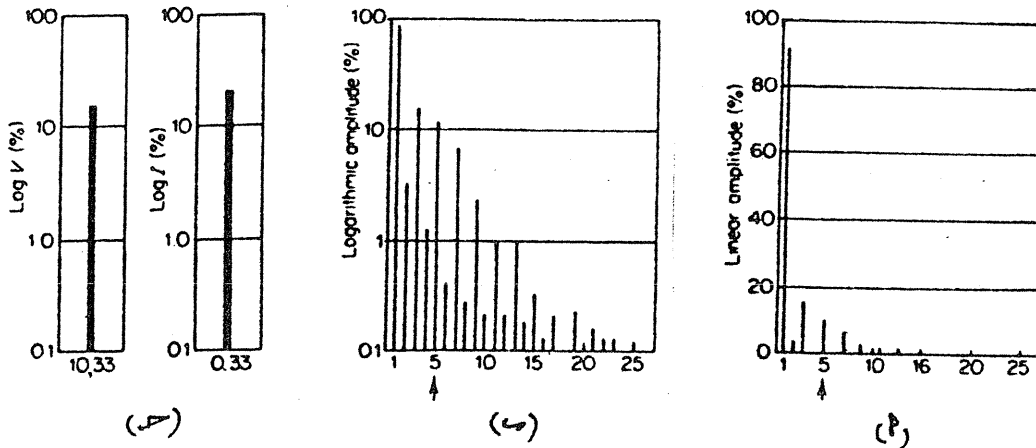
الاختبارات النوعية (*Type Tests*) طبقاً للمواصفات القياسية IEC 555-2

- قياس توافقيات تيار المدخل

يوضح شكل (٢٠-٦) طريقة توصيل المعدة المراد قياس مركبات توافقيات تيار المدخل ، حيث توصل المعدة على التوالى مع مقاومة R_M ، والتي تعرف بمقاومة توازى القياس (*Measuring shunt*) ، او مع محول تيار من خلال مصدر تغذية له نفس الجهد المقتن والتردد للمعدة تحت الاختبار ويوصل محلل الموجة (*wave analyzer*) على التوازى مع

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٥٢ -



شكل (٦-١٦)

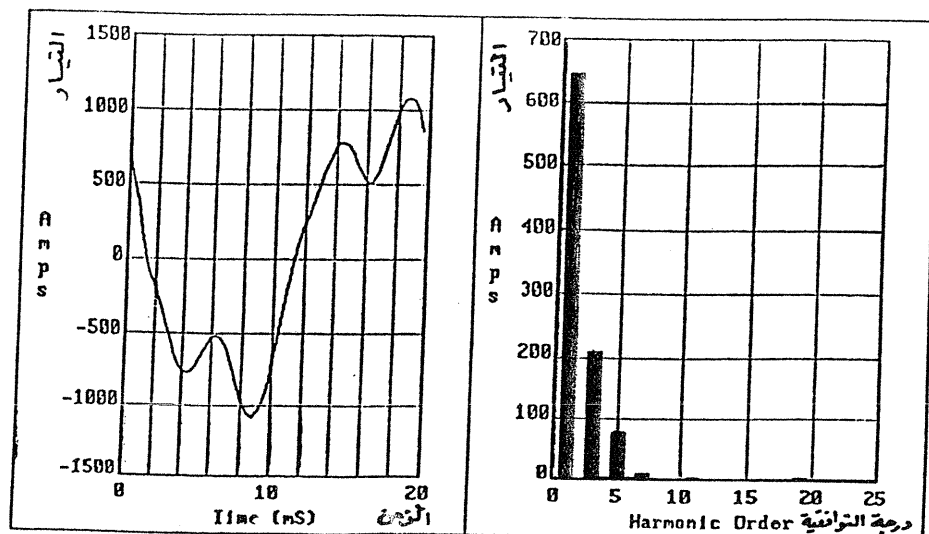
جدول (٦-٢)

ELCONTROL VIP SYS.3 13-07-90 17:18:55
HARMONIC ANALYZER SINGLE PHASE

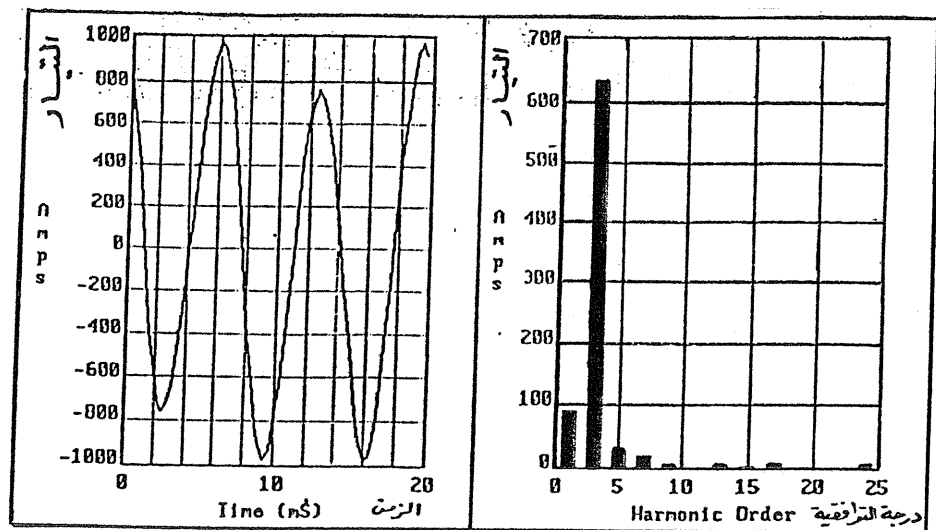
L1(R)						L2(S)						L3(T)					
V	219	A	-259			V	219	A	244.5			V	219	A	35.2		
DV %	0	DA %	53	Hz	50	DV %	0	DA %	59	Hz	50	DV %	0	DA %	15	Hz	50
n	Volt	%	Amp	%	cosφ	n	Volt	%	Amp	%	cosφ	n	Volt	%	Amp	%	cosφ
01	219	x	228.4	x	0.996	01	219	x	210.5	x	0.992	01	219	x	34.8	x	0.347
02	0	0	112.4	49	-0.163	02	0	0	113.8	54	-0.191	02	0	0	3.4	10	0.989
03	0	0	23.9	10	-0.965	03	0	0	26.3	13	-0.966	03	0	0	2.3	7	0.990
04	0	0	25.9	11	-0.852	04	0	0	27.6	13	-0.857	04	0	0	1.7	5	0.986
05	0	0	20.6	1	-0.758	05	0	0	21.5	10	-0.788	05	0	0	1.4	4	0.983
06	0	0	11.4	0	-0.588	06	0	0	11.9	6	-0.656	06	0	0	1.2	3	0.977
07	0	0	15.9	0	0.132	07	0	0	15.7	7	0.073	07	0	0	1.0	3	0.972
08	0	0	10.4	0	0.788	08	0	0	9.6	5	0.763	08	0	0	0.9	2	0.964
09	0	0	11.2	0	0.934	09	0	0	10.4	5	0.933	09	0	0	0.8	2	0.954
25	0	0	0	0		25	0	0	0	0		25	0	0	0	0	

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٥٤ -



(P)



(P)

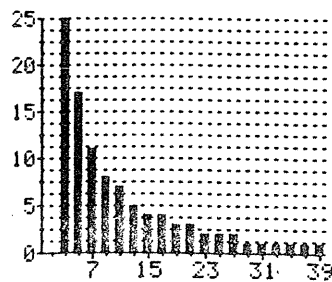
شكل (٦-١٧)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

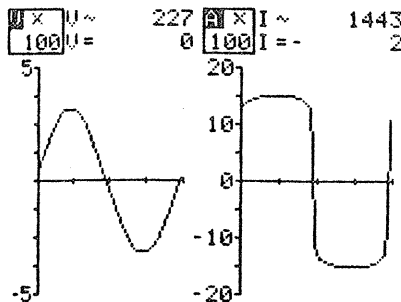
- ٢٥٥ -

جدول (٦-٣)

CIRCUTOR HARMONICS ANALYZER					
DATE: 19/11/90 . TIME: 10:09 REFER: AC					
FUNDAMENTAL PARAMETERS :					
SAMPL/CYCLE= 1 F = AUTO PER.= 00:01					
F(T) = 50.0 Hz F(M) = 50.0 Hz					
U(RMS)= 229 U I(RMS)= 712 A					
U1 = 229 U I1 = 665 A					
THD(U)= 1.1 % THD(I)= 36.4 %					
W= 152 k var= -57739					
PF= .935 PHASE= SINGLE					
HAR n	AUG. VALUES		MAX. VALUES		
	Un %	In %	Un %	In %	I1(A)
DC	0.24	0.63	---	---	---
2	0.27	0.35	0.28	0.36	665
3	0.55	29.85	0.54	29.86	665
4	0.16	0.27	0.15	0.27	665
5	0.56	16.90	0.61	16.91	665
6	0.03	0.20	0.01	0.20	665
7	0.40	11.49	0.38	11.49	665
8	0.07	0.18	0.07	0.19	665
9	0.10	8.49	0.11	8.50	665
10	0.02	0.16	0.02	0.16	665
11	0.22	6.62	0.20	6.63	665
12	0.04	0.14	0.05	0.15	665
13	0.08	5.34	0.07	5.36	665
14	0.02	0.12	0.01	0.12	665
15	0.09	4.40	0.09	4.43	665
16	0.02	0.12	0.03	0.12	665
17	0.04	3.70	0.02	3.70	665
18	0.02	0.10	0.02	0.11	665
19	0.01	3.12	0.01	3.13	665
20	0.01	0.13	0.01	0.17	665
21	0.02	2.71	0.02	2.73	665
22	0.02	0.08	0.00	0.09	665
23	0.07	2.33	0.07	2.35	665
24	0.03	0.07	0.03	0.07	665
25	0.04	2.01	0.04	2.02	665
26	0.01	0.07	0.02	0.08	665
27	0.02	1.75	0.02	1.77	665
28	0.01	0.05	0.01	0.05	665
29	0.00	1.52	0.00	1.53	665
30	0.01	0.05	0.01	0.06	665
31	0.04	1.34	0.03	1.34	665
32	0.01	0.04	0.01	0.04	665
33	0.03	1.17	0.03	1.18	665
34	0.01	0.03	0.01	0.03	665
35	0.01	1.03	0.01	1.03	665
36	0.00	0.03	0.00	0.03	665
37	0.03	0.90	0.03	0.91	665
38	0.00	0.03	0.00	0.03	665
39	0.02	0.79	0.02	0.80	665
40	0.00	0.03	0.00	0.04	665



(ب)

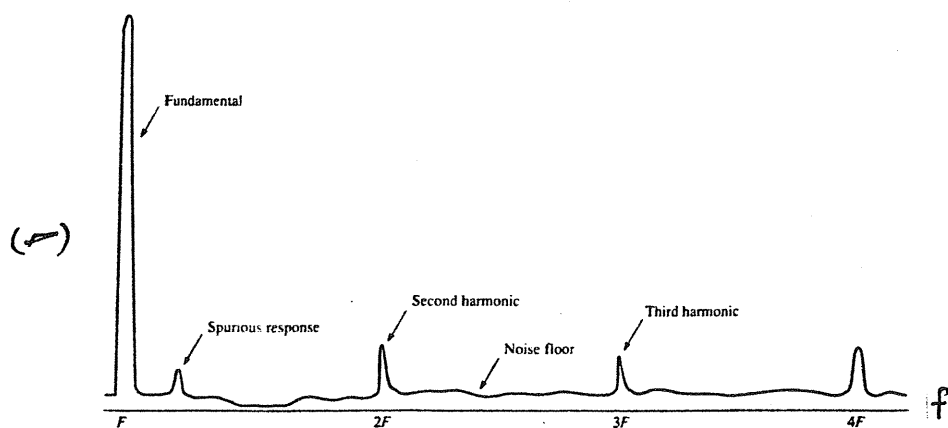
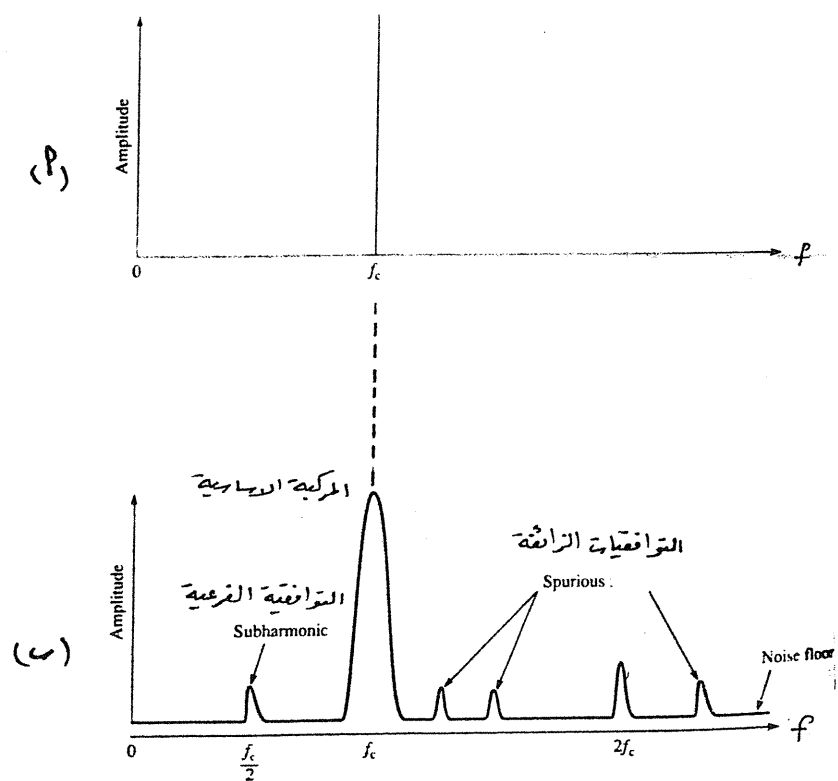


(ج)

شكل (٦-١٨)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٥٦ -



شكل (٩-٦)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

٢٥٧

المقاومة (R_M)

فاذا كان تغيير تيار التوافقيات أكثر تناسباً مع جهد المصدر ، فإن الاختبارات تتم عند جهود مصدر تساوي ٠,٩٤ & ١,٠٦ مرة من التيار المقنن للمعدات ذات جهد اكبر من الجهد المقنن ، واذا اختبرت عند الجهد المقنن فانها تنتج توافقيات بقيم اعلى من القيم المحددة .

اما المعدات ذات الجهد المقنن المحدد فان القياسات تتم عند أقصى حد للمصدر .

تستخدم التوصيلات فى شكل (٢٠-٥) أ لقياس معدة احادية الوجه .

وتستخدم التوصيلات بشكل (٢٠-٥) ب لقياس معدة ثلاثية الوجة .

- يجب مراعاة الآتى لمصدر التغذية :

أ - عند اخذ القياسات ، يجب حفظ الجهد فى حدود $\pm 2\%$ من القيمة المختارة والتردد فى حدود $\pm 0.5\%$ من القيمة الاسمية .

ب - تكون المعاوقة الداخلية لمصدر التغذية ، بالاضافة الى المعدات المقاسة ، عند كل تردد ، صغيرة بما يكفى حتى لايتأثر تيار التوافقيات المقاس وتختلف عن القيم المثالية (والتي تكون صفر) 5% من الحدود المسموحة .

ج - يجب ان تكون نسبة التوافقيات فى جهد المصدر ، عند حالة اللاحمل ، صغيرة جداً وذلك لتجنب التأثير على القياسات ، وفيما يلى نبين القيم الاسترشادية لهذه النسب :

0.9 % للتوافقية الثالثة .

0.4% للتوافقية الخامسة .

0.3% للتوافقية السابعة .

0.2% للتوافقية التاسعة .

0.2 % للتوافقيات الزوجية من الثانية وحتى العاشرة .

0.0% للتوافقيات الفردية من الحادية عشر الى الاربعين .

- لا تتعدى قيمة المقاومة R_M القيمة 0.1 ohm (ولا يتعدى ثابت الزمن 10^{-5} s) ، اى

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٥٨ -

لا توجد محاذة .

- عند استخدام محولات تيار يجب التأكد أن الخطأ الحادث من مركبة $d.c$ التيار المقاس لا يتعدى 5% من الحدود المسموحة .

- يجب مراعاة الآتى بجهاز محلل التوافقيات :

أ - ألا يتعدى خطأ القياس فى مركبات تيارات التوافقيات $(2 \leq n \leq 40)$ 5% من الحدود المسموحة .

ب - يكون الاختيار بين الاجهزة لكل قيمة لتردد التوافقية f_n تبعاً للآتى :

١ - اقل توهين ($attenuation$) لأية ترددات محقونة اقل من او يساوى $(f_n - f_1)$ أو أكبر من أو يساوى $(f_n + f_1)$ تبعاً للجدول الآتى :

اقل توهين	
30 dB	If $3 f_1 \leq f_n \leq 12 f_1$
20 dB	If $12 f_1 < f_n \leq 20 f_1$
15 dB	If $20 f_1 < f_n \leq 40 f_1$

حيث :

f_n تردد التوافقية n (علماً بأن العلاقة بين f_1 ، f_n هى $f_n = n f_1$)
 f_1 تردد المصدر

٢ - يجب ان يكون التوهين اكبر من او يساوى 34dB لاي تردد محقون اقل من $0.25 f_n$ عندما تكون f_n اكبر من $12 f_1$

٣ - يكون التوهين للتردد $2 f_1$ على الاقل 40dB بينما للتردد $3 f_1$ لا يقل عن 30dB

ج - اذا كانت مركبات توافقيات تيار المدخل تتغير خلال الاختبار ، فيجب مراعاة الاتي :

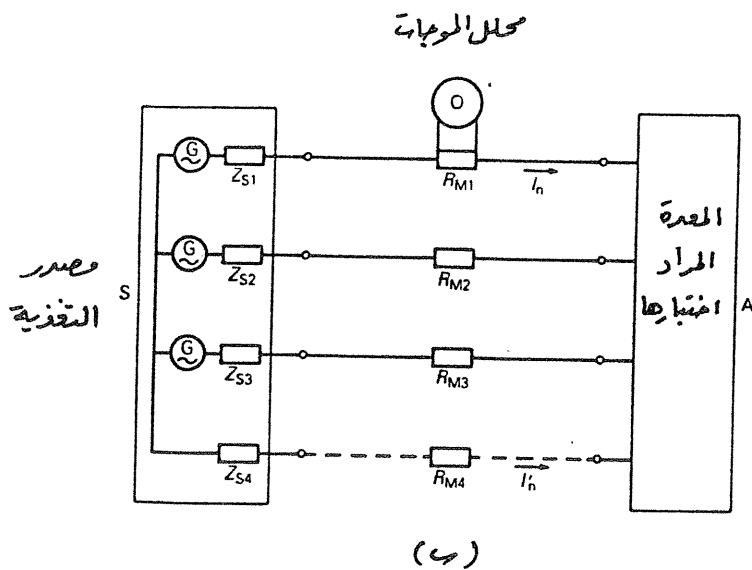
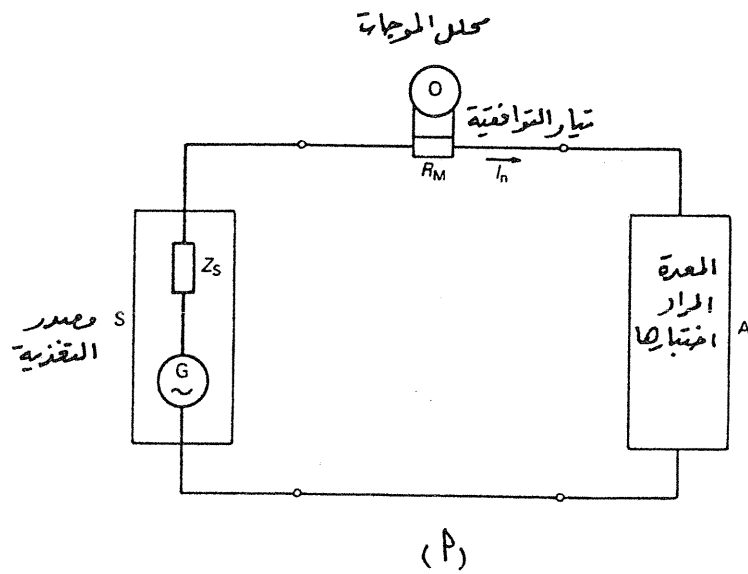
« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٥٩ -

١ - عند تسليط جهد جيبي له تردد f_n على الجهاز لمدة ثانية واحدة فان اقصى دلالة له يجب ان تقع بين % 50 & 40 من النتيجة التي نحصل عليها في حالة تسليط نفس الجهد بصفة مستمرة .

٢ - عند التسليط الفجائي لجهد جيبي له تردد f_n على الجهاز ، فان اقصى دلالة له يجب الا تتعدى الدلالة الحادثة من حالة الاستقرار بزيادة % 5 .

- ٢٦٠ -



شكل (٦-٢٠)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٦١ -

الباب السابع

المرشحات

Filters

ان طبيعة تكوين الشبكات الكهربائية احتوائها على معدات مختلفة ومتعددة ومتصلة معاً مثل المولدات والمحولات وخطوط وكابلات نقل القدرة بالإضافة الى المكثفات والمحركات والمفاعلات ... وعند عمل دراسة او تحليل لجزء من الشبكة فان معاوقة هذا الجزء تعتمد على : التردد وطبيعة المعدات وكذلك طريقة اتصال معدات هذا الجزء معاً فمثلاً اذا وصلنا مكثف على التوالي مع معاوقة حاثية (كتمثيل لشبكة كهربائية) ، فانه عند حدود تردد معين تصبح محصلة معاوقتهما صغيرة جداً وتحدث بالقرب من تردد الرنين وتعرف هذه الظاهرة برنين التوالي (*Series resonance*) بينما اذا وصلت محاثة وسعوية على التوازي فنجد انه عند حدود تردد معين تصبح محصلة معاوقتهما كبيرة جداً ، ويحدث هذا بالقرب من تردد الرنين وتعرف هذه الظاهرة برنين التوازي (*Parallel resonance*) .

ويمكن حدوث رنين التوالي ورنين التوازي لنفس الشبكة ولكن عند ترددات مختلفة .
حينما تحتوى شبكة كهربائية معينة على تردد رنين وكان من مكوناتها احمال تصدر توافقيات التيار او الجهد عندئذ يحدث تكبير للتيارات او الجهود والتي تتسبب فى تشوه الموجات وحدوث زيادة احمال وانهايار بعض مكونات الشبكة . وللتغلب على مشاكل الرنين نحاول أبعاد تردد الرنين عن ترددات التوافقيات الموجودة بالشبكة .

ويوضح شكل (٧-١) أ تمثيل لهذه الحالة وهى عبارة عن شبكة كهربائية ممانعتها الحاثية (X_s) متصل معها مكثف ممانعة السعوية ($-X_c$) واحمال تصدر التوافقيات (i_n) نقوم بتوزيع التيار i_n فى الشبكة والمكثف تبعاً للمعادلة :

$$i_{ns} = i_n \frac{(-X_{cn})}{X_{sn} - X_{cn}}$$

$$i_{nc} = i_n \frac{X_{sn}}{X_{sn} - X_{cn}}$$

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٦٢ -

حيث تتناسب X_{sn} طردياً مع التردد بينما X_{cn} تتناسب عكسياً مع التردد .
وتعرف النسبة $\frac{i_{ns}}{i_n}$ بتكبير التيار (Current amplification) .
وعندما تتساوى الممانعتين X_{cn} ، X_{sn} ، وعند تردد معين ، فإن قيمة تكبير التيار تساوى ما لانهاية .

ويفضل اضافة مقاومة كبح (resistive damping) للحد من تكبير التيار عند الرنين، وتكون القيم النموذجية لاقصى قيمة للنسبة $\frac{i_{ns}}{i_n}$ ، عند رنين توافقيات الدرجات المنخفضة، هي من ٢ الى ١٠ اعتماداً على الشبكة والحمل . ويوضح شكل (٧-١) ب العلاقة بين تكبير التيار $\frac{i_{ns}}{i_n}$ والتردد f للشبكة الموضحة في شكل (٧-١) أ .

وفى حالة استخدام المكثفات ذات القدرات الكبيرة فإن الرنين يحدث عند الترددات المنخفضة ، وكمثال ، عند تردد التوافقية الخامسة او السابعة ، واذا لم نتخلص من حالات الرنين تحدث مشاكل بالشبكة الكهربائية .

وعند تركيب مكثفات على شبكة كهربائية لتحسين معامل القدرة فانه يلزم أولاً التأكد من عدم وجود مصادر توافقيات تيار او جهد فى هذه الشبكة ، ثم بعد ذلك يتم حساب تردد الرنين فى وجود المكثفات فاذا كان اكبر من الدرجة ٢٥ فلا توجد اية مشاكل من تركيب المكثفات وتعتبر موجة هذا المصدر نقية .

اذا ادى تركيب المكثف الى حالة رنين فيمكن علاج ذلك بتركيب مفاعل (reactor) على التوالى مع المكثف وتعرف هذه التوصيلة بمرشح فض التوليف (Detuned Filter) أو مرشح مضاد التوافقية (Anti - harmonic Filter).

مرشح فض التوليف (Detuned Filter)

يتم اضافة مفاعل على التوالى مع مكثف كل مرحلة لمصفوفة مكثفات تحسين معامل القدرة ويكون هذا المفاعل صغيراً وتأثيره هامشى على القدرة غير الفعالة الكلية عند التردد الاساسى . وعند تردد معين تتساوى ممانعة المفاعل مع ممانعة المكثف ، ويعرف هذا التردد بتردد التوليف (Tuning Frequency) ويرمز له f_t وتكون القيمة الكلية للمعاوقة حاثية موجبة للترددات الاعلى من f_t . وبأختيار قيمة f_t للمرشح اقل قليلاً من اقل تردد توافقية متولدة فى هذه الشبكة فان معاوقة التعويض ومعاوقة الشبكة تكون

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٦٢ -

حاثية (inductive) وبالتالي استحالة الوصول لحالة لرنين ، وعند الترددات الاقل من f_l تكون معاوقة التعويض سالبة وهنا تنشأ نقطة الرنين ولكنها لن تكون فعالة لعدم وجود توافقيات مولدة عند هذه الترددات .

ويوضح شكل (٧-٢) العلاقة بين نسبة تكبير التيار والتردد (f) .

فاذا كانت الشبكة الكهربائية تحتوى على تيار التوافقية الخامسة مثلاً ، فانه يتم اختيار f_l مساوية تقريباً لتردد التوافقية الخامسة ($5f_l$) ويعرف المرشح فى هذه الحالة مرشح التوافقية الخامسة (5th harmonic filter) ، كما فى شكل (٧-٢) وعند الاحتياج لأكثر من مرشح ، فيتم تركيب مفاعل على التوالى مع مكثف كل مرحلة بحيث تولف كل مرحلة (مكثف ومفاعل) عند توافقية مختلفة ، فمثلاً يوضح شكل (٧-٣) أ مرشحات للتوافقيات الخامسة والسابعة والحادية عشر بينما يوضح شكل (٧-٣) ب العلاقة بين $\frac{i_{ns}}{i_n}$ مع التردد f لهذه الدائرة

عموماً تعتمد كفاءة المرشح على :

- الحجم (Size) .

- دقة التوليف (Tuning accuracy) .

- دقة تردد الشبكة (Frequency accuracy) .

ويكون الاختلاف بين تردد التوليف وتردد التوافقية حوالى من ٥ - ٦ ٪ من قيمة التوليف المقنن ، بينما يكون من ٢ - ٣ ٪ فى حالة وجود نقط تقسيم على المفاعلات .

عموماً عند وجود التوافقيات فانه يمر بالمرشح مجموع التيارين i_{nc} ، i_f أى ان

$$i_c = i_{nc} + i_f$$

حيث :

i_{nc} = الجزء من تيار التوافقية n المار بالمرشح .

i_f = تيار المركبة الاساسية للنظام المار بالمرشح .

بينما يكون الجهد بين طرفى المكثف عند التردد الاساسى

$$V_c = V_f \frac{n^2}{n^2 - 1}$$

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٦٤ -

والجهد بين طرفى المفاعل عند التردد الاساسى

$$V_L = V_f \frac{1}{n^2 - 1}$$

$$V_c = V_f + V_L$$

حيث V_f جهد النظام عند التردد الاساسى

ويبين شكل (٧-٤) قيم الجهد V_L , V_c عند التردد الاساسى وعند تردد الرنين .

مرشحات التوافقيات Harmonic Filters

أن الغرض الرئيسى من تركيب مرشحات التوافقيات هو تقليل تيار او جهد تردد ثابت معين (او تقليل تيار او جهد توافقية ثابتة معينة) او تيارات وجهود ترددات معينة .

وعند التفكير فى تركيب مرشحات يجب أولاً قياس تيارات وجهود التوافقيات فى الجزء من الشبكة المراد تركيب المرشحات بها . ثم تسجيل مواضع المكثفات المركبة لتحسين معامل القدرة او تعويض القدرة غير الفعالة على هذه الشبكة (ان وجدت مكثفات) ، فاذا كانت تيارات التوافقيات اكبر من الحدود المسموحة بالمواصفات القياسية العالمية فنبدأ فى تغيير مواضع تركيب المكثفات على الشبكة وأخذ قياسات مرة أخرى كما يمكن التوصية بفصل المكثفات فى الفترات التى يحدث بها زيادة فى تيارات التوافقيات . وفى بعض الشبكات الكبيرة يمكن تغيير موضع تأريض نقطة التعادل بالشبكة بعيداً عن الاماكن القريبة من تركيب المكثفات حتى يمنع مرور التوافقيات الثلاثية الفردية (الثالثة - التاسعة - الخامسة عشر ...) فى مسار التعادل .. واذا لم تنجح اى من هذه الاقتراحات فنبدأ فى التفكير فى تركيب مرشحات لتقليل تيار او جهود التوافقيات عند درجات التوافقيات الموجودة فى الشبكة .

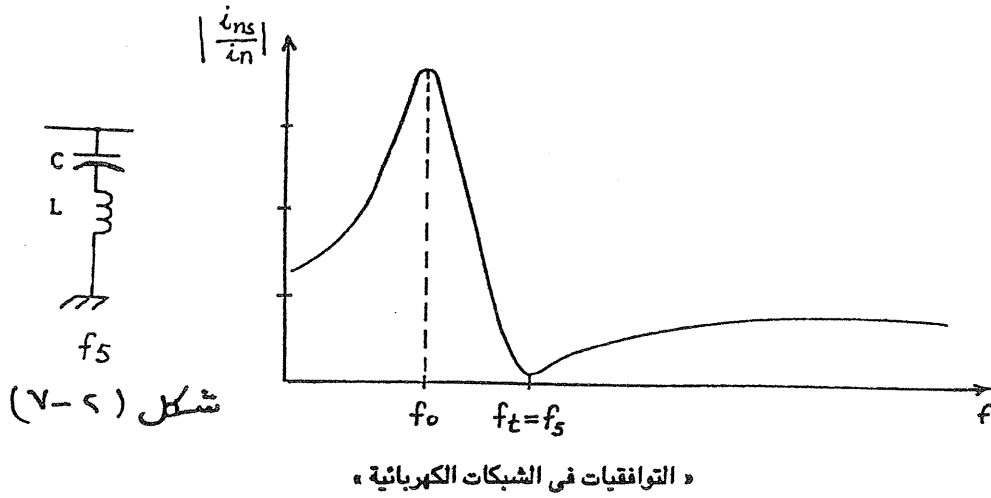
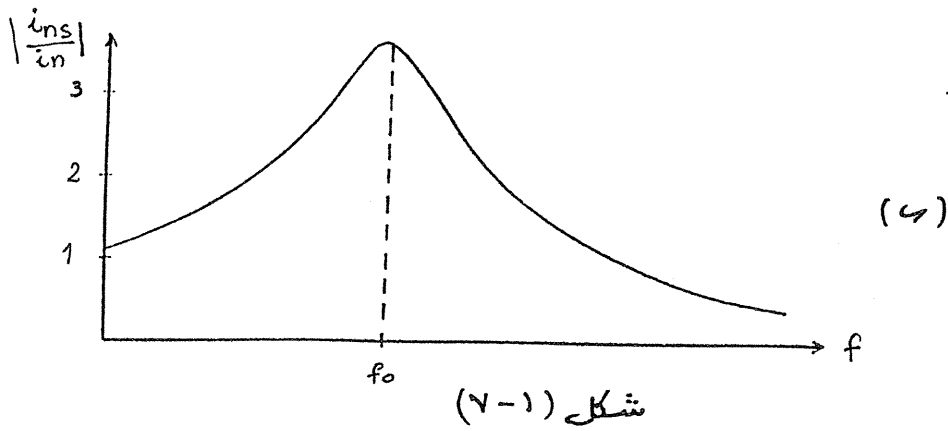
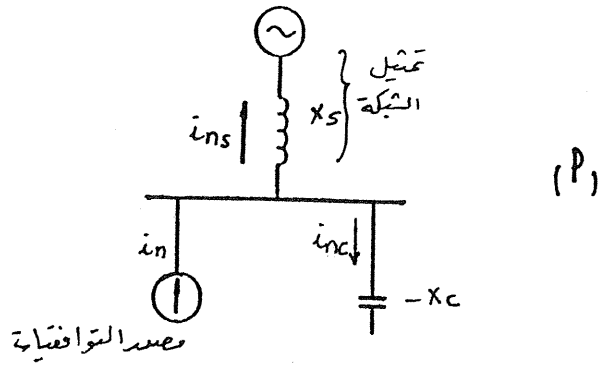
ويتكون المرشح من مفاعلات (reactors) ، ومكثفات (Capacitors) متصلة على التوالى او التوازى او على التوالى والتوازى معاً .

ويسمى مرشح التوازى (Shunt filter) بانه مرشح توازى التوليف (Tuned shunt filter) حيث تتساوى فيه قيمتى ممانعتى المفاعل والمكثف ($X_c = X_L$)

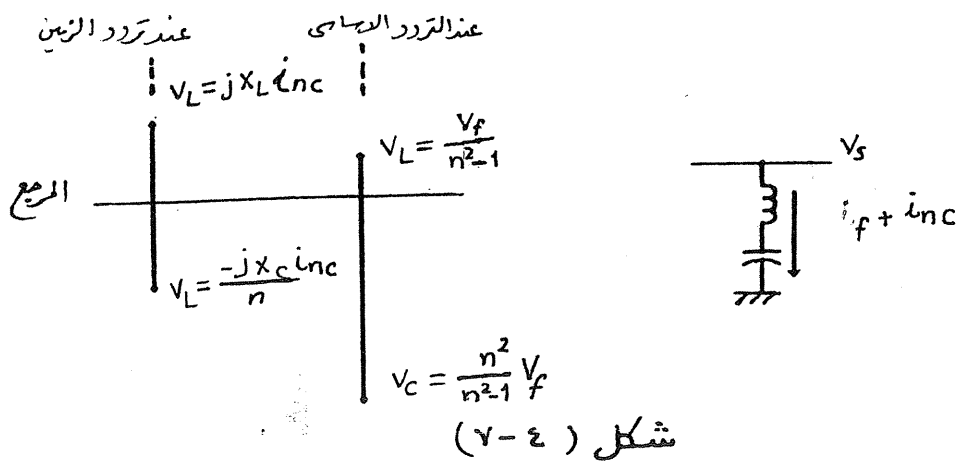
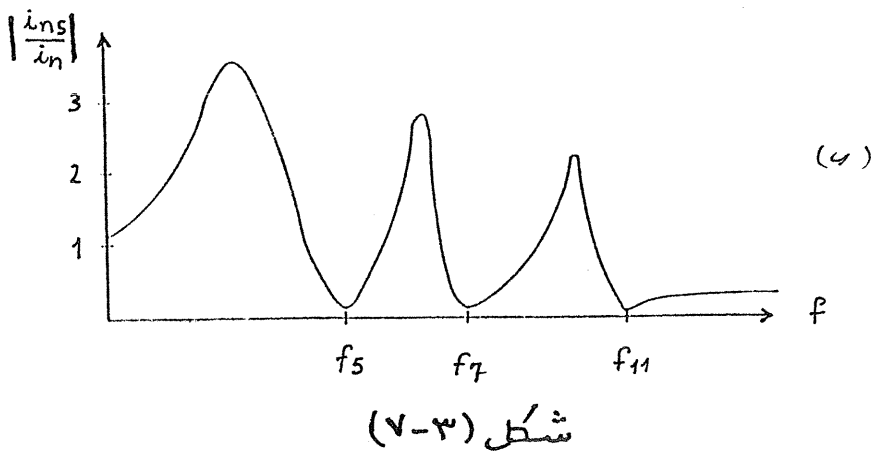
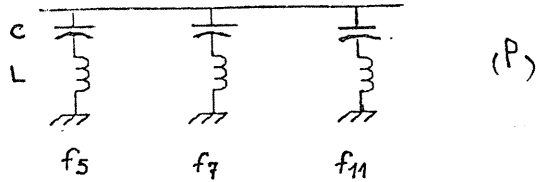
ان الخصائص الاساسية لمرشح توازى التوليف عبارة عن تردد التوليف (Tuned frequency) ومعاققة التوليف (Tuned impedance) وثابت المرشح (Filter constant) او عامل الجودة (quality factor) والتى يرمز لها بالرمز Q . ويعرف ثابت المرشح بانه

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٦٥ -



- ٢٦٦ -



« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٦٧ -

النسبة بين ممانعة المفاعل (أو المكثف) عند تردد التوافقية والمقاومة عند تردد التوافقية (أي عند تردد الرنين) أي أن :

$$Q = X_0 / R$$

حيث :

$$X_0 = \text{ممانعة المفاعل (أو المكثف) عند الرنين .}$$

$$R = \text{المقاومة عند تردد الرنين}$$

وتعطى الكمية Q دلالة لحدة التوليف (*Sharpness of tuning*) ويوجد نوعين من المرشحات هما :

أ - المرشح ذو الكمية Q العالية *high Q - Filter*

وتتراوح Q بين ٣٠ - ٦٠ ويوضح شكل (٧-٥) دائرة مرشح توازي التوليف وخاصية العلاقة بين التردد والمعاوقة Z ، بينما يوضح شكل (٧-٦) دائرة مرشح مصيدة الموجه (*wave trap filter*) ومنحنى العلاقة بين f, Z .

ب - مرشح ذو الكمية Q المنخفضة *Low Q - filter*

وتتراوح Q بين ٠,٥ - ٥ حيث يكون للدائرة معاوقة منخفضة القيمة لحدود تردد معين، كما هو موضح في شكل (٧-٧) حيث يوضح دائرة مرشح توازي اخماد من الدرجة الثانية (*Second order damped shunt filter*) . وفي شكل (٧-٥) أ يعرف نطاق مرور الترددات (*pass band*) [والذي يرمز له بالرموز PB] للمرشح بأنه حدود التردد التي عندها تتساوى ممانعة المرشح بمقاومته ، بمعنى آخر أن زاوية المعاوقة (*impedance angle*) تساوى ٤٥° ويكون مقياس المعاوقة (*impedance module*) يساوى $\sqrt{2}R$.

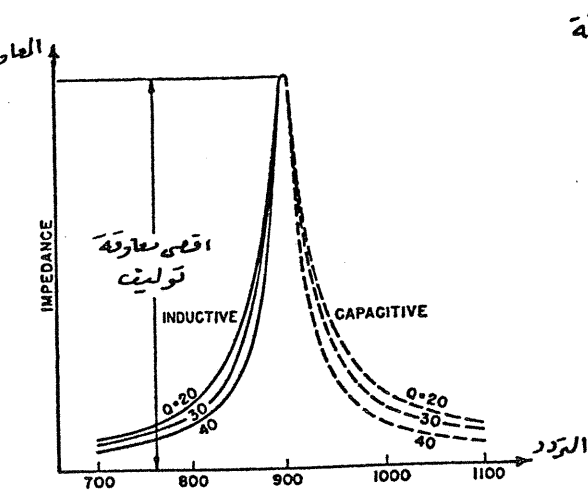
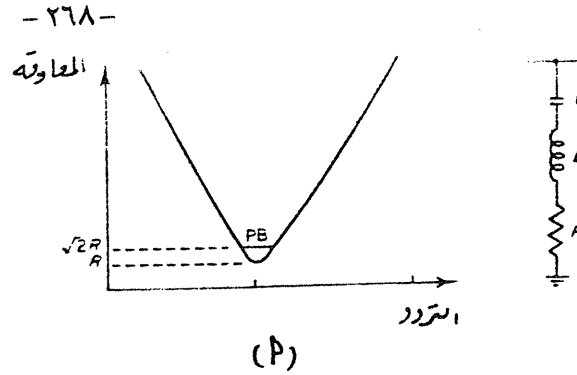
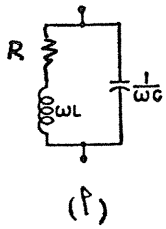
ويمكن كتابة العلاقة بين عامل الجودة Q وبين نطاق المرور PB كالآتي :

$$Q = \frac{\omega_n}{PB}$$

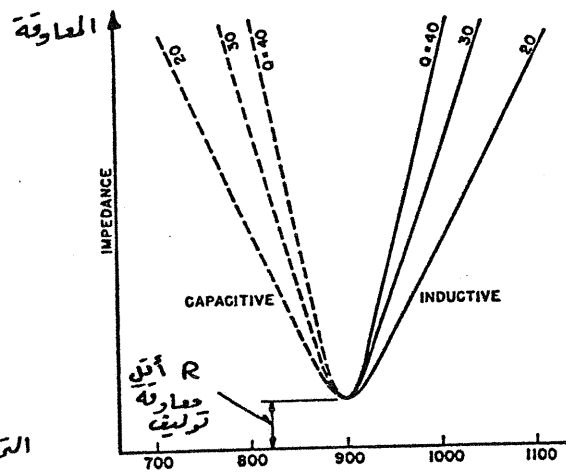
حيث ω_n هو التردد الزاوي لمرشح التوليف (*Tuned angular frequency*) بوحدات زاوية نصف قطرية / ثانية (*radians / second*) .

وتكون حدة الرنين Q لمرشحات الاخماد ذات الامرار العالي عكس حدة الرنين

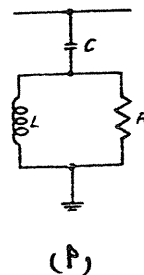
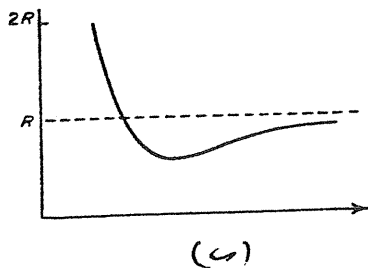
« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »



شكل (٧-٦)



شكل (٧-٥)



شكل (٧-٧)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٦٩ -

لمرشحات الرنين اى ان :

$$Q = \frac{R}{X}$$

ويمثل عامل فض توليف المرشح (*filter detuning*) بالرمز δ ويطلق عليه ايضاً عامل انحراف التردد (*Frequency deviation factor*) والذي نحصل عليه من العلاقة

$$\delta = \frac{\omega - \omega_n}{\omega_n}$$

ويكون منسوباً لتردد التوليف الاسمى (*nominal tuned frequency*) كما يشير هذا العامل الى تأثيرات مختلفة هي :

- التغيير فى التردد الاساسى (تردد المصدر)

- التغيير فى سعوية ومحاثة المرشح نتيجة التقادم واختلاف درجات الحرارة .

- فصل التوليف الاولى (*initial off tuning*) نتيجة سماحية الصناعة والحجم المحدد لمراحل التوليف .

هذا ويسبب التغيير الحادث فى C, L بنسبة ٢٪ مثلاً نفس فض التوليف الناتج من تغيير تردد المصدر بقيمة ١٪ ، ولذلك يعبر عن δ من العلاقة :

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_n} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta L}{L_n} + \frac{\Delta C}{C_n} \right) \right\}$$

نلاحظ فى الشكل (٧-٨) بعض انواع المرشحات

فمثلاً يوضح شكل (٧-٨) ا مصفوفة من مرشحات الرنين للتخلص من التوافقيات الخامسة ، والسابعة ، والحادية عشر ، والثالثة عشر ، وتعرف هذه الدائرة بالمرشح المؤلف (*Composite filter*) .

ويوضح شكل (٧-٨) ب مرشح امرار الترددات العالية *High pass filter*

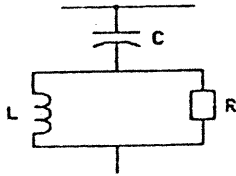
بينما يوضح شكل (٧-٨) ج المرشح المعدل لاررار الترددات العالية *Modified high pass filter*

وفى شكل (٧-٨) د مثالين لمرشح امرار نطاقى مزدوج *Double band pass filter*

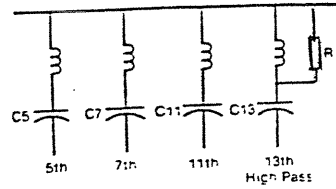
وفى شكل (٧-٨) هـ مثال لمرشح امرار الترددات المنخفضة *Low - pass filter*

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

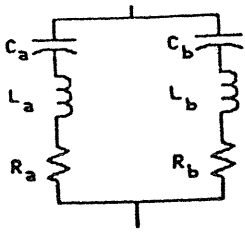
- ٢٧٠ -



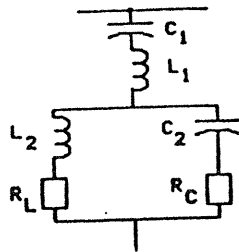
(٤)



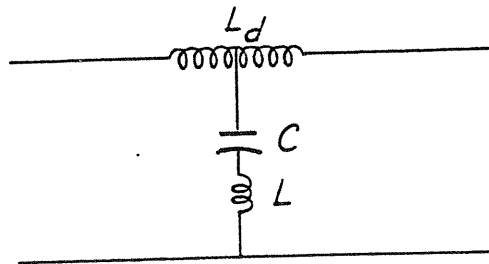
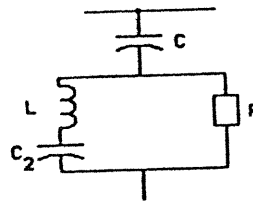
(٦)



(٥)



(٣)



(٨)

شكل (٨-٧)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٧١ -

ويكون المكثف C كبير بقدر يكفى لامتناس التوافقيات ويكون الممانع L ذى ثمن معقول ويستخدم هذا المرشح لاختفاء جميع الترددات السمعية ، ومركب هذا النوع فى روسيا بالقيم التالية (للجهد ٨٠٠ ك.ف) :

$$L=1 \text{ to } 1.5 H$$

$$C = 0.5 \mu F$$

كذلك يوضح شكل (٧-٩) أمثلة لمرشحات مركبة على الثلاثة أوجه

فى شكل (٧-٩) أ استخدم مرشح مصيدة (*wave trap filter*) موصلة بنقطة تعادل آلة متزامنة (*Synchronous machine*) للتخلص من تيار التوافقيات الثلاثية الفردية (*triple*) المارة بمسار التعادل لتوصيلة نجمة (*Star*)

بينما يوضح شكل (٧-٩) ب مرشح امرار ترددات منخفضة (*Low pass filter*) يستخدم للتخلص من جميع التوافقيات اعلى من التوافقية الرابعة .

وفى شكل (٧-٩) جـ مرشح تيار متردد غير مولف (*Non - tuned a.c filter*) يستخدم مع موحداث القدرة الصغيرة حيث يتم توصيل الممانعة L_s على التوالى مع المصدر بينما توصل المكثفات على التوازي

ويوضح شكل (٧-٩) د مرشح توليف التوازي للتخلص من التوافقيات الخامسة والسابعة والحادية عشر الناتجة من مبدل ٦ نبضات .

معييار تصميم المرشح

يعرف حجم المرشح (*Size of filter*) بالقدرة غير الفعالة التى يعطيها المرشح عند التردد الاساسى ، والتى هى فى الحقيقة قيمة القدرة غير الفعالة الاساسية للمكثف. ويحدد الحجم الكلى لكل افرع المرشح عن طريق القدرة غير الفعالة المطلوبة لمصدر التوافقيات ، على الشبكة الكهربائية .

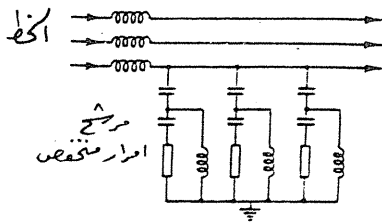
ويصمم المرشح ، من الناحية النظرية لحذف جميع التأثيرات الحادثة من تشوه الموجات ، بما فيها التداخل مع خطوط الاتصالات ، والتى يصعب تحقيقها .

تتبع الخطوات التالية لتصميم المرشح :

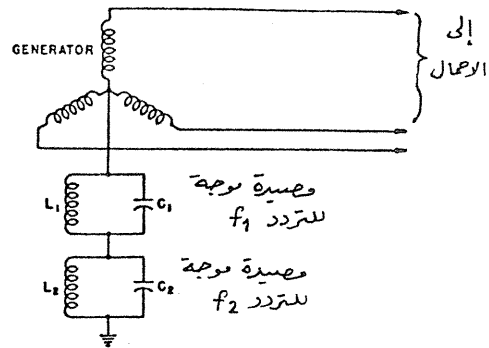
١ - يسلط تيار التوافقية الناتج من الاحمال غير الخطية على دائرة تتكون من مرشح

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

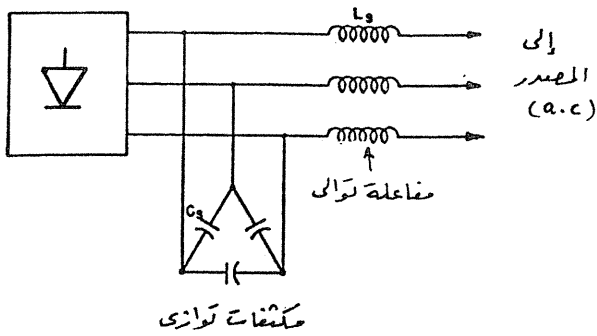
- ٢٧٢ -



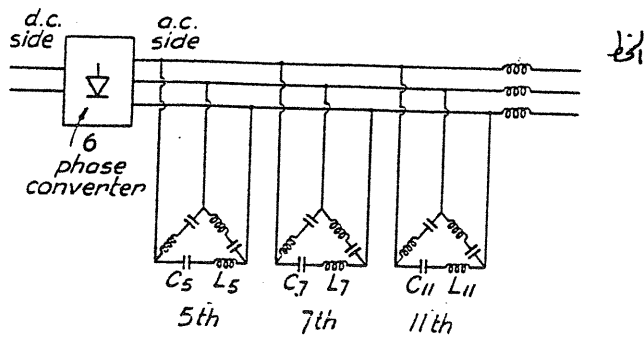
(أ)



(ب)



(ج)



(د)

شكل (٧-٩)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٧٣ -

على التوازي مع شبكة التغذية ، كما فى شكل (١٠-٧) عند ترددات مناسبة وتحسب جهود التوافقيات .

٢ - من نتائج البند رقم (١) نحسب الثوابت الآتية :

أ - تشوه الجهد (Voltage Distortion) ويرمز له VD .

$$VD = \sqrt{\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 + \left(\frac{V_3}{V_1}\right)^2 + \left(\frac{V_4}{V_1}\right)^2 + \dots} = \left(\sum_{n=2}^n V_n^2\right)^{1/2} / V_1$$

ب - عامل تأثير التليفون (Telephone influence factor) ويرمز له بالرموز TIF

$$TIF = \frac{1}{V} \left[\sum_{n=1}^n (K_f P_p V_f)^2 \right]^{1/2}$$

حيث :

V = جذر متوسط مربعات الجهد للخط .

V_f = جهد التوافقية عند التردد f

K_f = معامل الربط (Coupling coefficient) ($K_f = 5f$)

p_f = وزن تردد التوافقية (weight of the harmonic of frequency) وأقصى قيمة لها تساوى واحد عند تردد f يساوى 1000 Hz .

ج - عامل التيارات الموزونة (weighted currents) ويرمز له IT .

$$IT = I \cdot (TIF)$$

٣ - بعد ذلك نحسب مكونات المرشح : المكثفات - الممانعات - المقاومات .

عند تصميم المرشح نحتاج الى البيانات التالية :

أ - مصدر التيار (Current source) والذى يتغير تبعاً لحدود الحمل وحالات زاوية الاشغال (فى حالة استخدام مبدلات استاتيكية) .

ب - مسامحة كل من المرشح والنظام (Filter and system admittances) حيث تحسب اقل مسامحة كلية مكافئة عند كل تردد توافقية والتي تنتج أقصى تشوه فى الجهد . ويمكن بسهولة الحصول على المحل الهندسى (Loci) لمعاوقة (او مسامحة) المرشح بمجرد ان تحدد مكونات المرشح . بينما يكون من الصعب الحصول على المحل

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٧٤ -

الهندسى لمعاوقة (او مسامحة) النظام لدرجة دقة عالية .

مرشحات التوليف *Tuned Filters*

أ - مرشح التوليف الاحادى (*Single Tuned Filter*)

يتكون مرشح التوليف الاحادى من C, L, R متصلين على التوالى ، كما فى شكل (٧-١١) وتكون معاوقة الدائرة تبعاً للمعادلة الآتية :

$$Z_f = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \dots\dots\dots (1)$$

وعند تردد الرنين f_n تصبح قيمة معاوقة المرشح مساوية للمقاومة R .

ويستخدم هذا النوع لتوليف تردد توافقية واحدة . قبل اختيار قيم C, L, R يجب معرفة قيم δ, Q كالتى :

$$\delta = \frac{\omega - \omega_n}{\omega_n}$$

or

$$\omega = \omega_n (1 + \delta)$$

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

حيث ω_n هى التردد الزاوى (*angular frequency*) لمرشح التوليف

$$X_0 = \omega_n L = \frac{1}{\omega_n C} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

(تكون ممانعة المفاعلة وممانعة السعوية بوحدات الاوم عند تردد التوليف)

وفى حال مرشح التوليف الاحادى فان عامل الجودة Q يساوى

$$Q = \frac{X_0}{R}$$

$$C = \frac{1}{\omega_n X_0} = \frac{1}{\omega_n R Q}$$

$$L = \frac{X_0}{\omega_n} = \frac{R Q}{\omega_n}$$

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٧٥ -

وبالتعويض عن قيم ω, L, C فى المعادلة رقم (١) نحصل على :

$$Z_f = R \left\{ 1 + jQ\delta \left(\frac{2 + \delta}{1 + \delta} \right) \right\}$$

وتكون قيمة δ صغيرة بالمقارنة بالواحد الصحيح فان Z_f تصبح

$$Z_f \approx R (1 + j2\delta Q) = X_0 \left(\frac{1}{Q} + j2\delta \right) = R_f + jX_f \quad \text{--- (2)}$$

$$|Z_f| \approx R \sqrt{1 + 4\delta^2 Q^2}$$

كما أنه من المناسب ، عند تصميم المرشحات ، استخدام المساحة Y بدلاً من المعاوقة Z ، وعلى ذلك فان مساحة المرشح

$$Y_f \approx \frac{1}{R (1 + j2\delta Q)} = G_f + jB_f$$

حيث :

$$G_f = \frac{Q}{X_0 (1 + 4\delta^2 Q^2)}$$

$$B_f = \frac{2\delta Q^2}{X_0 (1 + 4\delta^2 Q^2)}$$

اما جهد التوافقية V_n عند القضبان الموصل عليها المرشح يكون

$$V_n = \frac{I_n}{Y_{nf} + Y_{sn}} = \frac{I_n}{Y_n}$$

ولتقليل جهد التوافقية فمن الضرورى زيادة المساحة الكلية (Y_n) للمرشح المتصل على التوازي مع مصدر التغذية .

حيث :

Y_{nf} مساحة المرشح .

Y_{sn} مساحة المصدر (او النظام)

ويلاحظ من المعادلات السابقة ان Y_f تتناسب عكسياً مع δ وان V_n تتناسب ايضاً عكسياً مع Y_f وعلى ذلك فانه كلما زادت δ كلما زادت جهود التوافقية V_n .

وتكون قيمة جهد التوافقية V_n تبعاً للمعادلة :

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٧٦ -

$$|V_n| = I_n / \left\{ \left(G_{sn} + \frac{1}{R(1 + 4 Q^2 \delta^2)} \right)^2 + \left(B_{sn} - \frac{2 Q \delta}{R(1 + 4 Q^2 \delta^2)} \right)^2 \right\}^{1/2}$$

ويتحدد المحل الهندسى لمعاوقات التوافقيات (Harmonic impedances) بخطين مستقيمين ودائرة تمر بنقطة الاصل وذلك على المحاور R, jX ويمكن ان نحدد اقصى زاوية مرحلية (phase angle) لمعاوقة شبكة المصدر بان تكون اقل من 90° وهى على العموم تقل كلما زاد التردد (ماعدا فى شبكات الكابلات لدرجات التوافقيات العالية) . وعلى ذلك نحصل على اقصى جهد توافقية باستخدام الزاوية Φ_{sn} بأشارة مخالفة لأشارة δ .

وتصبح معادلة القيمة $|V_n|$ كالآتى :

$$|V_n| = I_n / \left\{ \left(|Y_{sn}| \cos \Phi_{sn} + G_f \right)^2 + \left(- |Y_{sn}| \sin \Phi_{sn} + B_f^2 \right) \right\}^{1/2}$$

وذلك بأخذ Φ_{sn} موجبة ، δ سالبة .

وتكون قيمة $|Y_{sn}|$ التى تعطى اقصى $|V_n|$ هى

$$|Y_{sn}| = \frac{\cos \Phi_{sn} (2 Q \delta \tan \Phi_{sn} - 1)}{R (1 + 4 Q^2 \delta^2)}$$

عندئذ تكون $|V_n|$ كالآتى :

$$|V_n| = I_n \omega_n L \left[\frac{1 + 4 Q^2 \delta^2}{Q (\sin \Phi_{sn} + 2 Q \delta \cos \Phi_{sn})} \right]$$

وتكون قيمة Q المثالية التى تعطى اقل جهد توافقية هى :

$$Q = \frac{1 + \cos \Phi_{sn}}{2 \delta \sin \Phi_{sn}}$$

$$|V_n| = I_n \delta \omega_n L \left[\frac{4}{1 + \cos \Phi_{sn}} \right] = \frac{2 I_n R}{\sin \Phi_{sn}}$$

ويجب ملاحظة ان المرشحات لاتصمم لاعطاء اقل توافقيات فى الجهد عند هذه الشروط ، ولكن تختار Q أعلى للوصول الى اقل فقد .

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٧٧ -

وتستخدم طريقة رسم المتجهات للمساعدة في اختيار قيمة Q المثلى ، أو بمعنى آخر لاختيار القيمة القصوى للمسامحة Y_n

واللحصول على أقصى قيمة لعامل انحراف التردد (Frequency deviation factor) (والذي يرمز له بالرمز δ_m) وباستخدام ممانعة X_0 ثابتة ومقاومة R متغيرة فان المحل الهندسى لمسامحة المرشح Y_f تكون نصف دائرة كما فى شكل (٧-١٢) تبعاً للمعادلة الآتية

$$Y_f = \frac{I}{R(1+j\delta Q)}$$

حيث

δ = عامل انحراف التردد

Q = عامل الجودة

اما قطر الدائرة فيساوى $\frac{I}{2\delta_m X_0}$ وتمس الدائرة المحور G عند نقطة الاصل كما فى شكل (٧-١٢) ، وتمثل المساحة المظللة فى الشكل المحل الهندسى لمسامحة النظام Y_{sn} ، والتي نحصل عليها بعكس المحل الهندسى للمعاوقة ، وتقع اقل مسامحة لكل تردد فى حدود المساحة المظللة .

يكون اقل متجة للمسامحة المعطاه Y_{nf} هى Y_n والتي تتعتمد على المساحة المظللة عند النقطة E ، ونلاحظ فى شكل (٧-١٢) ان رسم المتجهات عند δ_m موجبة والزاوية Φ سالبة وتساوى Φ_m ولذلك نحصل على اعلى جهد توافقية . وتكون الحالة المثالية عند النقطة D والتي تحقق :

اقصى V_n عند Y_{nf}

اقل V_n عند Y_{sn}

ومن الشكل نجد ان

$$|Y_{nf}| = \frac{\cos(\Phi_m/2)}{2\delta_m X_0}$$

$$|Y_n| = |Y_{nf}| \cos(\Phi_m/2) = \frac{1 + \cos \Phi_m}{4\delta_m X_0}$$

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٧٨ -

ويكون عامل الجودة بعد اختيار Y_{nf}

$$Q = \frac{X_0}{R} = \frac{X_0}{X_f / \tan \Phi_f} \quad , \quad \tan \Phi_f = \frac{X_f}{R}$$

ومن المعادلة رقم (٢) فإن

$$X_f = 2 \delta_m X_0$$

ومن الشكل رقم (٧-١٢) فإن

$$\tan \Phi_f = \cot (\Phi_m/2)$$

فتصبح معادلة عامل الجودة كالآتي :

$$Q = \frac{\cot (\Phi_m/2)}{2 \delta_m} = \frac{\cos(\phi_m / 2)}{2 \delta_m \sin(\phi_m / 2)}$$

بعد إيجاد قيم Q لمرشح التوليف ، وباستخدام عناصر المرشح نوجد مسامحة الشبكة Y_n التي تؤدي الى اقل مسامحة كلية Y عند كل تردد توافقية ، مع مراعاة ان اقل مسامحة للنظام تكون محددة باقل موصولية (conductance) مثل الناتجة في رسم متجهات المسامحة الموضح بشكل (٧-١٣) .

عند اى تردد توافقية ، تتكون المسامحة المكافئة للمرشح من المتجه الذى ينتهى عند النقطة O ويبدأ الى احد المناطق الثلاثة المحددة بشكل (٧-١٣) .

وعند الترددات التى تم تجهيز المرشح عندها فان طبيعة مسامحة المرشح تشابه الاوضاع فى المنطقة الثالثة ، اى تكون مسامحة المرشح الكلية كبيرة نسبياً . بينما عند الترددات الاخرى تقع المسامحة فى المنطقة الاولى او الثانية .

وتكون اسوأ قيم لمسامحة الشبكة تلك الناتجة من اقل مسامحة كلية والتى تعرف من الشكل كالآتي :

- فى المنطقة رقم ١ - نهاية محصلة قيمة المسامحة y_n على الجزء الرأسى للحدود (ويقابلها اقل موصولية)

- فى المنطقة رقم ٢ - نهاية Y_n عند ركن الحدود .

- فى المنطقة رقم ٣ - تتعامد Y_n بالقرب من الحد الزاوى (angular limit) .

ب - مرشحات التوليف المزدوج (Double Tuned Filters)

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٧٩ -

يوضح شكل (٧-١٤) ب تركيب مرشح توليف مزدوج يكافئ مرشحى توليف احادى ، متصلين على التوازي والموضحين بشكل (٧-١٤) أ ، والدائرتين نفس تردد الرنين ، وتكون العلاقة بين عناصر الدائرتين كالآتى :

$$C_1 = C_a + C_b$$

$$C_2 = \frac{C_a C_b (C_a + C_b) (L_a + L_b)^2}{(L_a C_a - L_b C_b)^2}$$

$$L_1 = \frac{L_a L_b}{L_a + L_b}$$

$$L_2 = \frac{(L_a C_a - L_b C_b)^2}{(C_a + C_b)^2 (L_a + L_b)}$$

$$R_2 = R_a \left[\frac{a^2 (1 - x^2)}{(1 + ax^2)^2 (1 + x^2)} \right] + R_b \left[\frac{1 - x^2}{(1 + ax^2)^2 (1 + x^2)} \right] + R_l \left[\frac{(1 - x^2) (1 - ax^2)}{(1 + x^2)^2 (1 + ax^2)} \right]$$

حيث :

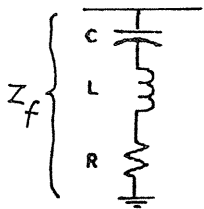
$$x = (L_b C_b / L_a C_a)^{1/2} , \quad a = \frac{C_a}{C_b}$$

واذا امكن تقليل المقاومة R_l للمفاعل L_l فانه يتم حذفها من المعادلة السابقة. وهذا يؤدي الى ميزة انخفاض مفقودات القدرة عند التردد الاساسى بالمقارنة بمرشح توليف احادي . وتعتبر الفائدة الرئيسية لمرشحات التوليف المزدوج هى الاستخدام فى تطبيقات الجهود العالية حيث يقل استخدام عدد المفاعلات (L) والتي تتعرض لجهود النبضات الكلية للخط .

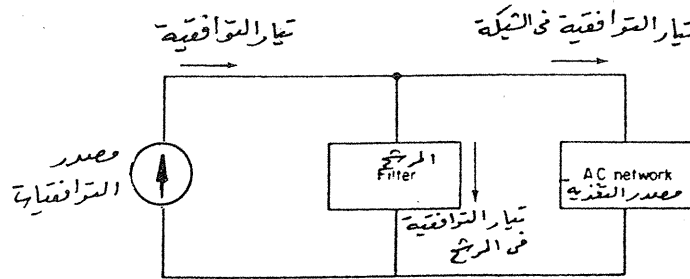
ويوضح شكل (٧-١٤) ج مثلاً لخاصية مرشح توليف مزدوج حيث يحدث له رنين عند التوافقتين الخامسة والسابعة (٢٥٠ ، ٣٥٠ هرتز)

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

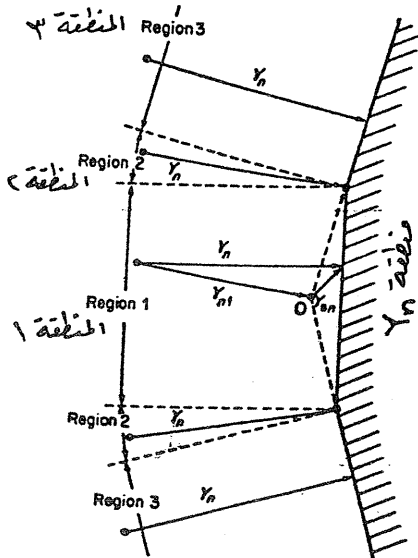
- ٢٨٠ -



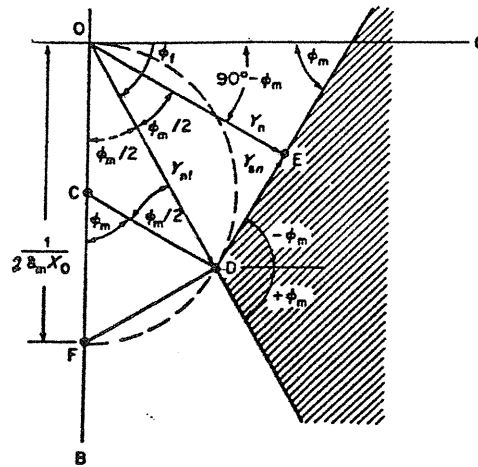
شكل (٧-١١)



شكل (٧-١٠)



شكل (٧-١٣)



شكل (٧-١٢)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٨١ -

ويعطى شكل (٧-١٤) مثالاً آخر لمرشح له رنين عند التردد (٣٠٠، ٤٠٠ هرتز) .
وعند تصميم مرشح التوليف ، فإنه يمكن تقليل انحراف اقصى تردد وذلك بإختيار مرشحات قابله للتوليف عن طريق التشغيل الآلى للمكثف او بتغيير قيمة المفاعله ، وتكفى الحدود $\pm 0.5\%$. وفى مبدلات التيار المستمر (d.c) ذات الجهود العالية يستخدم نظام التحكم الذى يقيس القدرة غير الفعالة عند ترددات التوافقيات للمرشح ويتحكم فى L او C والتى بدورها تؤثر فى إشارة وقيمة القدرة غير الفعالة .
وتمتاز مرشحات التوليف التى تحتوى على نظم تحكم عن مرشحات التوليف الثابتة فى النقاط الآتية :

- ١ - أن القدرة المقننة للمكثف اقل
 - ٢ - أن للمكثف معامل درجة حرارة مرتفع (*high temperature coefficient*) وارتفاع فى القدرة غير الفعالة المقننة / وحدة الحجم / وحدة التكلفة .
 - ٣ - نتيجة ارتفاع قيمة Q فإن فقد القدرة يقل .
- وعلى ذلك فإن الميزتين ١ ، ٢ يقللان تكاليف المكثف بينما الاخيرة فتقلل تكاليف المقاومة وبالتالي تكاليف فقد القدرة .

مرشحات الاخفاء (*Damped filters*)

فيما يلى توضيح لبعض انواع مرشحات اخفاء امرار الترددات العالية

أ - مرشح الدرجة الاولى (*First order filter*)

يتكون هذا المرشح من مقاومة ومكثف كما فى شكل (٧-١٥) ، ويكون المكثف كبيراً وبالتالي يكون فقد ه كبيراً عند التردد الاساسى .

ب - مرشح الدرجة الثانية (*Second order filter*)

أن هذا المرشح من الانواع الجيدة ولكن مفقوداته عند التردد العالى اكبر من مفقودات مرشح الدرجة الثالثة ، ويوضح شكل (٧-١٦) مكونات هذا النوع ، وخاصية العلاقة بين مكوناته والعلاقة بين ω, Z .

ج - مرشح الدرجة الثالثة (*Third order filter*)

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٨٢ -

ويوضح شكل (١٧-٧) أ مكونات هذا النوع علماً بأن قدرة المكثف C_2 اصغر من قدرة المكثف C_1 ويمتاز بأنخفاض المفقودات .

ء - مرشح النوع C (C - type filter)

يمتاز هذا النوع بانخفاض المفقودات عند التردد الاساسى حينما تكون L, C_2 توليف توالى عند نفس التردد وهذا المرشح اكثر حساسية لانحراف التردد الاساسى والتغير فى مكوناته . ويوضح شكل (١٧-٧) ب مكونات المرشح .

وتمتاز مرشحات الاخمد بالآتى

١ - ان عمل وحمل المرشح اقل حساسية لتغيرات درجات الحرارة ولانحراف التردد ولسماحية تصنيع المكونات وللفقد فى المكثفات .

٢ - تغيير معاوقة منخفضة لطيف عريض للتوافقيات .

ومن عيوب مرشحات الاخمد ارتفاع المفقودات .

ويراعى عند تصميم مرشحات الاخمد اختيار عامل الجودة Q بحيث يعطى افضل خاصية تغطى مدى التردد المطلوب ولاختار افضل Q ؛ كما فى حالة مرشحات التوليف . كما نحتاج للكميتين الآتيتين لتحديد ملامح مرشح الاخمد .

$$f_0 = \frac{1}{2 \pi C R}$$

$$m = \frac{1}{R^2 C}$$

حيث ان القيمة النموذجية للكمية m بين ٠,٥ - ٢ ، ولقيمة محددة للمكثف يمكن الحصول على قيمتى L, R للوصول الى مسامحة عالية لتغطى مدى التردد المطلوب .

وفى حالة مرشح اخمد الدرجة الثانية فان الموصلية ($Conductance$) والتقليبية ($susceptance$) لمسامحة المرشح تكون :

$$G_f = \frac{m^2 x^4}{R_1 [(1 - m x^2)^2 + m^2 x^2]}$$

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٨٢ -

$$B_f = \frac{x}{R_1} \left[\frac{1 - mx^2 + m^2 x^2}{(1 - mx^2)^2 + m^2 x^2} \right] \quad \text{حيث } x = \frac{f}{f_0}$$

$$Y_f = G_f + j B_f$$

كما أن أقل قيمة للمسامحة الكلية (وهى مجموع مسامحة المرشح Y_f ومسامحة الشبكة Y_{sn}) كالاتى :

$$Y = B_f \cos \Phi_m + G_f \sin \Phi_m$$

وحتى تكون المعادلة Y موجبة و x أقل من القيمة المعطاه فان

$$| \cot \Phi_f | = | G_f / B_f | = | \tan \Phi_m |$$

وبذلك نتبين انه كلما كبرت قيمة x نحصل على أقل مسامحة كلية وهى مساوية لمسامحة المرشح (اى ان $Y_{sn} = 0$).

ويوضح شكل (٧-١٨) أقل مسامحة نموذجية لمرشح اخماد الدرجة الثانية متصل على التوازي مع شبكة مفقوداتها مهمة (اى ان $\Phi_m = \pm 90^\circ$) ويبين الشكل الآتى :

- المنحنيات ارقام 1,2,3,4 لقيم $m = 0.25, 0.2, 1, 2$ على التوالى وعند $\Phi_0 = \pm 90^\circ$ وأية قيمة لمعاوقة الشبكة Z_0 .

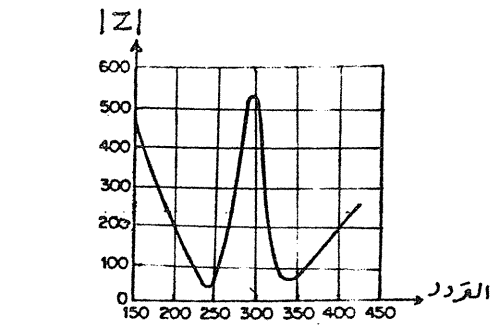
بينما يوضح شكل (٧-١٩) العلاقة بين G ، وتردد مرشح اخماد الدرجة الثالثة عند تساوى المكثفين $C_1 = C_2 = C$ ولقيم $m = 0.5, 1, 2$ ويلاحظ ان قيم الذروة للمنحنى أكثر حدة عن حالة مرشح الدرجة الثانية .

مرشح مؤلف (Composite Filter)

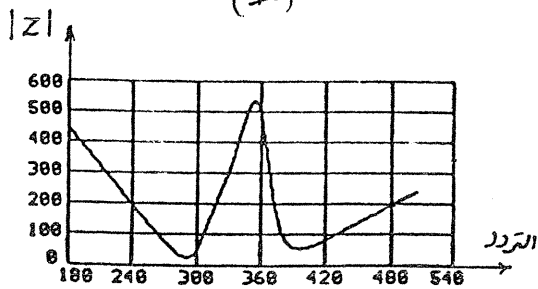
يستخدم هذا النوع للتخلص من أكثر من درجة توافقية ، ويتكون من عدد من مرشحات الامرار النطاقي تبعاً لعدد درجات التوافقيات التى يراد التخلص منها ويضبط كل منها على توافقية محددة ، هذا بالإضافة الى ان مرشح امرار الترددات العالية يصمم بحيث تكون معاوقته صغيرة لجميع الترددات اعلى من او أقل من تردد معين ويوضح شكل (٧-٢٠) أ مكونات مرشح مؤلف يحتوى على مرشحى امرار نطاقى للترددين f_1, f_2 وكذلك مرشح امرار الترددات العالية التى تكون مساوية او اكبر من التردد f_3 ، كما يوضح شكل (٧-٢٠) ب العلاقة بين R, Z لهذا المرشح عند تغيير التردد f .

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

٢٨٤ -

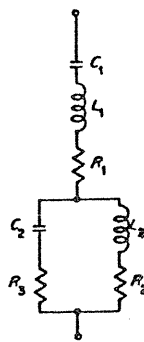


(أ)

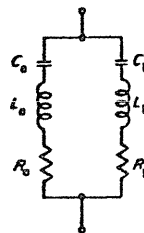


(ب)

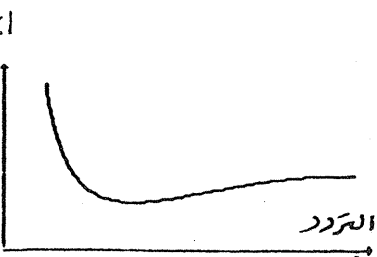
شكل (٧-١٤)



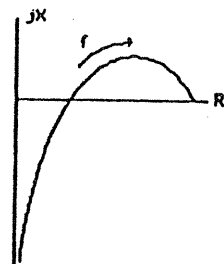
(أ)



(ب)



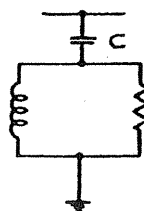
(أ)



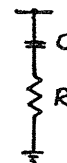
(ب)

شكل (٧-١٦)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

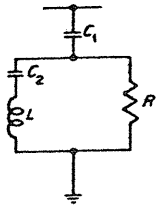


(أ)

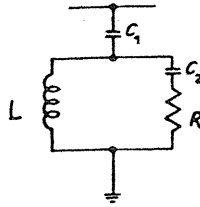


شكل (٧-١٥)

- ٢٨٥ -

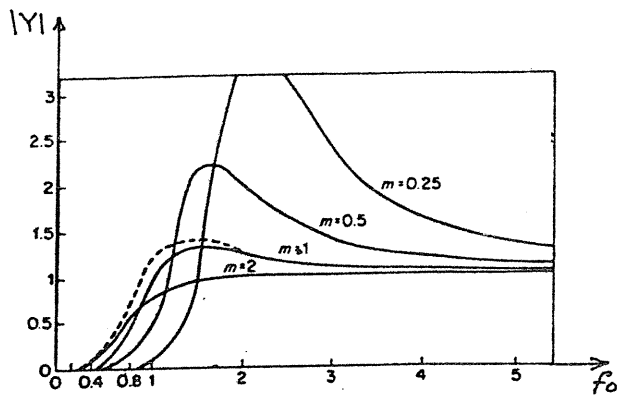


(C)

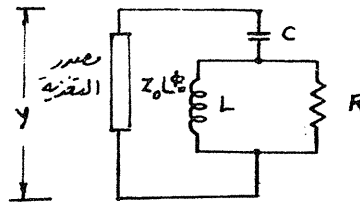


(P)

شكل (٧-١٧)

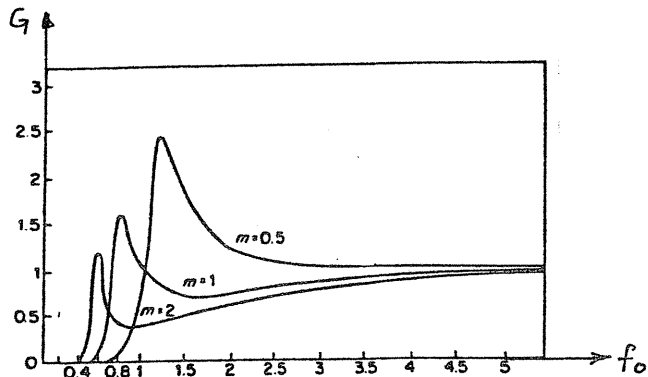


(C)

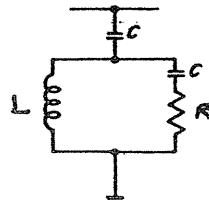


(P)

شكل (٧-١٨)



(C)



(P)

شكل (٧-١٩)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٨٦ -

وتحتاج المبدلات الاستاتيكية (*Static convertors*) ذات القدرات العالية والتي تتكون من ٦ او ١٢ نبضة الى مرشحات للتخلص من التوافقيات الخامسة - السابعة - الحادية عشر .. وفي هذه الحالة تستخدم مجموعة من مرشحات الامرار النطاقي لدرجات التوافقيات الخامسة والسابعة والحادية عشر ... ومرشح امرار الترددات العالية لدرجة التوافقيات ١٧ والاعلى منها .

وفيما يلي مثلاً عملياً لتصميم مرشح من هذا النوع .

مثال (١-٧)

مبدل ٦ نبضات مقنناته كالآتي :

$$\text{rated voltage} = 100 \text{ kv}$$

$$\text{rated power} = 100 \text{ Mw d.c}$$

$$\alpha = 15^\circ$$

ويتصل المبدل بشبكة جهد 275 kv ترددها 50 Hz من خلال محول بياناته كالآتي :

$$275 \text{ kv} / 83 \text{ kv}$$

$$Z \% = 15 \%$$

$$\text{Secondary fundamental current} = 780 \text{ A}$$

$$\text{Primary fundamental current} = 236 \text{ A}$$

وقد استخدم مرشح ، على الجانب الابتدائي للمحول . عبارة عن مرشحات توازي للامرار النطاقي للتوافقيات الخامسة - السابعة - الحادية عشر - الثالثة عشر بالاضافة الى مرشح امرار الترددات العالية للتوافقيات السابعة عشر والاعلى منها . وتكون القدرة الكلية للمرشح 50 MVA_r ، ويوضح شكل (٢١-٧) أ مكونات المرشح ، وبفرض ان :

$$\text{Capacitance temperature coefficient} = 0.05 \% / C^\circ$$

$$\text{Inductor temperature coefficient} = 0.01 \% / C^\circ$$

$$\text{Ambient temperature} = \pm 20^\circ C$$

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٨٧ -

$$\text{Frequency tolerance} = \Delta f / f = \pm 1 \%$$

اوجد قيم R, L, C لكل فرع فى المرشح .

الحل :

بواسطة قيمة القدرة الكلية للمرشح نحسب السعوية الكلية للمكثفات

$$C_t = \frac{MVar \times 10^6}{2 \pi f (kv)^2}$$

$$= \frac{50 \times 10^6}{2 \pi \times 50 \times (275)^2} \simeq 2.085 \quad \mu F$$

وبقسمة هذه السعوية بالتساوى على جميع أفرع المرشح فان سعوية كل فرع تكون

$$C_t = 5 C$$

$$\therefore C = 0.417 \mu F$$

ولحساب قيم L, R نحتاج الى المعادلات الآتية :

$$C = \frac{1}{\omega_n R Q}$$

$$L = \frac{RQ}{\omega_n}$$

$$Q = \frac{\cos \Phi_m + 1}{2 \delta_m \sin \Phi_m}$$

$$\delta_m = \frac{\Delta f}{f_n} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta L}{L_n} + \frac{\Delta C}{C_n} \right) \right]$$

يجب مراعاة انه يمكن اخذ أية قيمة لمعاوقة النظام ولكن يجب ان تكون زاوية النظام Φ_m محددة بأقل من ٧٠° عند أى تردد ونحسب أولاً كل من δ_m , Q كالآتى:

$$\delta_m = \frac{1}{100} \left\{ 1 + \frac{1}{2} (0.05 \times 20 + 0.01 \times 20) \right\} = 0.016$$

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٨٨ -

وتكون افضل قيمة للثابت Q الذى يعطى اقل جهد توافقيات يساوى

$$Q = \frac{1 + \cos 75^\circ}{2 (0.016) \sin 75^\circ} = 41$$

وباستخدام قيم Q, C وتردد التوافقيات الخامسة والسابعة والحادية عشر والثالثة عشر نحصل على قيم L, R لكل فرع كالاتى :

مرشح التوافقية الخامسة :

$$C = 0.417 \mu F$$

$$f_5 = 5 \times 50 = 250 \text{ Hz}$$

$$C = \frac{1}{\omega_n R Q}$$

$$\therefore R = \frac{1}{0.417 \times 10^{-6} \times 2\pi \times 250 \times 41} \simeq 37 \Omega$$

$$L = \frac{R Q}{\omega_n} = \frac{37 \times 41}{2\pi \times 250} \simeq 0.974 \text{ H}$$

وبنفس الطريقة تحسب L, R عند تردد التوافقيات السابعة والحادية عشر والثالثة عشر

مرشح التوافقيات السابعة عشر والاعلى منها (مرشح اخماد) :

بفرض ان : $m=1$

$$C = 0.417 \mu F$$

$$f_o = 17 \times 150 = 850 \text{ Hz}$$

باستخدام المعادلتين

$$f_o = \frac{1}{2\pi CR}$$

$$m = \frac{L}{R^2 C}$$

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٨٩ -

يمكن حساب L, R

$$R = \frac{1}{2 \pi \times 850 \times 0.417 \times 10^{-6}} \simeq 452 \Omega$$

$$L = 1 \times (452)^2 \times (0.417 \times 10^{-6}) \simeq 0.085 H$$

ويوضح شكل (٧-٢١) ب قيم C, L, R لكل مرشح توافقية .

وعند استخدام مبدل ١٢ نبضة فيتم حذف مرشحي التوافقتين الخامسة والسابعة ويصبح المرشح كما في شكل (٧-٢٢) أ . ويوضح شكل (٧-٢٢) ب العلاقة بين Z, R كدالة في التردد لهذا المرشح ، ويوضح المحل الهندسي للمعاوقة وتكون نقط الرنين عند التوافقيات الحادية عشر والثالثة عشر والسابعة والعشرين .

وللمقارنة يتضح من الشكل (٧-٢٣) المحل الهندسي لمعاوقة مرشح التوافقتين الخامسة والسابعة كدالة في التردد (٦٠ هرتز) ، ويمر المحل الهندسي للمعاوقة المركبة (*complex impedance*) بالمحور $R (x=0)$ أي عند ترددي التوليف ٣٠٠ ، ٤٢٠ هرتز كما تلاحظ الازاحة الحادثة في المحل الهندسي والتي ترجع الى مقاومة مفاعلات التوليف .

فعند استخدام المرشح المبين في شكل (٧-٢٢) أ ولكي نحذف التوافقيات الحادية عشر والثالثة عشر والتوافقيات الاعلى ، فان لهذا المرشح تأثيراً كبيراً في تقليل التوافقيات غير المرغوبة ، ويرجع هذا الى ان اختيار اقل حجم للمرشحات يعتمد على :

- استخدام وحدات المكثفات ذات الاحجام الاقتصادية المتاحة .

- اقل كمية قدرة غير فعالة مولدة مطلوبة للمبدل .

وعلى هذا يمكن تبسيط تصميم المرشح كالآتي :

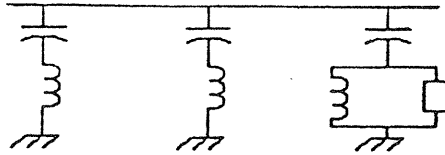
١ - اما استبدال مرشحات التوليف للتوافقتين الحادية عشر والثالثة عشر بمرشح احادي (*single filter*) من نوع الاخمد .

٢ - او باستبدال كل المرشحات بمرشح اخمد احادي .

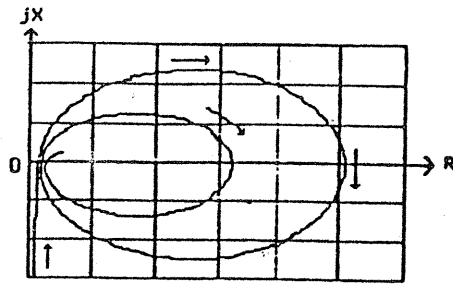
في الحالة الاولى ، يجب ان يولف مرشح الاخمد الذي حل محل مرشحي التوليف عند حوالى التوافقية الثانية عشر ، ويتم اختيار العامل Q بقيمة بين ٢٠ - ٥٠ بينما مرشح الاخمد للتوافقيات العالية يختار له بين ٢ - ٤ . وفي الحالة الثانية ، فان مرشح الاخمد الاحادي يولف ايضاً عند حوالى التوافقية الثانية عشر بينما تختار Q بين ٢ - ٦ للحصول على معاوقة منخفضة عند الترددات العالية .

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٩٠ -

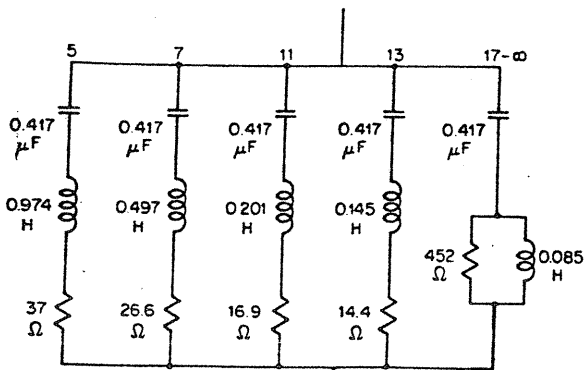


(P)



(٧)

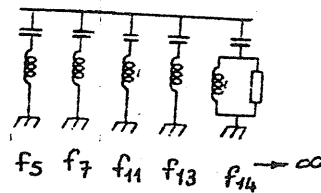
شكل (٧-٢٠)



(٧)

شكل (٧-٢١)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »



(P)

- ٢٩١ -

للمقننات الكبيرة الحديثة للمشروعات التي تحتاج جهود التيار المستمر العالية ، فإنها تكون معرضة لزيادة احتمال رنين توافقيات الدرجات المنخفضة بين معاوقة النظام ومكثف المرشح .

ويعتمد رنين مرشح التوالى او التوازي على ما اذا كان مصدر التغذية (a.c) او المبدل هو مصدر توافقيات الدرجات المنخفضة . ففي النظام غير المتزن نجد ان تيار التوافقية الثالثة ينتج من المبدلات وعلى ذلك فان التوافقية الثالثة الناتجة عبارة عن مركبة التتابعية الموجية ، ولا تمتص بملفات الدلتا للمحول .

وبذلك فان البديل المفضل لحذف رنين الدرجات المنخفضة عبارة عن توليفة من مرشح النوع C (C - type filter) ومرشح اخماد الدرجة الثانية (Second - order damped filter) والموضح فى شكل (٧-٢٤) .

العلاقة بين مستوى قصر الشبكة وقدرة مصدر التوافقيات

امكن الوصول الى العلاقة بين مستوى قصر الشبكة (Short circuit power) والقدرة الكلية للمعدات المصدرة للتوافقيات على الشبكة الكهربائية (كالمبدلات الاستاتيكية - معدات السرعات المتغيرة) وذلك لتحديد احتياج الشبكة الى تركيب مرشحات كالآتى :

أ - اذا تحقق الشرط

$$G_h \leq \frac{S_{syst}}{120}$$

حيث :

$$G_h = \text{القدرة الكلية للمعدات المصدرة للتوافقيات}$$

$$S_{syst} = \text{قدرة مستوى قصر الشبكة .}$$

فانه يمكن تركيب مكثفات قياسية لتحسين معامل القدرة عند الحاجة

ب - اذا تحقق الشرط

$$\frac{S_{syst}}{120} < G_h \leq \frac{S_{syst}}{70}$$

فانه يمكن تركيب مكثفات تتحمل جهد زائد ١٠ ٪ لتحسين معامل القدرة عند الحاجة

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٩٢ -

جـ- اذا تحقق الشرط

$$G_h > \frac{S_{syst}}{70}$$

فان الشبكة تحتاج لتركيب ممانعات ومكثفات تتحمل جهد زائد ١٠ ٪ اى تحتاج لتركيب مرشحات .

مثال (٧-٢)

مبدل ١٢ نبضة قدرته 1000 KVA متصله بنقطة الربط المشترك (PCC) على قضبان لها مستوى قصر 50 MVA هل نحتاج لتركيب مرشحات ؟
الحل :

$$S_{syst} = 50 \text{ MVA}$$

$$G_h = 1000 \text{ KVA}$$

$$\frac{S_{syst}}{120} = \frac{50000}{120} = 416.6$$

$$\frac{S_{syst}}{70} = \frac{50000}{70} = 714$$

وعلى ذلك يتحقق الشرط

$$G_h > \frac{S_{syst}}{70}$$

اى تحتاج هذه الشبكة لتركيب مرشح ويتحمل المكثف جهد زائد ١٠ ٪ .

تصميم مرشح توالى يتكون من L, C

المعطيات :

١ - جهد الشبكة V_s بوحدة kv .٢ - القدرة غير الفعالة للمرشح بوحدة $KVar$.٣ - تردد التوليف او درجة التوافقية n .

المطلوب :

١ - الجهد المقنن لتشغيل المكثف (الجهد بين وجهين)

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٩٣ -

٢ - قيمة L بوحدات هنرى .

٣ - تيار تشغيل المكثف (والمفاعل) بالأمبير .

خطوات الحل :

١ - عند التردد الاساسى تكون معادلتى الجهد للمكثف والمفاعل تبعاً لقيمة درجة التوافقية التى سيصمم عندها المرشح (n) . كما فى شكل (٧-٢٥) .

$$V_c = V_s \frac{n^2}{n^2 - 1}$$

$$V_L = V_s \frac{1}{n^2 - 1}$$

ونحسب جهد الخط ($L-L$) لتشغيل المكثف V_c تبعاً للمعادلة السابقة . ثم نحسب جهد

$$\frac{V_c}{\sqrt{3}} \text{ الوجه } (L-N) \text{ لتشغيل المكثف .}$$

٢ - نحسب القدرة غير الفعالة للمفاعل

$$(KVar)_L = KVar \times \frac{1}{n^2 - 1}$$

٣ - نحسب القدرة غير الفعالة للمكثف

$$(KVar)_c = KVar + (KVar)_L$$

٤ - نحسب ممانعة المكثف عند التردد الاساسى

$$X_c = \frac{(KV)_{LL}^2}{(KVar)_c} \Omega$$

٥ - نحسب ممانعة المفاعل عند التردد الاساسى

$$V_L = jX_L I_n = \frac{1}{n^2 - 1} V_f$$

$$V_c = -jX_c I_n = \frac{n^2}{n^2 - 1} V_f$$

ومن المعادلتين السابقتين نحصل على

$$X_L = \frac{X_c}{n^2} \Omega$$

ثم نحسب ممانعة المفاعل

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \text{ Henry}$$

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٩٤ -

٦ - نحسب تيار تشغيل المكثف (والذى يساوى تيار تشغيل المفاعل)

$$I_c = I_L = \frac{(KVar)_c}{\sqrt{3} KV_{LL}} \text{ Amp}$$

مثال (٧-٣)

شبكة كهربائية جهدها 11kv تحتاج لمرشح قدرته الكلية غير الفعالة 3500 KVar والمطلوب حساب قيم C, L للمرشح عند درجة توافقية $n = 4.8$ (القدرة الكلية غير الفعالة للمرشح هي القدرة اللازمة لتحسين معامل القدرة)

الحل :

$$\begin{aligned} \text{جهد الخط (L-L) لتشغيل المكثف} &= V_c = V_s \frac{n^2}{n^2 - 1} \\ &= 11 \frac{(4.8)^2}{(4.8)^2 - 1} = 11.499 \text{ kv} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{جهد الوجه (L-N) لتشغيل المكثف} &= V_c = \frac{11.499}{\sqrt{3}} = 6.6468 \text{ kv} \\ \text{وعلى ذلك يختار الجهد المقنن للمكثف يساوى } &11.5 \text{ KV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{القدرة غير الفعالة لتحسين معامل القدرة} &= \text{القدرة غير الفعالة للمفاعل KVar} \left(\frac{1}{n^2 - 1} \right) \\ &= 3500 \frac{1}{(4.8)^2 - 1} \simeq 159 \text{ KVar} \end{aligned}$$

$$\text{القدرة غير الفعالة للمكثف KVar} = 3500 + 159 = 3659 \text{ KVar}$$

وعلى ذلك نختار قدرة المكثف 3600 KVar عند جهد الخط 11.5 KV .

$$X_c = \frac{(KV)^2}{MVar} = \frac{(11.5)^2}{3.6} = 36.736 \Omega$$

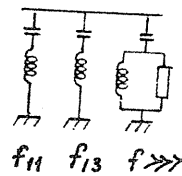
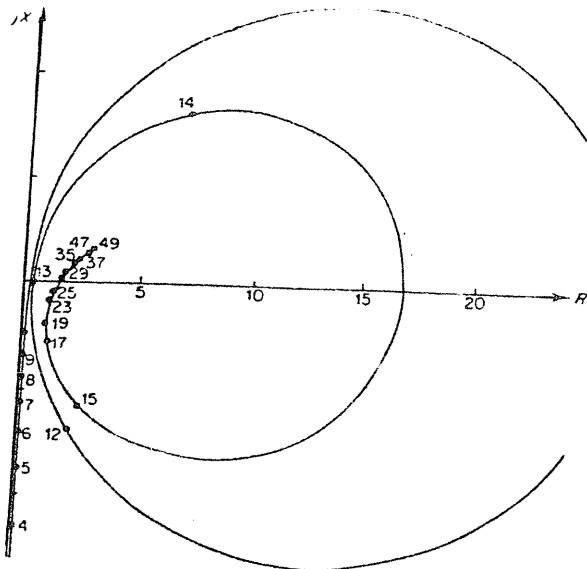
$$\therefore C = \frac{1}{2 \pi f (36.736)} = 86.648 \mu F$$

ثم نحسب ممانعة المفاعل عند التردد الاساسى

$$X_L = \frac{X_c}{n^2} = \frac{36.736}{(4.8)^2} = 1.594 \Omega$$

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

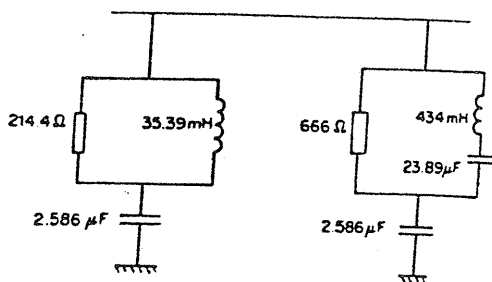
٢٩٥ -



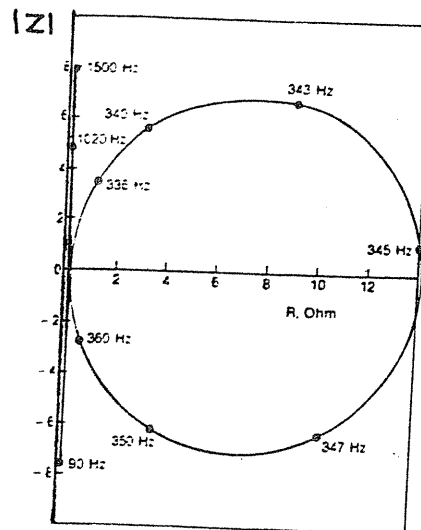
(١٥)

(٤)

شكل (٢٢-٧)



شكل (٢٤-٧)



شكل (٢٣-٧)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٩٦ -

$$X_L = 2 \pi f L$$

$$L = \frac{X_L}{2 \pi f} = \frac{1.594}{2 \pi \times 50} = 5.074 \text{ mH}$$

ثم نحسب تيار تشغيل المكثف (والذى يساوى تيار تشغيل المفاعل)

$$I_c = I_L = \frac{3600}{\sqrt{3} \times 11.5} = 180.95 \text{ Amp}$$

وعلي ذلك تكون البيانات الفنية للمرشح كالاتى والموضحة فى شكل (٢٦-٧)

- المكثف :

$$3.6 \text{ MVar} , 11.5 \text{ KV} , 36.736 \Omega , 86.648 \mu F , 180.95 \text{ Amp}$$

- المفاعل :

$$11.5 \text{ KV} , 5.074 \text{ mH} , 180.95 \text{ Amp}$$

خصائص مكونات المرشح :

لو عرفنا جهود التوافقيات والجهد الاساسى عند القضبان المراد تركيب مرشحات عليها ، فانه يمكن حساب الجهد والتيار المقنن لكل من المكثفات والمفاعلات والمقاومات المكونة للمرشح . وايضاً نحسب القدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة والمفقودات .

للتغلب على الانهيارات التى يمكن حدوثها على المكونات ، فانه يتم اختيار المقننات على اساس اسوء الحالات المتوقعة ، اي تكون المقننات على الاساس الاتى :

- اقصى جهد اساسى .

- اقصى انحراف فى التردد الفعال .

- تيارات التوافقيات من المصادر الاخرى ومن احتمالات الرنين بين المرشح والشبكة ، تتكون المكثفات من وحدات قياسية متصلة على التوالي او على التوازي ، او على التوالي والتوازي وذلك للوصول الى الجهد المقنن والقدرة المقننة المطلوبين .

وتكون الخصائص الاساسية للمكثفات هي :

١ - معامل درجة الحرارة (Temperature coefficient) للمكثف

يفضل ان يكون معامل درجة الحرارة منخفض جداً لمرشحات التوليف وذلك للتغلب على فض التوليف (de-tuning) الحادث من تغيير السعوية مع درجة الحرارة المحيطة او من السخونة الذاتية للمكثفات . ولايؤخذ بهذه الخاصية في حالة مرشحات الاخمداد او

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٩٧ -

مكثفات القدرة .

٢ - القدرة غير الفعالة لكل وحدة حجم

يمكن الحصول من المكثفات علي أعلى قدرة غير فعالة لكل وحدة حجم بان تكون المفقودات صغيرة وبالتشغيل عند الجهود العالية . لهذا السبب فان التشغيل عند جهود زائدة يجب الا يسبب اتلاف حراري للعزل ، وان التشغيل لفترة صغيرة عند الجهود العالية يجب ان يمنع التأين الاملاكي للعزل .

وتكون القدرة غير الفعالة المقننة المرغوبة للمكثف هي مجموع القدرات غير الفعالة عند كل الترددات الموجودة .

٣ - فقد القدرة

٤ - العول (reliability)

٥ - التكاليف

عند تصميم المفاعلات المستخدمة للمرشح يؤخذ في الاعتبار الاتي

- مفقودات الظاهرة السطحية *Skin - effect losses*

- مفقودات التخلفية *Hysteresis losses*

- تأثير مستوى الفيض بالقلب اي حدوث فض التوليف (*de-tuning*) نتيجة الخاصية غير الخطية للدائرة المغناطيسية . ولهذا يفضل ان تكون كثافة الفيض منخفضة عند استخدام القلب الحديدي . ويفضل ان يكون المفاعل من النوع بدون قلب مغناطيسي (هوائى) .

يختار العامل Q عند ترددات التوافقيات الشائعة او السائدة .

وذلك لتقليل التكاليف والذي يكون عادة بين ٥٠ - ١٥٠ ، وعلى ذلك فمن المرغوب ان تكون Q منخفضة ويمكن الحصول على ذلك باستخدام مقاومة على التوالي .

وتعتمد قدرة المفاعل على اقصى تيار جذر متوسط المربعات (*r.m.s*) وعلى مستوى العزل المطلوب لتحمل الجهود العابرة والناجمة من عمليات التشغيل .

تكاليف المرشحات :

يتلخص عمل المرشح في كبح او اخماد التوافقيات بأقل تكلفة ممكنة ونحصل منه على القدرة غير الفعالة بالاضافة الى ذلك فان تكاليف المفقودات بالمرشح توزع بين مصدر القدرة غير الفعالة والمرشح .

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٩٨ -

وتؤخذ هذه الفروض عادة عند عمل تحليل التكاليف لمكونات المرشح :

١ - فى الانشاءات النموذجية تتكون المكثفات من مصفوفة من وحدات المكثفات لكل منها قدرة اسمية عند جهد التشغيل ويوجد مصهر وقاية خارجى .

وتكون تكاليف مصفوفة المكثفات ثابتة تقريباً حتى قدرة معينة ، وللقدرات الاعلى تضاف وحدة او اكثر على كل مجموعة توالي حسب المطلوب ، حتى نصل الى تكاليف دقيقة مقبولة لكل م.ف.أ.ر. (MVar) او للحجم (Size) . ويعتبر الموقف اكثر صعوبة اذا كانت الوحدات القياسية المتاحة ذات قدرات مقننة مختلفة مثلاً : ٥٠ - ١٠٠ - ١٥٠ - ٢٠٠ ك.ف.أ.ر. وبالتالي تتغير الزيادة فى التكاليف للمدى المختلف لاحجام مصفوفة المكثفات . وسنفترض ان تكاليف المكثف تتناسب مع قدرته المقننة

٢ - رغم ان تكاليف المفاعلات تعتمد على طريقة الانشاءات (مثلاً وحدات التبريد بزيوت العزل - وحدات التبريد بالهواء الطبيعى ...) فان تكاليفها لا تتغير تغيراً كبيراً للوحدات ذات القدرات المختلفة .

وتكون التكاليف التقريبية المستخدمة فى التحليل تبعاً للمعادلة :

$$U_K + U_L \text{ (total MVar rating) = تكاليف المفاعل}$$

حيث :

$$U_K = \text{تكاليف ثابتة}$$

$$U_L = \text{التكاليف التزايدية للمفاعل / القدرة MVar}$$

٣ - واضبط قيمة Q نحتاج لاضافة مقاومة فى كل فرع، لذلك تضاف قيمة تكاليف ثابتة لكل مقاومة فى عمل الحسابات . وحيث ان تكاليف المقاومة من نوع التبريد بالهواء اقل تكلفة من باقى المكونات . واذا كانت المقاومة من نوع التبريد بالزيوت فانها تكون اكثر تكلفة .

٤ - نفترض ان مقاومة المفاعل لحسابات مفقودات القدرة تكون ثابتة عند جميع الترددات .

فيما يلي توضيح هذا على نوعين من المرشحات :

١ - مرشح توليف احادى :

فى دائرة المرشح ذات Q عالية فانه يمكن افتراض ان

$$V_C = V_L + V_S$$

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٩٩ -

حيث :

 V_c جهد المكثف V_L جهد المفاعل V_s جهد المصدرويكون حجم المرشح (S) كالآتي

$$S = \frac{V_s^2}{X_c - X_L}$$

حيث :

 X_c مفاعلة المكثف عند التردد الاساسي X_L مفاعلة المفاعل عند التردد الاساسيوحيث ان المرشح يولف عند التردد n فان :

$$X_o = nX_L = X_c / n$$

$$X_L = \frac{X_c}{n^2} , V_L = \frac{V_c}{n^2}$$

$$\begin{aligned} \therefore S &= \frac{V_s^2}{X_c \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)} \\ &= \frac{V_s^2}{X_c} \left(\frac{n^2}{n^2 - 1}\right) \text{ MVA} \end{aligned}$$

$$V_c - V_L = V_c \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) = V_s$$

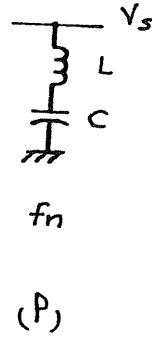
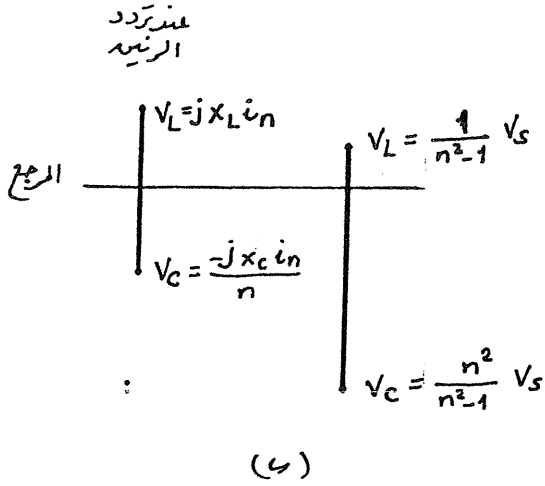
$$V_s = V_c \left(\frac{n^2 - 1}{n^2}\right)$$

$$V_c = V_s \left(\frac{n^2}{n^2 - 1}\right) \text{ KV}$$

ونحصل على حمل كل مرشح من تقدير التكاليف كالآتي :

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

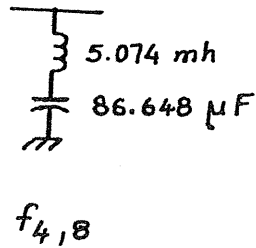
- ٢٠٠ -



شكل (٥-٧)

المكثف المتفاعل

11.5	11.5	الجهد (KV)
180.95	180.95	التيار (A)
5.074	86.648	المحاثة / السعة (μF) (mh)
1.594	36.736	الممانعة (Ω)



شكل (٦-٧)

- ٣٠١ -

١ - للمكثف :

تكون الاحمال الاساسية

$$\frac{V_c^2}{X_c} = \left(\frac{V_s^2}{X_c} \right) \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right)^2$$

$$= S \left[\frac{n^2}{n^2 - 1} \right] \quad MVar$$

وتكون احمال التوافقيات

$$I_n^2 \left(\frac{X_c}{n} \right) = \frac{I_n^2 V_s^2}{S n} \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right) MVar$$

وتكون مفقودات القدرة (الحمل الكلى)

$$K_{CLt} = K_{cL} \left[S + \frac{I_n^2 V_s^2}{S n} \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \right] \quad KW$$

حيث K_{CL} = عامل الفقد (loss factor) للمكثفات بوحدة (KW/MVar) .

ب - للمفاعل

ان الاحمال الاساسية

$$\frac{V_L^2}{X_L} = \left(\frac{V_c}{n^2} \right)^2 \left(\frac{n^2}{X_c} \right) = \frac{V_c^2}{n^2 X_c} = \frac{S}{n^2} \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right) MVar$$

وتكون احمال التوافقيات في حالة المفاعل مساوية لحالة المكثف حيث ان الممانعة متساوية عند تردد التوافقية .

وتحسب مفقودات القدرة كالاتى

تكون المقاومة الفعالة R هى :

$$R = \frac{X_o}{Q} = \frac{X_c}{nQ}$$

والتيار الاساسى I_1 يساوى

$$I_1 = \frac{S}{V_s} \quad KA$$

وعلى ذلك فان مفقودات القدرة تكون:

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٠٢ -

$$\begin{aligned}
 (I_l^2 + I_n^2)R &= \frac{S^2}{V_s^2} \frac{X_c}{nQ} + I_n^2 \frac{X_c}{nQ} \\
 &= \frac{S^2}{nQ} \left(\frac{1}{S} \right) \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right) + \frac{I_n^2 V_s^2}{nSQ} \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \\
 &= \left(\frac{S}{nQ} + \frac{I_n^2 V_s^2}{nSQ} \right) \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \times 10^3 \quad MW
 \end{aligned}$$

والمقارنة ، يعبر عن تكاليف مفقودات الطاقة بدلالة التكاليف الرئيسية (Capital cost) باستخدام عامل القيمة الحالي الآتي :

$$P_v = \frac{(1+i)^N - 1}{i(1+i)^N}$$

حيث :

i = معدل الربح (interest rate)

N = تكلفة المرشح (Budgeted filter life) في عمر التشغيل

وعلي ذلك فان التكاليف الحالية لمفقودات القدرة تكون :

$$\begin{aligned}
 &P_v U_u F_u \times 365 \times 24 \times (\text{total power loss}) \\
 &= 8760 \times P_v U_u F_u \times (\text{total power loss})
 \end{aligned}$$

وتكون التكاليف الكلية :

$$\begin{aligned}
 T.Cost &= U_T + \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \left\{ U_c \left(S + \frac{I_n^2 V_s^2}{nS} \right) + U_L \left(\frac{S}{n^2} + \frac{I_n^2 V_s^2}{nS} \right) \right. \\
 &\quad \left. + 8760 P_v U_u F_u \left[K_{CL} \left(S + \frac{V_s^2 I_n^2}{nS} \right) + 10^3 \left(\frac{S}{nQ} + \frac{I_n^2 V_s^2}{nSQ} \right) \right] \right\}
 \end{aligned}$$

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٣٠٣ -

وبصورة مختصرة تكون التكاليف الكلية

$$T. Cost = U_T + AS + \frac{B}{S}$$

حيث :

$$U_u = \text{تكاليف مفقودات القدرة / كيلوات ساعة}$$

$$F_u = \text{عامل انتفاع المرشح (Filter utilization factor)}$$

$$U_c = \text{التكاليف التزايدية للمكثف / القدرة MVar}$$

$$U_L = \text{التكاليف التزايدية للمفاعل / القدرة MVar}$$

$$U_T = \text{التكاليف الثابتة الكلية لمكونات فرع المرشح .}$$

حيث :

$$A = \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \left\{ U_c + \frac{U_L}{n^2} + 8760 P_v U_u F_u \left(K_{CL} + \frac{10^3}{nQ} \right) \right\}$$

$$B = \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \left(\frac{V_s^2 I_n^2}{n} \right) \left\{ U_c + U_L + 8760 P_v U_u F_u \left(K_{CL} + \frac{10^3}{Q} \right) \right\}$$

ويمكن الحصول على اقل التكاليف اذا تحقق الشرط الآتي :

$$\frac{d}{ds} (TCOST) = 0$$

اي نحصل على أقل التكاليف عندما

$$S_{Min} = \sqrt{\frac{B}{A}} \text{ MVar}$$

٢ - مرشح الامرار النطاقي

مثل حالة مرشح التوليف الاحادي فان الاحمال عند التردد الاساسي وتردد

التوافقيات تكون

$$S = \frac{V_s^2}{X_c} \left(\frac{n_o^2}{n_o^2 - 1} \right) \text{ MVar} \dots\dots\dots (3)$$

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٣٠٤ -

حيث $n_o =$ النسبة بين تردد التوليف الى تردد المصدر
ونحصل على قدرة كل مرشح من تقدير التكاليف الآتية :
أ - للمكثف :

الاحمال الاساسية هي :

$$S \left[\frac{n_o^2}{n_o^2 - 1} \right] MVA_r$$

والاحمال عند التوافقية n هي

$$I_n^2 \left(\frac{X_c}{n} \right)$$

وباستخدام المعادلة (3) نحصل على

$$\frac{1}{S} \frac{I_n^2}{n} \left(\frac{V_s^2 n_o^2}{n_o^2 - 1} \right)$$

وبذلك فان الاحمال الكلية للتوافقيات تكون

$$\frac{1}{S} V_s^2 \left(\frac{n_o^2}{n_o^2 - 1} \right) \sum_{n=n_{min}}^{max} \left(\frac{I_n^2}{n} \right) MVA_r$$

ب - للمفاعل :

لمرشح الامرار النطاقي تكون Q تبعاً للمعادلة :

$$Q = \frac{R}{X}$$

وبافتراض ان Q تساوى 1.5 فان :

$$R = 1.5 X_o = 1.5 n_o X_L$$

واذا كان المرشح يوافي لتردد قريب من التوافقية السابعة عشر فان :

$$R \simeq 25 X_L$$

وحيث ان :

$$I_c = I_L + j I_R$$

$$\therefore I_c \simeq I_L$$

وعلى ذلك فان الاحمال الاساسية هي :

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٠٥ -

$$\begin{aligned}
 I_L^2 X_L &= \frac{I_C^2 X_C}{n_o^2} \\
 &= \left(\frac{S}{V_s} \right)^2 \left(\frac{V_s^2}{n_o^2 S} \right) \left(\frac{n_o^2}{n_o^2 - 1} \right) \\
 &= \left(\frac{S}{n_o^2} \right) \left(\frac{n_o^2}{n_o^2 - 1} \right) \quad MVA_r
 \end{aligned}$$

وعند التوافقية n فإن التيار I_L يكون

$$(I_L)_n = \frac{I_n R}{R + jX_L} = \frac{I_n Q}{Q + \frac{jn}{n_o}}$$

$$|(I_L)_n| = \frac{I_n Q}{\sqrt{Q^2 + \left(\frac{n}{n_o} \right)^2}}$$

وعند التوافقية n تكون X_L

$$\begin{aligned}
 (X_L)_n &= X_o \left(\frac{n}{n_o} \right) = \left(\frac{n}{n_o} \right) \left(\frac{X_c}{n_o} \right) \\
 &= \left(\frac{n}{n_o^2} \right) \left(\frac{V_s^2}{S} \right) \left(\frac{n_o^2}{n_o^2 - 1} \right)
 \end{aligned}$$

وعلى ذلك فإن الحمل عند التوافقية n يكون :

$$(I_L)_n^2 (X_L)_n = \frac{1}{S} Q^2 V_s^2 \left[\frac{n_o^2}{n_o^2 - 1} \right] \left[\frac{n I_n^2}{Q^2 n_o^2 + n^2} \right] \quad MVA_r$$

والحمل الكلى للتوافقيات

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٣.٦ -

$$\frac{1}{S} Q^2 V_s^2 \left[\frac{n_o^2}{n_o^2 - 1} \right] \sum_{n=n_{min}}^{n_{max}} \left[\frac{n I_n^2}{Q^2 n_o^2 + n^2} \right] MVAR$$

وتتكون مفقودات القدرة من ثلاثة أجزاء هي :

أ - مفقودات قدرة المكثفات وتساوي

$$K_{CL} \cdot (\text{total rating in KW})$$

ب - مقاومة التوالي للمفاعلة عند التردد الاساسى :

$$R_L = \frac{X_o}{Q_L} = \frac{n_o}{Q_L} X_L$$

حيث Q_L عامل الكمية للمفاعل ، فتصبح مفقودات القدرة نتيجة R_L هي :

$$I_L^2 R_L = \frac{n_o}{Q_L} (MVAR \text{ loading})$$

$$= \frac{S}{n_o Q_L} \left(\frac{n_o^2}{n_o^2 - 1} \right) \dots\dots\dots MW$$

وتكون مفقودات القدرة للتوافقيات هي:

$$\sum (I_L)_n^2 (R_L)_n = \frac{1}{S} \frac{Q^2 V_s^2 n_o}{Q_L} \left(\frac{n_o^2}{n_o^2 - 1} \right) \sum_{n=n_{min}}^{n_{max}} \left(\frac{I_n^2}{Q^2 n_o^2 + n^2} \right) MW$$

ج - يعبر عن مفقودات القدرة في مقاومة التوازي R كجزء من حمل المفاعل ، وعلى

ذلك فان المقاومة عند التردد الاساسى تكون :

$$R = Q X_o = Q n_o X_L$$

$$|I_R| = \frac{|I_L| X_L}{R} = \frac{I_L X_L}{Q n_o X_L} = \frac{I_L}{Q n_o}$$

ويكون فقد القدرة :

$$I_R^2 R = \frac{1}{Q n_o} I_L^2 X_L$$

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

٣.٧

$$= \frac{1}{Q_{n_o}} (MVA_{r \text{ loading}})$$

$$= \frac{S}{Q_{n_o}^3} \left(\frac{n_o^2}{n_o^2 - 1} \right) \times 10^3 \text{ KW}$$

وعند التوافقية n يكون I_R كالآتي :

$$|(I_R)_n| = |(I_L)_n| \left(\frac{X_L}{R} \right)$$

وعلى ذلك فان الفقد في القدرة يكون :

$$\sum (I_R)_n^2 (R)_n = \frac{1}{S} \frac{Q^2 V_s^2}{n_o} \left(\frac{n_o^2}{n_o^2 - 1} \right) \sum_{n=n_{min}}^{n_{max}} \left(\frac{n^2 I_n^2}{Q^2 n_o^2 + n^2} \right) \times 10^3$$

وباستخدام الطريقة نفسها المستخدمة في مرشح التوليف الاحادي للحصول على التكاليف الكلية فان :

$$TCOST = U_T + AS + \frac{B}{S}$$

حيث

$$A = \left\{ U_c + \frac{U_L}{n_o^2} + 8760 P_v U_u F_u \left(K_{CL} + \frac{10^3}{Q_L n_o} + \frac{10^3}{Q n_o^3} \right) \right\} \left(\frac{n_o^2}{n_o^2 - 1} \right)$$

$$B = \left(\frac{n_o^2}{n_o^2 - 1} \right) V_s^2 \sum_{n=n_{min}}^{n_{max}} I_n^2 \left\{ \left(\frac{U_L}{n} + \frac{Q^2 U_L n}{Q^2 n_o^2 + n^2} \right) + 8760 P_v U_u F_u \left(\frac{K_{CL}}{n} + \frac{Q^2 n_o \times 10^3}{Q_L (Q^2 n_o^2 + n^2)} + \frac{Q n^2 \times 10^3}{n_o (Q^2 n_o^2 + n^2)} \right) \right\}$$

ونحصل على اقل التكاليف عندما

$$S_{Min} = \sqrt{\frac{B}{A}} \text{ MVA}_{r}$$

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٣٠٨ -

العلاقة بين معاوقة المدخل والتردد لشبكة تحتوى على مرشح

لقد اوضحنا فى الباب الرابع كيفية الحصول على معاوقة المدخل لشبكة كهربائية كدالة فى درجة التوافقية (n) ، وفى هذا الجزء سنوضح استجابة التردد ($Frequency response$) عند اضافة مكثف ومفاعل للشبكة .

بملاحظة الشكل (٧-٢٧) أ نجد شبكة مكونة من مبدل ٦ نبضات (مصدر التوافقيات) - مكثف قدرة - محركات - مولدات موضعية ... وتمثل جميع مكونات الشبكة ، فيما عدا المكثف ، بمعاوقة المدخل Z_i أى ان

$$Z_i = R + jL$$

وعلى ذلك يوزع تيار التوافقيات I_n بين معاوقة المدخل والمكثف كما فى شكل (٧-٢٧) ب . وتكون كل من معاوقة المدخل ومعاوقة المكثف دالة فى درجة التوافقية ، ويرسم العلاقة بين المعاوقة الكلية Z_n ، محصلة التوازي بين معاوقة المدخل ومعاوقة المكثف ، كنسبة من المعاوقة الاساسية Z_1 ودرجة التوافقية n نحصل على العلاقة الموضحة بشكل (٧-٢٧) ج ، والتي تبين حدوث تردد الرنين f_p عند اقصى قيمة للمعاوقة الكلية والتي تحدث عندما تتساوى معاوقة المدخل مع معاوقة المكثف :

$$Z_{1n} = Z_{cn}$$

عند التردد f_p والذى يساوى

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

وعند اضافة مفاعل على التوالى مع المكثف ، كما فى شكل (٧-٢٨) أ تصبح العلاقة بين Z_n ، n كما فى شكل (٧-٢٨) ب ويحتوى المنحنى على نقطتى التردد الآتيتين :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C}} \quad \text{at} \quad Z_{Ln} = Z_{cn}$$

$$f_p = f_r \frac{1}{1 + (L_s / 2L_f)} \quad \text{at} \quad Z_{in} = Z_{cn}$$

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٢٠٩ -

وعلى ذلك يمكن تلخيص ذلك فى الآتى :

- تمثل جميع مكونات الشبكة ، عند قضبان الربط المشترك pcc ، بمعاوقة المدخل والتي تكون على التوازي مع المرشح كما فى شكل (٧-٢٩) أ .
- يكون تردد التوليف عند $Z_L = Z_c$ كما فى شكل (٧-٢٩) ب .
- يكون تردد رنين التوالى عند $Z_i = Z_c$ كما فى شكل (٧-٢٩) ج .
- وتكون العلاقة بين Z الكلية (عند قضبان الربط المشترك pcc) ودرجة التوافقية n كما فى شكل (٧-٢٩) د .

مثال (٧-٣)

بالرجوع الى مثال (١-٤) بالباب الرابع ، والموضح بشكل (٧-٣٠) ، حيث تم توصيل مكثف $6MVar$ لتحسين معامل القدرة على قضبان الربط المشترك (pcc) المتصل عليها بمبدل ٦ نبضات (مصدر تيار التوافقيات) - احسب قيمة محاثه المفاعل لمرشح توليف التوافقية الخامسة مع رسم العلاقة بين معاوقة المدخل ، فى هذه الحالة، ودرجة التوافقية n .

الحل :

قدرة المكثف $6 MVar$

الجهد $11 Kv$

$$X_{c(p.u)} = - \frac{MVA_b}{MVA_c}$$

$$= - \frac{100}{6} = - 16.667 p.u$$

وتكون معاوقة المكثف عند تردد التوافقيات هى

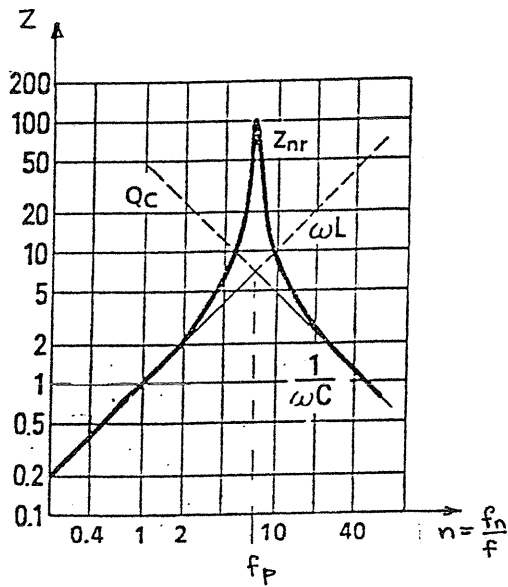
$$X_{cn} = \frac{X_c}{n}$$

وممانعة المكثف عند التردد الاساسى

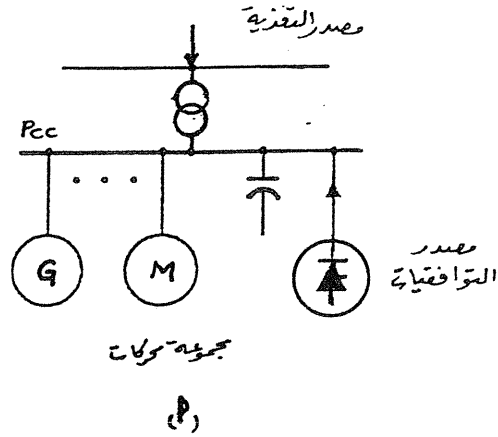
$$X_c = \frac{(KV)^2}{MVar} = \frac{(11)^2}{6} = 20.1666 \Omega$$

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

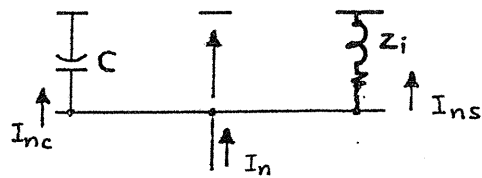
- ٢١٠ -



(أ)

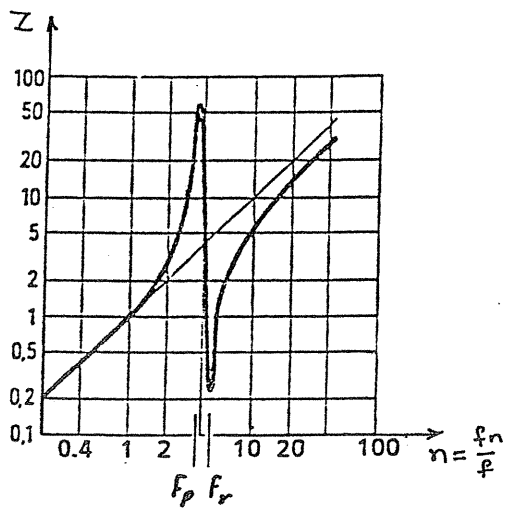


مجموعة محركات

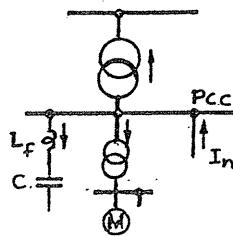


(ب)

شكل (٧-٢٧)



(د)



(هـ)

شكل (٧-٢٨)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٣١١ -

$$C = \frac{1}{2 \pi f X_c}$$

وتكون ممانعة المفاعل عند التردد الاساسى

$$X_L = \frac{X_c}{n^2} = \frac{20.1666}{(5)^2} = 0.8066 \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2 \pi f}$$

$$X_{L(pu)} = \frac{16.667}{25} = 0.6666 p.u$$

وبافتراض ان المفاعل من الالومنيوم وله ثابت $Q = 50$

$$Q = \frac{X}{R} = 50$$

$$R = \frac{X}{50} = \frac{0.6666}{50} = 0.01333 p.u$$

ثم نحسب الآتى :

١ - معاوقة المكثف عند تردد التوافقيات :

درجة التوافقية	X_{cn}
1	-16.666
2	-8.333
3	-5.555
4	-4.1665
5	-3.3332
6	-2.7776
7	-2.3808
8	-2.08325
9	-1.85177
10	-1.6666
11	-1.5151
12	-1.3888
13	-1.2820

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٣١٢ -

٢ - معاوقة المفاعل عند تردد التوافقيات :

n	عامل الضرب للمقاومة	عامل الضرب للممانعة	R_{Ln}	X_{Ln}
1	1	1	0.0133	0.6666
2	1.3094	2	0.0174	1.3332
3	1.8251	3	0.0243	1.9998
4	2.5471	4	0.0339	2.6664
5	3.4753	5	0.0462	3.3330
6	4.6098	6	0.0613	3.9996
7	5.9506	7	0.0792	4.6662
8	7.4977	8	0.0997	5.3328
9	9.2511	9	0.1231	5.9994
10	11.2107	10	0.1491	6.6660
11	13.3766	11	0.1779	7.3326
12	15.7488	12	0.2095	7.9992
13	18.3273	13	0.2437	8.6658

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢١٢ -

٢ - ثم نحصل على محصلة معاوقة المكثف والمفاعل على التوالي :

n	$R_{L,C}$	$X_{L,C}$	$Z_{L,C}$
1	0.0133	-16	16
2	0.0174	-7	7
3	0.0243	-3.5552	3.5522
4	0.0339	-1.5001	1.5005
5	0.0462	0.000	0.0462
6	0.0613	1.222	1.2235
7	0.0792	2.2854	2.2868
8	0.0997	3.2495	3.2511
9	0.1231	4.1476	4.1494
10	0.1491	5.000	5.0022
11	0.1779	5.8175	5.8202
12	0.2095	6.6104	6.6137
13	0.2437	7.3838	7.3878

٤ - نحسب محصلة التوازي للمعاومتين Z_{eq} , $Z_{L,C}$

n	$Z_{L,C}$	Z_{eq}	$Z_{L,C} \parallel Z_{eq}$
1	16	0.3809	0.3720
2	7	0.6840	0.6231
3	3.5552	0.9892	0.7739
4	1.5005	1.3127	0.7002
5	0.0462	1.6671	0.0449
6	1.2235	2.0748	0.7696
7	2.2868	2.6366	1.2246
8	3.2511	3.6277	1.7145
9	4.1494	6.7874	2.5751
10	5.0022	5.1335	2.5335
11	5.8202	1.5386	1.3018
12	6.6137	2.0518	1.5659
13	7.3878	2.4935	1.8642

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٣١٤ -

عند تسجيل العلاقة بين $X_{L,C}$, $R_{L,C}$ للمرشح نحصل على العلاقة بشكل (٧-٣١) ونلاحظ حدوث التقاطع عند تردد التوافقية الخامسة .

ويوضح شكل (٧-٣٢) العلاقة بين $Z_{L,C}$ للمرشح ودرجة التوافقية n ونلاحظ ان تردد التوليف عند درجة التوافقية الخامسة .

كما يوضح شكل (٧-٣٣) العلاقة بين Z الكلية للشكل (٧-٣٠) ودرجة التوافقية n ومنه نجد الآتى :

- تردد التوليف (f_r) عند درجة التوافقية الخامسة .

- تردد رنين التوازي (f_{p1}) عند درجة التوافقية ٨, ٣

- تردد رنين التوازي (f_{p2}) عند درجة التوافقية ٦, ٩

ويوضح شكل (٧-٣٤) العلاقة بين Z الكلية للشبكة بشكل (٧-٣٠) قبل وبعد تركيب مرشح توليف الدرجة الخامسة ويلاحظ الآتى :

- المعاوقة عند $n=5$ أصبحت تساوى صفر بعد تركيب المرشح .

- انخفاض المعاوقة عند تردد الرنين f_{p1} .

- اراحة وانخفاض المعاوقة عند تردد الرنين f_{p2} .

ويفضل عند تصميم مرشح التوليف الاعتبارات الآتية :

١ - اختيار المرشح بحيث نحاول ابعاد تردد الرنين عن تردد التوافقيات الموجودة بالشبكة فمثلاً فى حالة وجود مصدر تيار التوافقيات الخامسة والسابعة بالشبكة فيجب ابعاد تردد الرنين عن هذين الترددات .

٢ - يتم اختيار اكثر من تردد توليف للمرشح ونرسم العلاقة بين Z, n للشبكة عند كل تردد توليف للمرشح ونختار الافضل والذي يؤدي الى تقليل قيمة المعاوقة عند تردد الرنين الى اقل ما يمكن كذلك تقليل معاوقة تردد التوافقيات الموجودة بالشبكة تحت الدراسة ويمكن احياناً بعد عمل مقارنة بين الاختيارات المختلفة نجد انه من الافضل عدم تركيب مرشح .

٣ - يتم توليف المرشح عند او اقل قليلاً من اقل درجة توافقية ناتجة من مصدر

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٣١٥ -

التوافقيات ، فمثلاً لمبدل ٦ نبضات تكون اقل توافقية يصدرها هي 5^{th} ، لذلك يوافق المرشح بين 4.7^{th} , 5^{th} .

ملاحظات :

١ - عند وجود أكثر من مصدر للتوافقيات عند pcc فان تيارات وجهود التوافقيات تجمع اتجاهياً وتكون قيمة جذر متوسط المربعات لجهود وتيارات المصادر المختلفة للتوافقيات كالآتي :

$$V = (V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots)^{1/2}$$

$$I = (I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots)^{1/2}$$

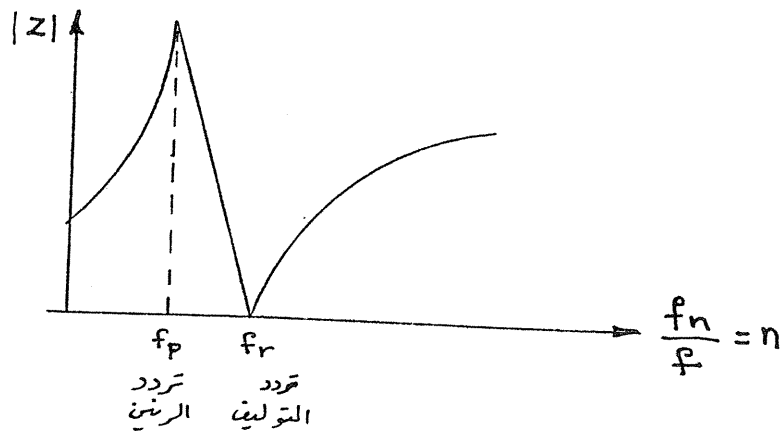
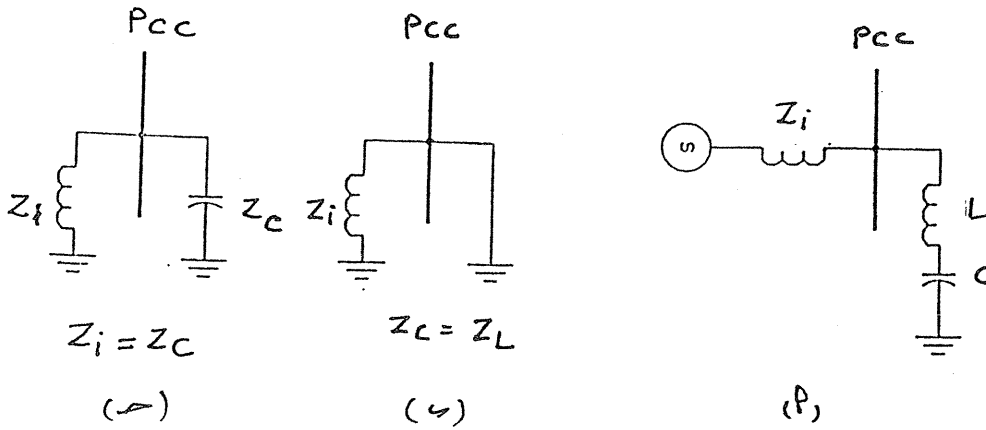
٢ - اذا كانت المجموعة الاتجاهية لمحول المبدل دلتا / دلتا فان تيارات التوافقيات الخامسة والسابعة المارة بالملفات الابتدائية والثانوية لا يوجد بينها زاوية ازاحة (phase shift) .

٣ - اذا كانت المجموعة الاتجاهية لمحول المبدل دلتا / نجمة فتوجد بذلك زاوية ازاحة بين تيار التوافقية الخامسة بالملفات الثانوية و الابتدائية بقيمة $5 \times 30^\circ$ الى 150° بينما نجد في حالة تيار التوافقية السابعة بقيمة $7 \times 30^\circ$ الى 210° .

٤ - يجب اختيار قيمتي القدرة والفولت اي KVA_b , KV_b كقاعدة (base) للحصول على التيار الاساسي I_b من العلاقة :

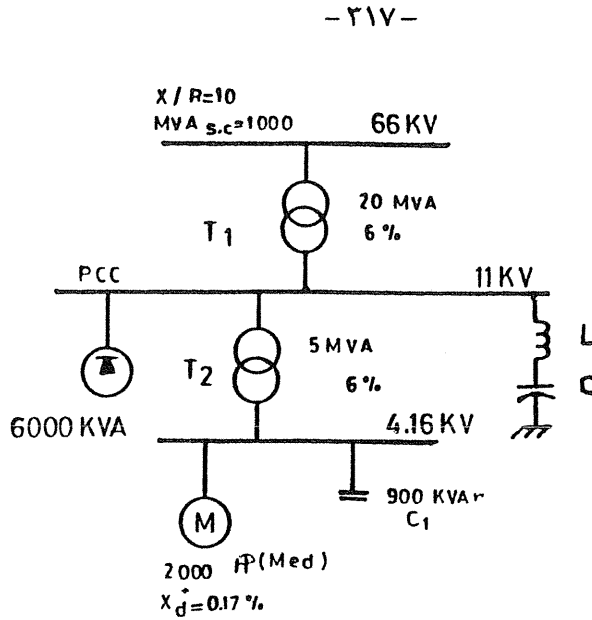
$$I_b = \frac{KVA_b}{\sqrt{3} (KV_b)}$$

- ٢١٦ -

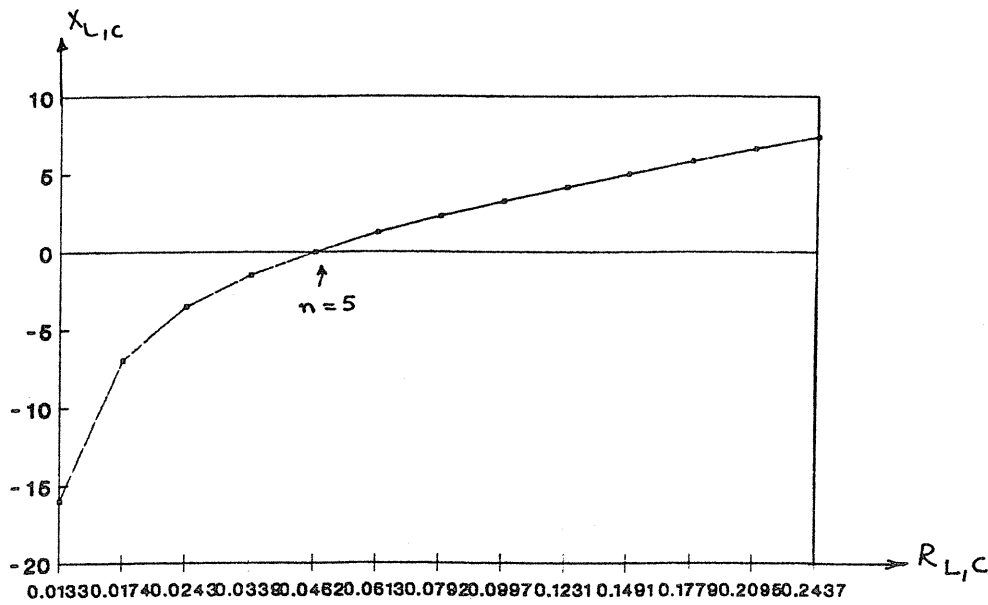


(٥)
شكل (٧-٢٩)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »



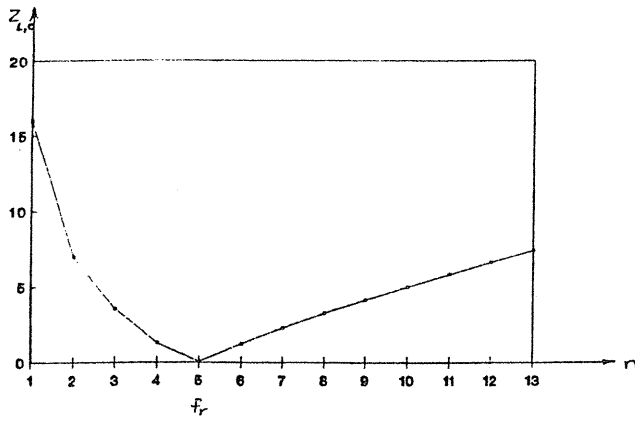
شكل (٣٠-٧)



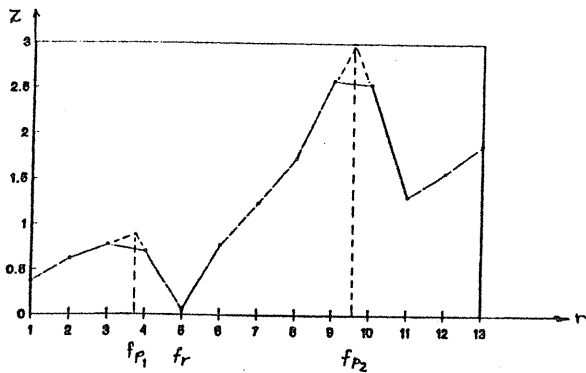
شكل (٣١-٧)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

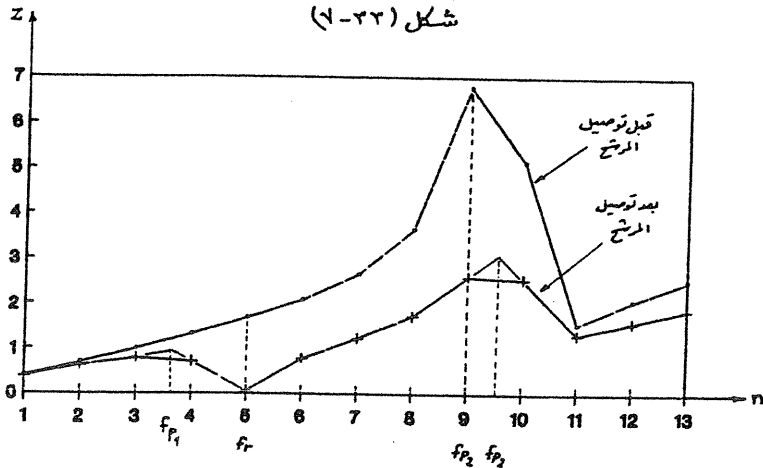
- ٣١٨ -



شكل (٧-٢٤)



شكل (٧-٢٣)



شكل (٧-٣٤)

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٣١٩ -

References

- 1 - *Advanced problems in Electrical Engineering*
M.K.S.A. Systems
B.L. THERAJA
- 2 - *Electrical Power Equipment and measurements with heavy current electrical applications*
Alan Symonds
- 3 - *Electrical measuring instruments and measurements .*
By B.E.F. KARSA.
- 4 - *Principels of Electrical measurments*
H.Buckingham , E.M. Price
- 5 - *Basic electrical engineering*
A. Kasatkin
M. Perekalin
- 6 - *Electrical Power Utilization*
N.N. HANCOCK
- 7 - *Distribution System*
Electrical utility engineering reference book.
Westinghouse
- 8 - *Theory of Alternating Current Machinery*
Alexander S. Longsdrof
- 9 - *Electrical Distribution Engineering*
Anthony J. Pansini

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٣٢٠ -

10 - *Electronic Instrumentation and measurments*

David A. Bell

11 - *Standard Handbook for Electrical Engineering*

Donald G. Fink

H. Woyne Beaty

12 - *Power System Harmonics*

J. ARRILLAGA

D.A. BRADLEY

P.S. BODGER

13 - *Electrical Distribution Network design*

IEE Power engineering series 9

E. Lakervi & E.I . Holmes

14 - *IEEE Transactions on Power Apparatus and systems, Vol.*

PAS-Power system harmonics : An overview .

15 - *IEEE Transaction on Power Delivery , Vol.8, No.1. January 1993*

A survey of harmonic voltages and currents at the customer's bus .

16 - *Mathematical Statistics*

J. N. KAPUR

H.C. SAXENA

17 - *Electrical Engineering Handbook*

SIEMENS

18 - *Handbook of Electrical Engineering*

S.L. BHATIA & KHANNA PUBLISHERS

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

- ٣٢١ -

19 - *Applied Electronic Instrumentation and Measurements .*

DAVID BUCHLA

WAYNB McLACHLAN

20 - *CIRCUTOR*

Control and measuring equipment

1992 REF. C - Mol. F - GB

21 - *Effect of Harmonics on Power Factor Correction systems .*

Dr. M. SHAKER

SHAKER Consultancy Group

22 - *Harmonic Measurments in Power Systems Using A Low Cost Instrument .*

A. Marani , E. Mazzoni Italy.

23 - *IEEE Guide For harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power Converters , IEEE std. 519 - 1981 .*

24 - *Duffey & Stratford . Update of Harmonic standard IEEE-519 : IEEE Recomend practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems .*

IEEE Transactions on Industry Applications , Vol. 25, No. 6 , November / December . 1989.

25 - *FFT Alogrithms For the Harmonic Analysis of Three - phase Transformer Banks with Magnatic Saturation*

IEEE Transactions on Power Delivery , Vol. 6, No. 1 , January 1991.

26 - *Compensation Systems for Industry*

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٢٢٢ -

*E. Wanner, R Mathys and M. Housler, Baden Brown Boveri Rev.
9/10 - 83*

27 - IEC 555 (1982)

*Disturbances in Supply systems caused by Household
Appliances and Similar Electrical Equipment .*

555 - 1 (1982) Part 1 : Definitions

555 - 2 (1982) Part 2 : Harmonics

28 - Elcontral

Power in Control

Electrical Energy Analyzers and measuring Instruments

29 - Systems Innovations

*Focusing on Creative Problem Solving for the Power Industry . GE
. Vol. 7. No. 2 November 1993*

**30 - A new generalized concept for the design of thyristor phase -
controlled Var compensators**

Part 1 : Steady state performance

Part 2 : Transient Performance .

*IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98 ,
No.1 Jan/Feb 1979*

31 - Harmonic Load Losses in HVDC Converter Transformers

IEEE Transactions on Power Delivery , Vol. 6 , No.1, Jan 1991

32 - Rectifier - Loaded Synchronous generators with damper windings

« التوافقيات في الشبكات الكهربائية »

- ٣٢٣ -

Proc. IEE, vol. 120, No.6 , June 1973

33 - Reactive Power Compensation in Transmission Systems

ASEA 5 - 721 83 VASTERAS Sweden

Power System Consulting Department .

34 - On The Harmonic Compensation in nonsinusoidal systems .

IEEE Transactions on Power Delivery , vol. 8 , No. 1, Jan 1993

٣٥ - الالكترونيات الصناعية ووسائل التحريك الكهربى

د.م. محمد احمد قمر .

٣٦ - المحولات الكهربائية - الجزء الثانى

د. م. :. كاميليا يوسف محمد

٣٧ - المحولات الكهربائية والآلات التيار المستمر .

د.م. : محمد احمد قمر .

- ٣٢٤ -

للمؤلفة :

- ١- المكثفات وتحسين معامل القدرة
- ٢- المحولات الكهربائية - الجزء الأول
- ٣- المحولات الكهربائية - الجزء الثاني
- ٤- الوقاية في الشبكات الكهربائية - الجزء الأول
- ٥- التوافقية في الشبكات الكهربائية
- ٦- جودة التغذية الكهربائية
- ٧- الأضاءة وتوفير الطاقة
- ٨- الوقاية في الشبكات الكهربائية - الجزء الثاني
- ٩- إدارة طلب الطاقة وفرص ترشيد استخدام الطاقة في المنشآت الصناعية والتجارية - الجزء الأول
- ١٠- البيئة - الطاقة وغازات الاحتباس الحرارى
- ١١- إدارة طلب الطاقة - الجزء الثانى .
- ١٢- اضطرابات جودة التغذية الكهربائية .
- ١٣- ارشادات لوسائل التوعية لترشيد استخدام الطاقة .
- ١٤- ٧٥ فرصة لترشيد استخدام الطاقة .
- ١٥- الفقد فى الطاقة الكهربائية .

جميع حقوق الطبع محفوظة للمؤلفة

- ٢٢٥ -

رقم الايداع بدار الكتب القومية

٩٤ / ٥٥١١

I.S.B.N 977 - 5322 - 01 - 4

دار الجامعيين



طباعة الأوفست والتجليد

ت: ٤٨٦٢٠٠٤ - ٠١٢٢٢١٣٧٠٩

« التوافقيات فى الشبكات الكهربائية »

