

أثر التوافقيات الناجمة عن أجهزة تنظيم السرعة (ASD) على مكثفات تعويض الاستطاعة الردية

الدكتور بسام عطية*

الدكتور فؤاد جبل *

بسام موصللي**

(قبل للنشر في 2005/9/13)

□ الملخص □

الهدف من هذه الورقة هو بيان الأثر المتبادل بين المكثفات المركبة بغرض تعويض الاستطاعة الردية في المنشآت الصناعية التي تحوي بقدر معتبر مولدات للتوافقيات خاصةً أجهزة تنظيم السرعة لمحركات AC ومحركات DC . وقد قمنا بإجراء بعض التجارب في مخبر الكترونييات القدرة الكهربائية الخاص بقسم الطاقة الكهربائية بجامعة تشرين.

من المعروف أن المبدلات ثلاثية الأطوار سداسية النبضات - وهي الشائعة في التطبيقات الصناعية - تولد التوافقيات الفردية 5,7,11,13,.. استناداً إلى العلاقة $h=np\pm 1$ حيث إن n يمثل عدداً صحيحاً. ويتضح لنا من التجربة الأولى الشكل النموذجي لموجة الجهد والتيار المشوهين. ومن خلال التجارب اللاحقة يتبين زيادة التشوه الكلي والإفرادي لموجة التيار والتغير الطفيف الذي يطرأ على موجة الجهد. كما قمنا بإجراء قياسات عملية في معمل نسيج اللاذقية الذي تعتبر أحماله من الأحمال اللاخطية بنسب عالية (مركز التحويل المغذي لصالة الأنوال) .

* أستاذ مساعد في قسم الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سوريا.
** طالب ماجستير في قسم الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سوريا.

Effect of Harmonics Generated by Adjustable Speed Drives (ASD) on Reactive Power Compensation Capacitors

Dr. Bassam Ateiah *
Dr. Fowad Jabal *
Basam Mouselli **

(Accepted 13/9/2005)

□ ABSTRACT □

This paper aims to show the mutual effect between reactive power compensation capacitors in industrial plants that contain harmonic generators especially Adjustable Speed Drives (ASD) for AC and DC motors.

Experiments are done in electrical power electronics laboratory- Tishreen University.

It is known that three phase six pulse converters – witch are most used in industrial applications generate odd harmonics such as 5,7,11,13,... upon

The formula $h=np\pm 1$ where n is an integer number.

First experiment shows the usual form for the distorted current and voltage wave. Following experiments show actual increased distortion and small variation on voltage waveform.

We also did some measurements in Lattakia textile factory .where most loads fed by ASD

* Associate Professor – Department Of Electric Power Engineering - Faculty Of Electrical And Mechanical Engineering - Tishreen University- Lattakia –Syria.

**Master Student - Department Of Electric Power Engineering - Faculty Of Electrical And Mechanical Engineering - Tishreen University- Lattakia –Syria.

مقدمة:

تركز الاهتمام في السنين الأخيرة في الجمهورية العربية السورية على الأحمال غير الخطية بسبب انتشارها الواسع وما تحمله من آثار سلبية على الشبكة والمستهلكين. وقد حظيت أجهزة التحكم بالسرعة {Adjustable Speed Drive (ASD)} باهتمام خاص لما لها من ميزات فنية واقتصادية عالية في مجال الأتمتة والتحكم الصناعي، لكنها تعتبر بالوقت نفسه من المصادر الأساسية للتوافقيات التي تعمل بعامل استطاعة منخفض. تم في هذا البحث دراسة العلاقة المتبادلة بين التوافقيات الناشئة عن أجهزة ASD عند العمل مع مكثفات تعويض الاستطاعة الردية وفق أسس هندسية نظرية وعملية في الحالات الآتية:

الحالة الأولى:

تم إجراء مخبرية (مع تحليل النتائج) في مخبر الكترونييات القدرة الكهربائية (كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة تشرين وقد تضمنت التجارب ما يلي:

- 1- رصد تشوه موجتي التيار والجهد في حال تشغيل محرك DC مغذى عبر مبدلة ثابستورية ثلاثية الأطوار.
- 2- تكرار التجربة في وصل مكثفات موصولة مثلثياً على التفرع على مخرج المبدلة وقيم مختلفة.

الحالة الثانية:

تم إجراء قياسات عملية (مع تحليل النتائج) في معمل نسيج اللاذقية الذي تعتبر أحماله من الأحمال اللاخطية بنسب عالية (مركز التحويل المغذي لصالة الأتوال).

مفاهيم أساسية:

- عامل الاستطاعة من أجل موجة الجهد الجيبية الصافية:

$$PF = \frac{P}{S} \quad (1)$$

- عامل الاستطاعة من أجل موجة الجهد الجيبية وموجة تيار لا جيبية:

$$PF = \frac{V_{rms} I_{1,rms} \cos \varphi}{V_{rms} I_{rms}} = \frac{I_{1,rms}}{I_{rms}} \cos \varphi = K_p \cos \varphi \quad (2)$$

حيث:

$$K_p = I_{1,rms} / I_{rms} , K_p \in [0, 1] \quad (3)$$

تمثل المحتوى التوافقي للتيار نسبة للمركبة الأساسية.

- التشوه التوافقي الكلي للتيار (THDI):

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{n,rms}^2}}{I_{1,rms}} \quad (4)$$

وتكون العلاقة بين المؤشرين السابقين:

$$K_p = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \quad (5)$$

وبالتعريف السابق للتشوه التوافقي الكلي للتيار نفسه نحصل على التشوه التوافقي الكلي للجهد (THDV) [1].

الأثر المتبادل بين التوافقيات وعامل الاستطاعة:

يتضح من العلاقة (5) أن زيادة محتوى التوافقيات يسبب انخفاض عامل الاستطاعة. وبذلك فإن أجهزة ASD تسهم في زيادة تخفيض عامل الاستطاعة المنخفض أصلاً في المنشآت الصناعية بسبب استخدام الأحمال التحريضية وأجهزة التحكم بالسرعة (الأجهزة الإلكترونية الصناعية). كما أن التوافقيات لا يعبر عنها بـ KW وهذا الذي يجعل التوافقيات تسهم في تخفيض TPF (عامل الاستطاعة الكلي)، وهو يمثل مجموع عامل التشوه وعامل الاستطاعة الإزاحة الذي يمثل نسبة الاستطاعة الفعالة إلى الاستطاعة الظاهرية، حيث يكون التيار المستجر مشوهاً. في النظام الكهربائي تكون التيارات التوافقية الناتجة بسبب الأحمال اللاخطية سبباً في جعل TPF منخفضاً (0.6 - 0.7)، بينما يكون DPF (عامل استطاعة الإزاحة) - وهو يمثل نسبة تيار العمل المفيد إلى نسبة التيار الكلي الساري في الخط (الحالة الجيبية) - عالياً نسبياً (0.9 - 0.95).

الأثر المتبادل بين التوافقيات والمكثفات:

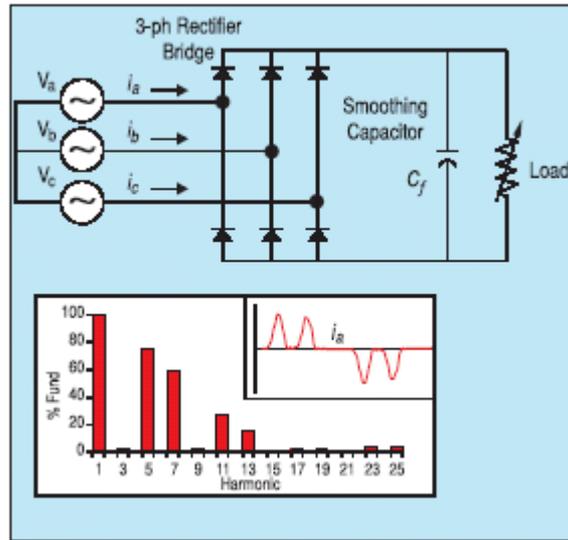
إن المكثفات يمكن أن تقاوم مقدراً معيناً من التوافقيات حيث إنها تصمم لتحتمل 1.3 من التيار الاسمي المار فيها. لكنها يمكن أن تتفاعل بشكل حاد مع الأحمال اللاخطية. والنتيجة هي تكبير تشوه التيار والجهد عند العمل بحدود الطنين أو بالقرب منه. تحصل هذه الحالة عندما ممانعة المنبع الكهربائي (التحريضية) مساوية لممانعة مجموعة المكثفات (السعوية) عند التردد الذي يحدث عنده الطنين. وهذا ما يسبب جهوداً كبيرة على المكثفات عند ذلك التردد، ومرور تيارات كبيرة في المكثفات ومرور تيارات كبيرة فيه [4]. يعطى تردد الطنين بالعلاقة:

$$h = \sqrt{\frac{KVA_{sc}}{KVAR}} \quad (6)$$

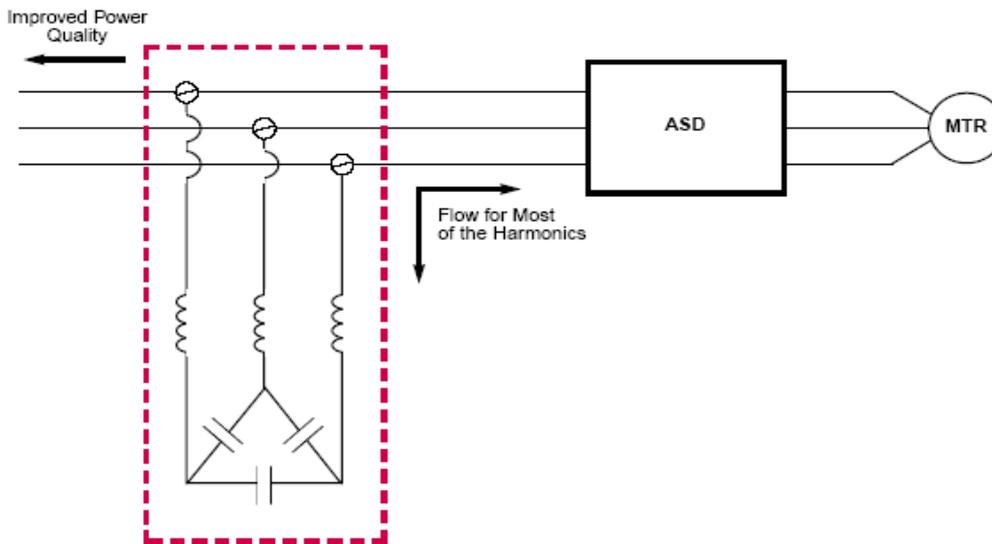
حيث: h : التردد الذي يحدث عنده الطنين.
 KVA_{sc} : استطاعة الدارة القصيرة عند المكثف.
 $KVAR$: استطاعة المكثفات الداخلة بالخدمة.

إن المؤشر القوي على وجود التوافقيات عند مجموعة المكثفات هو زيادة عدد المكثفات المنفجرة (الخارجة عن الخدمة)، ونتيجة لذلك سوف يزاح تردد الطنين التفرعي إلى تردد جديد أكثر خطراً من الحالة الأولى. لذلك يمكننا القول إن تحديد سعة المكثفات ومراحلها (قيمة وعدداً) ومراكز توضعها يجب أن يتم وفق أسس هندسية دقيقة [2]. لتحاكي تلك السلبيات فإنه من المعتاد عملياً توليف المكثف مع مفاعلات توصل تسلسلياً عند توافقيات مزاحة عن التوافقيات الخطرة، وعلى سبيل المثال في حال كون التوافقية الخامسة هي الأكثر خطراً فإننا نقوم بالتوليف على التوافقية (4.7).

كذلك تركيب مفاعلات تسلسلية مع خط القدرة قبل أجهزة ASD كإحدى وسائل تخفيف التوافقيات. والشكلين (1) و (2) يوضحان ذلك:



الشكل (1) مبدلة 6 نبضات نموذجية



الشكل (2) مرشح توافقيات غير فعال

ملاحظة: ترشح التوافقيات إلى الحدود التي نص عليها المعيار IEEE 519 1992 مثلاً والمبين بالجدول (1):

الجدول (1)

I_{sc}/I_L	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

من المعلوم أن ممانعة المنبع تسبب هبوطاً في الجهد بسبب التيارات السارية في النظام مما يجعل مركبات التيار ذات التردد الأعلى تسبب تشوهاً أكبر في موجة الجهد. ومن جهة أخرى فإن ممانعة المكثفات تنقص بزيادة التردد. وبناءً عليه فإنه:

1- عند الترددات المنخفضة أقل من 1 KHz فإن ممانعة نظام القدرة تتحدد بالممانعة التحريضية للمحولات وخطوط النقل.

2- عند الترددات العليا 1-1.5 KHz فإن ممانعة نظام القدرة تتحدد بالممانعة السعوية لمكثفات تحسين عامل الاستطاعة.

3- هناك مجال متوسط يعطي فيه التأثير المشترك للممانعتين التحريضية والسعوية ممانعة عالية جداً ، بحيث إن تيارات صغيرة جداً تسري ضمن هذه الممانعات تسبب جهداً توافقية عالية جداً. وهو ما يسمى بحالة الطنين. وعلى العموم يمكن إجراء التقسيمات الآتية:

- 1- التوافقيات موجودة لكنها ليست ذات مطال كاف بحيث يجب اتخاذ إجراءات خاصة.
- 2- التوافقيات موجودة في النظام لكنها تسبب مشاكل فقط في حال حصول حالة طنين أو بالقرب منه .
- 3- مطال التوافقيات كبير جداً بحيث يسبب مشاكل للمكثفات وللتجهيزات الكهربائية .

المشاكل التي تسببها التوافقيات (خصوصاً 5,7,11,13) [5]:

- 1- انهيار مكثفات تحسين عامل الاستطاعة.
- 2- تسخين النواقل والمحولات (ضياعات حرارية وردية).
- 3- تقادم العازلية الكهربائية .
- 4- خطأ في عملية التشغيل الصحيح لأجهزة قيادة محركات AC ومحركات DC .

القياسات والاستنتاجات:

الحالة الأولى: (تجارب مخبرية أجريت في كلية الهندسة - جامعة تشرين)
أجريت التجارب على محرك DC له المواصفات الآتية:

استطاعة دخل المحرك $W_{out}=175$ W ، استطاعة خرج المحرك $W_{out}=110$ W

توتر الثابت $V_s=220$ Vdc ، توتر التهيج $V_f=200$ Vdc

سرعة المحرك عند الحمل الأعظمية = 1500 r/min

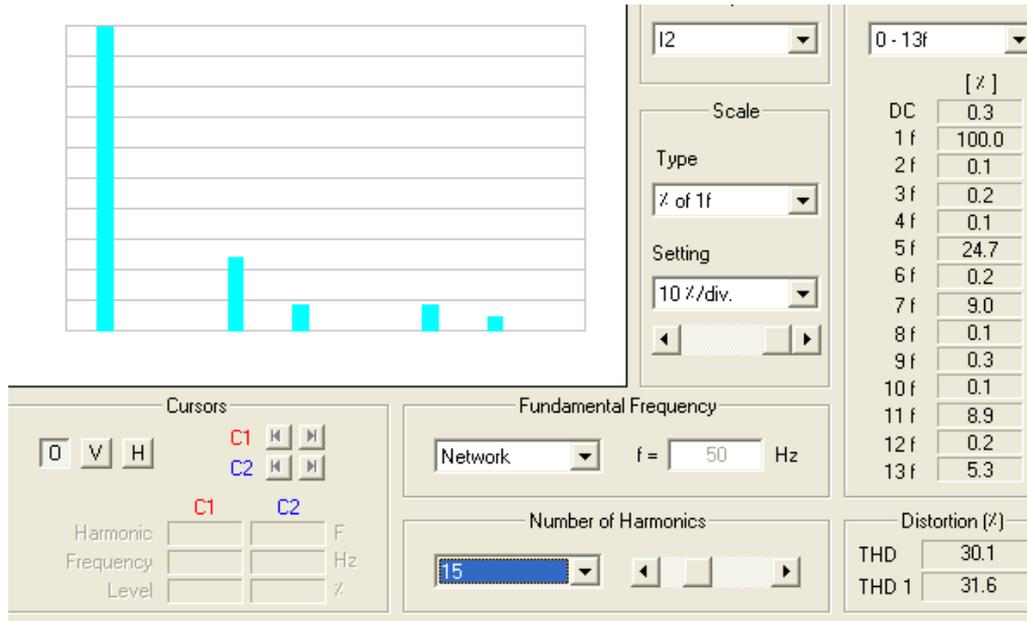
التيار الأعظمي للمحرك $I_{max m} = 1.3 A$ ، التيار الأعظمي للمولد $I_{max g} = 0.5 A$
 المحرك مغذى عن طريق مبدلة ثايرستورية عند زاوية قرح مقدارها 75 درجة .

جهد الطور = 67 V ، جهد الخط = 116 V

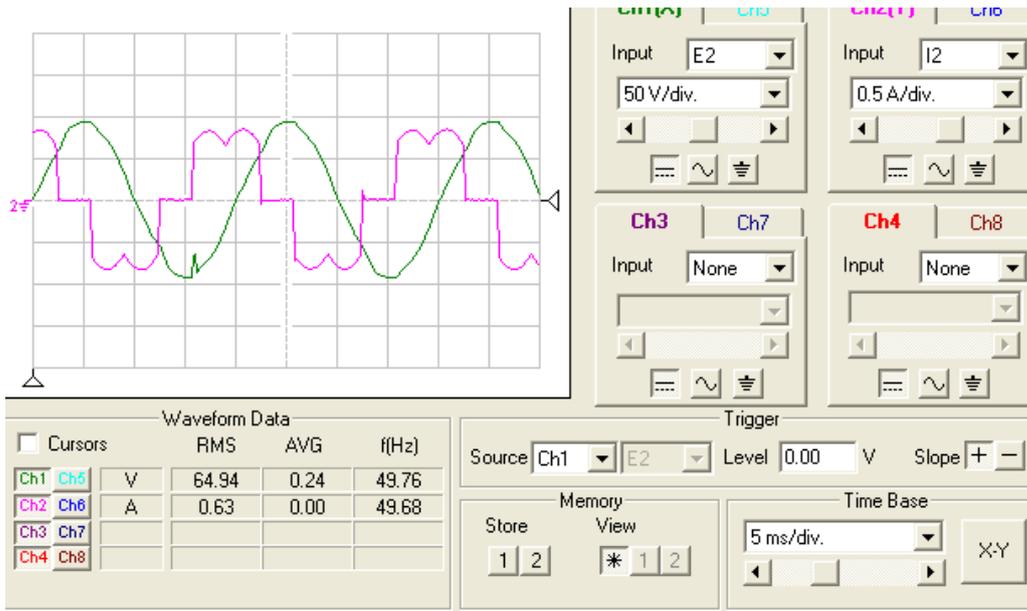
أ - القياسات:

أخذت القياسات في الحالات التالية:

1- بدون تركيب مكثفات تعويض استطاعة ردية .

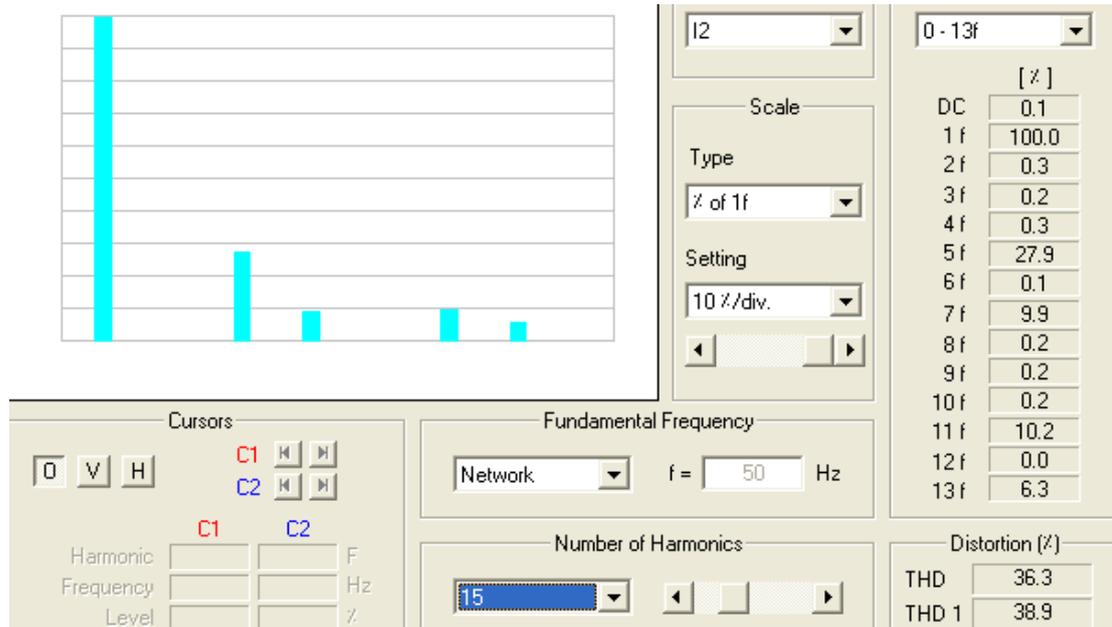


(الشكل 3) توافقيات التيار

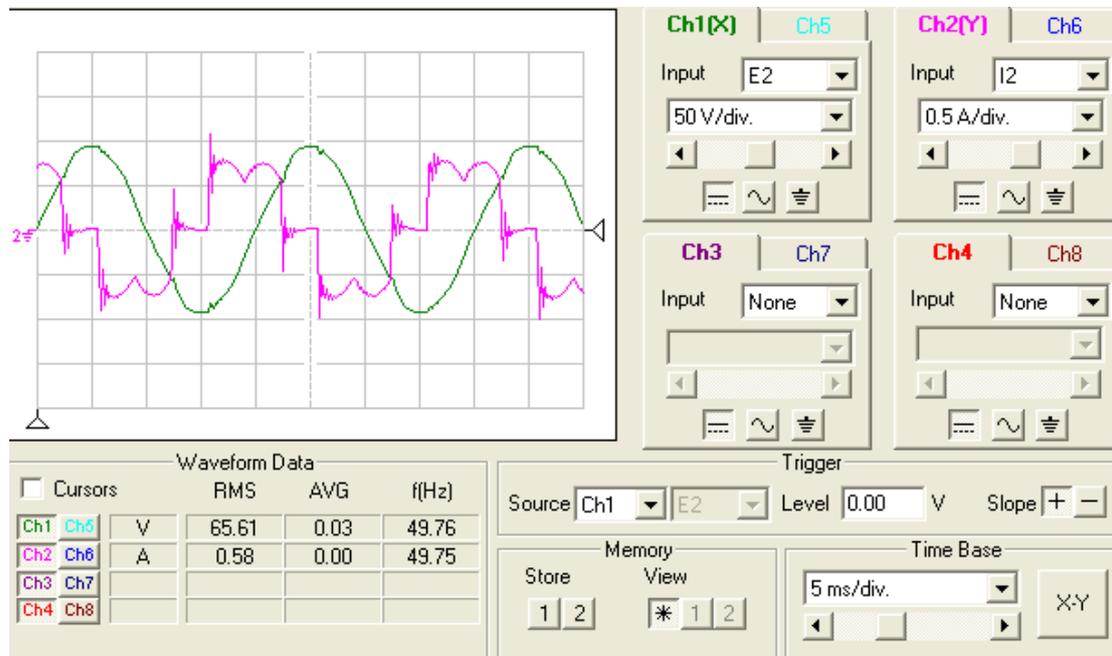


(الشكل 4) موجتي الجهد والتيار

2 - استخدمت ثلاث مكثفات مبربوطة مثلثياً قيمة الواحدة $0.72 \mu F$ (الشكلين 5 و6):

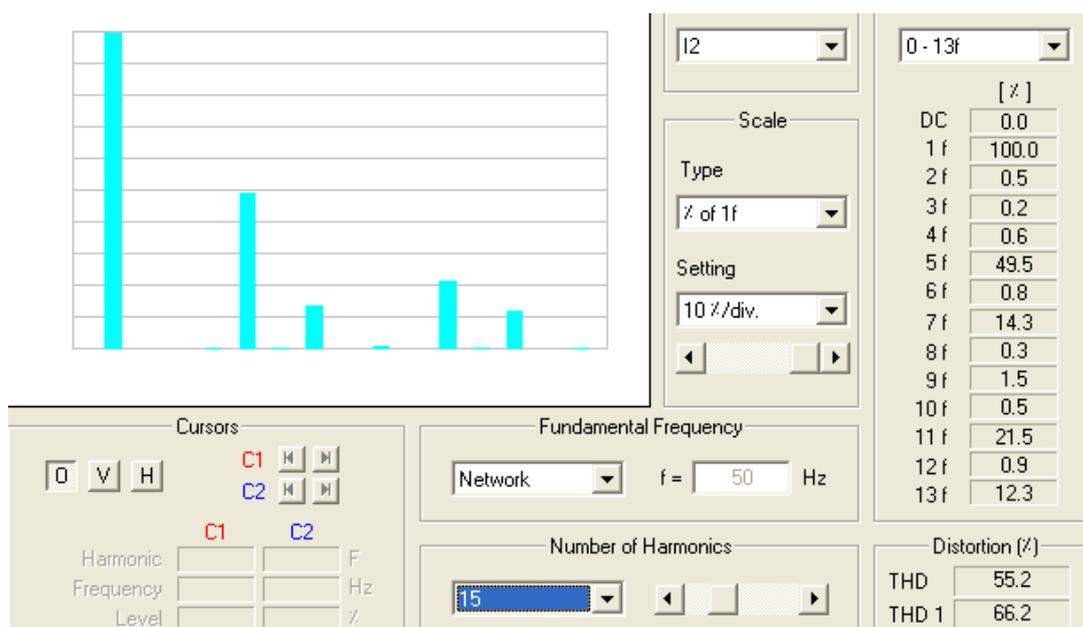


(الشكل 5) توافقيات التيار

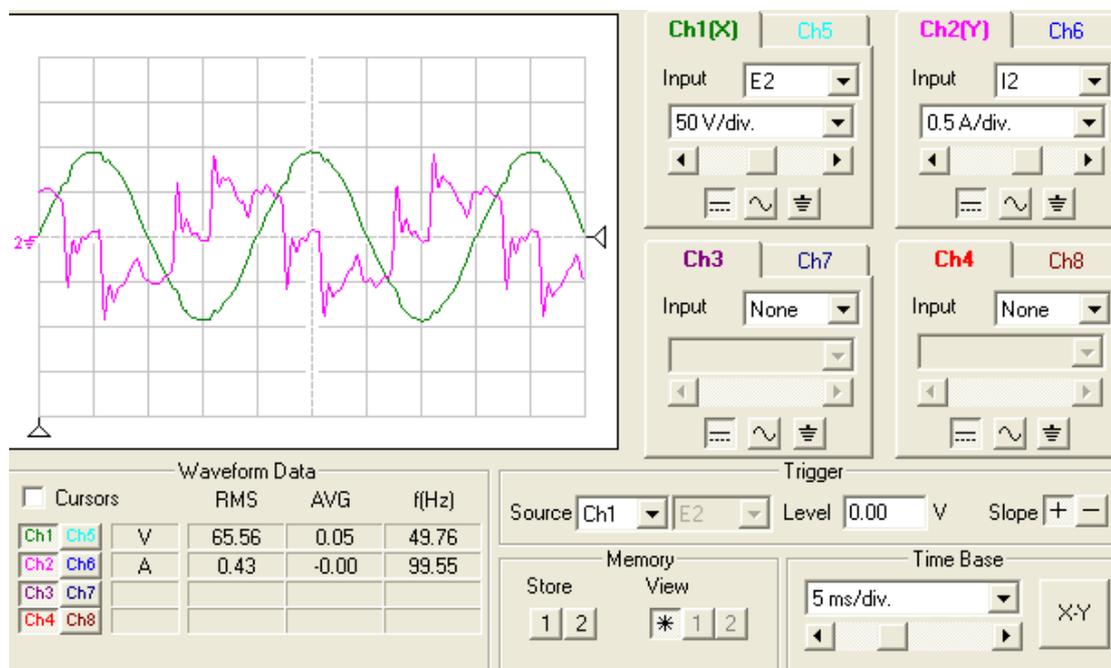


(الشكل 6) موجتي الجهد والتيار

3 - استخدمت ثلاث مكثفات مربوطة مثلثياً قيمة الواحدة $3.61\mu\text{F}$:



(الشكل 7) توافقيات التيار



(الشكل 8) موجتي الجهد والتيار

ب- الاستنتاجات:

- 1- ظهور التوافقيات الفردية ما عدا الثالثة ومضاعفاتها أي ظهور التوافقيات الخامسة والسابعة والحادية عشرة إلخ بقيم معتبرة ، ولم تظهر التوافقية الثالثة ومضاعفاتها بسبب كون المبدلة ثلاثية الطور متزنة.
- 2- عند عدم وجود مكثفات (دون تعويض للاستطاعة الرديئة) نلاحظ التشوه النموذجي لموجة التيار THD=30% بسبب أجهزة (ASD) وتشوه بسيط لموجة الجهد (انظر الشكلين 3 و 4) .
- 3- عند تركيب مكثفات التعويض ينخفض مطال التيار المستجر (rms=0.58 A) ويظهر التشوه غير النموذجي للتيار THD=36% ، خاصة عند لحظات القرح ويظهر تشوه بسيط في موجة الجهد (انظر الشكلين 5 و 6) .
- 4- بزيادة قيمة المكثفات المركبة (زيادة التعويض) ينخفض مطال التيار المستجر (rms= 0.43A) ويزداد التشوه بشكل أدى إلى ظهور ثلاث قمم تقريباً في موجة التيار THD=55.2% وأصبح تشوه موجة الجهد واضحاً أيضاً (انظر الشكلين 7 و 8) حيث نلاحظ أن مطال القمة الأكبر يبلغ حالي 110% من مطال الموجة المشوهة من دون تركيب مكثفات .
- 5- ازدياد مقدار التشوه بانخفاض رتبة التوافقية الخطرة.

الحالة الثانية: (قياسات أجريت في معمل نسيج اللاذقية)

مكثفات تعويض الاستطاعة الرديئة: كانت مجموعات التعويض في المراكز متماثلة وهي تتألف من أربع مراحل. مواصفات مرحلة التعويض:

$$C = 265 \times 3 \mu F ; \quad U = 400 V \quad \Delta \text{ connection}$$

65 C° Temperature Degree ; 1977 Date Of Manufacture

نظام الحماية والتحكم في مرحلة التعويض:

- فيوزات على الأطوار الثلاثة للمرحلة الواحدة بتيار 100 A .
- كونتاكتورات ثلاثية الطور لكل مرحلة بتيار 125 A و جهد 380 V .
- الاستطاعة الرديئة لمجموعة التعويض

$$Q = Q_{\phi} \times 4 = 160 \text{ KVAr}$$

- جهد التحمل 1700 V

القياسات والحسابات:

تم من نتائج القياسات العملية تحديد نسب تيارات التوافقيات العليا لشبكة التغذية ومكثفات التعويض وللورديات الثلاث، والجدول الآتي يبين نتائج الحسابات في لحظات زمنية محددة لكل وردية (الجدول 2).

الجدول(2) يبين نتائج الحسابات في لحظات زمنية محددة لكل وردية:

الوردية الثالثة		الوردية الثانية		الوردية الأولى		رتبة التوافقية
9/2/2004 (2.55)		9/2/2004 (17.45)		10/2/2004 (7.30)		
تيار المكثف Ic	تيار الشبكة Is	تيار المكثف Ic	تيار الشبكة Is	تيار المكثف Ic	تيار الشبكة Is	
69.3	561.2	62.9	791.5	61.8	755.8	1
15.5%	26.41%	15.4%	19.24%	14.11%	16.38%	5
19.82%	15.88%	25.81%	13.76%	24.59%	12.53%	7
14.38%	4.71%	15.93%	5.61%	12.22%	4.2%	11

24%	5.1%	2.13%	0.4%	1.4%	0.8%	13
30.8%	4.6%	6.57%	0.6%	5.45%	0.7%	17
26.8%	2.7%	2.5%	0.1%	1.87%	0.1%	19
11.72%	0.9%	5.11%	0.2%	3.12%	0.2%	23
5.9%	0.3%	2.8%	0%	4%	0%	25

- تحديد رتبة التوافقيات الخطرة (K) على النظام:

إن خطر تشغيل مكثفات التعويض يتمثل بحالات الطنين بين سعة مكثف التعويض ومحارضة شبكة التغذية والذي يؤدي إلى انتفاخ المكثفات وانفجارها 0

تحدد حالات الطنين هذه حسب قيمة المكثفات C (عدد المراحل الداخلة) في التعويض ومحارضة شبكة التغذية

. L

إن أكثر الحالات خطورة تكون عند حدوث الطنين على رتبة توافقية منخفضة (K=5-7-11) وذلك نظراً لأن قيم تيارات هذه التوافقيات تكون عادة أكبر من التيارات ذات الرتب العالية .

تحدد رتبة توافقية الطنين K_R من العلاقة الآتية:

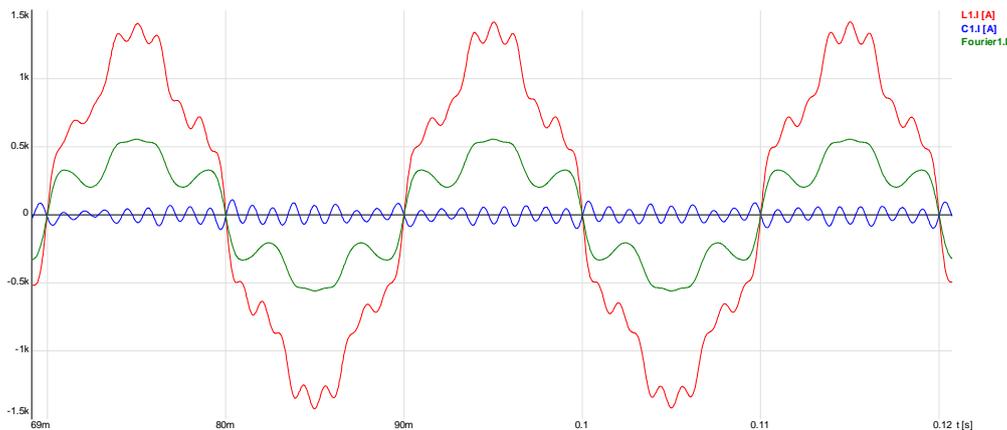
$$K_R = \frac{1}{\omega \sqrt{L \cdot C}}$$

وسوف نحدد فيما يلي K_R للورديات الثلاث وبدخول كل مرحلة من المراحل الأربع لمكثفات التعويض:

أ- حالة دخول مرحلة واحدة للتعويض:

الوردية الأولى	الوردية الثانية	الوردية الثالثة
KR=21.2	KR=19.99	KR=18.17

بذلك تكون رتب التوافقيات الخطرة لهذه الحالة ($K_R=17-19-21$) 0

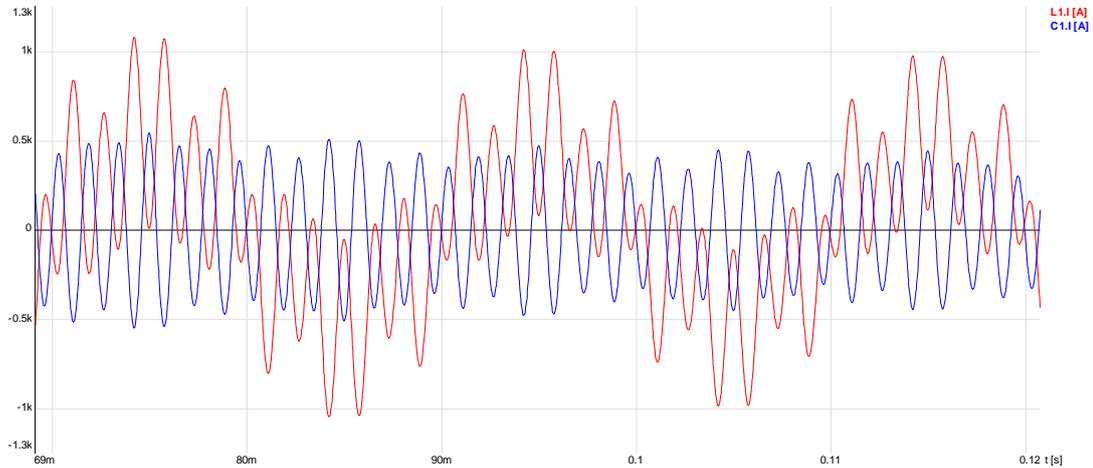


الشكل (9)

ب- حالة دخول مرحلتين للتعويض :

الوردية الأولى	الوردية الثانية	الوردية الثالثة
KR=15	KR=13.9	KR=12.8

بذلك تكون رتب التوافقيات الخطرة لهذه الحالة هي التوافقيات الحادية عشرة والثالثة عشرة.

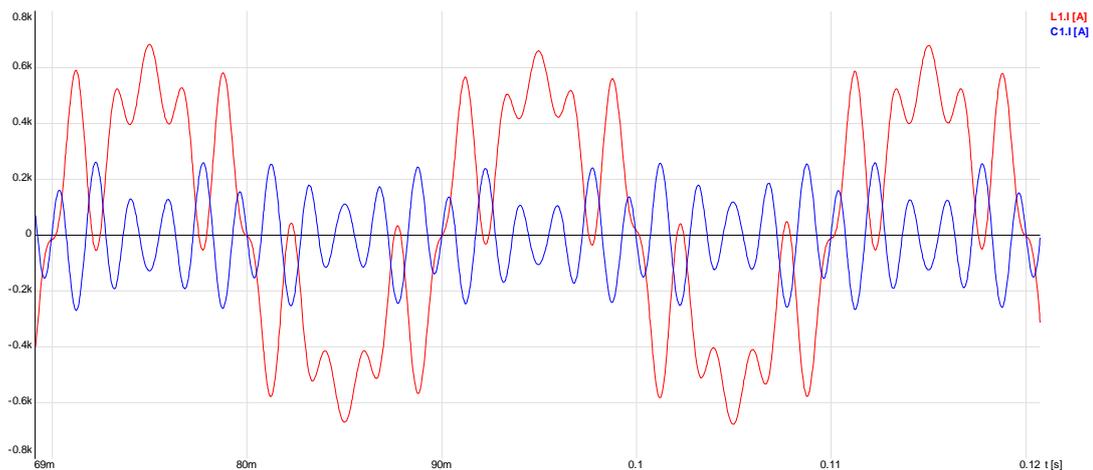


الشكل (10)

ج- حالة دخول ثلاث مراحل للتعويض:

الوردية الأولى	الوردية الثانية	الوردية الثالثة
KR=12.9	KR=11.35	KR=10.5

بذلك تكون رتب التوافقيات الخطرة لهذه الحالة هي التاسعة والحادية عشرة.

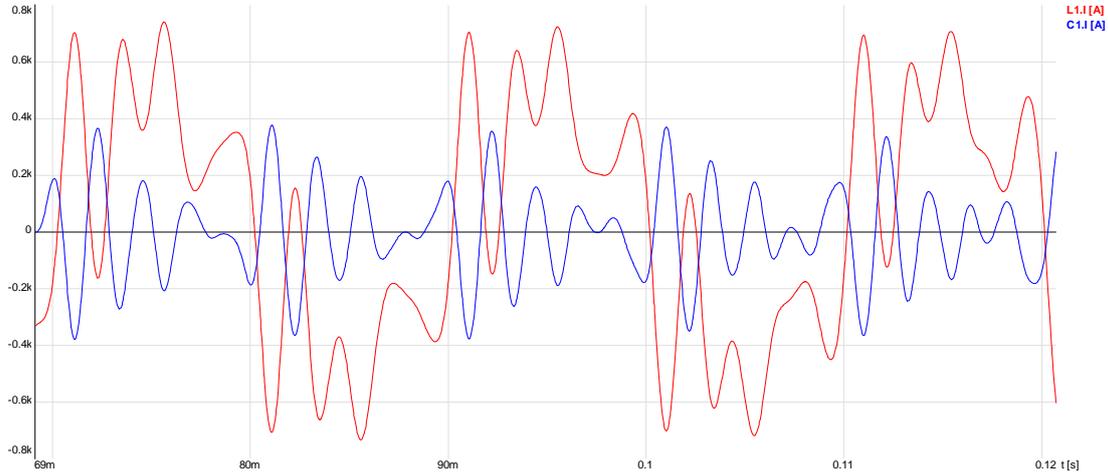


الشكل (11)

د- حالة دخول أربع مراحل للتعويض :

الوردية الأولى	الوردية الثانية	الوردية الثالثة
KR=10.6	KR=9.83	KR=9

بذلك تكون رتب التوافقيات الخطرة لهذه الحالة هي السابعة والتاسعة والحادية عشرة.



الشكل (12)

الاستنتاجات:

- 1- عند التعويض بعامل استطاعة بحدود (0.9-094) تتوزع تيارات التوافقيات العليا حسب رتبها كما يلي :
 - تتجه تيارات الرتب الدنيا للتوافقيات (5-7) بنسب عالية باتجاه الشبكة وفق العلاقة $ISH \gg ICH$
 - تتجه تيارات الرتب العليا للتوافقيات (11-13-17-21-23-25) بنسب عالية باتجاه مكثفات التعويض وفق العلاقة: $ISH \ll ICH$
- 2- عند التعويض الزائد (العمل على عامل استطاعة قريب من الواحد ± 0.98) نلاحظ بأن توزع التيارات بين الشبكة والمكثفات يقترب من التوازن (حالة العمل على نظام الطنين او بالقرب منه) .
- 3 - بزيادة استطاعة التعويض تزداد خطورة عطب وانفجار المكثفات 0
- 4- في الوردية الثالثة تكون تيارات التوافقيات العليا في المكثفات أعلى مايمكن مقارنة بتيارات الورديات الأخرى، وهذا ناجم عن تأثير تشغيل أجهزة الإنارة الفلوريسانتيبة في الوردية الثالثة .

المراجع:

- 1- APPLICATION GUIDE FOR SOLVING HARMONIC DISTORTION MYRON ZUER - www.myronzuckerinc.com -INTERNET 2005
- 2- HARMONICS AND HOW THEY RELATE TO POWER FACTOR ROBER J. GILLESKE & W.MACK GRADY –
- 3- GETTING HANDLE ON HARMONICS RICK HODELY-8/17/2001 INTERNET 2005
- 4- TECHNICAL NOTE No3 UNIVERSITY OF WOLLONGONG- INTERNET 2005
- 5 – الكترونييات القدرة الكهربائيه د.م بسام عطية – د.م حبيب شيخوك – د.م شفيق باصيل. منشورات جامعة تشرين – 2000
- 6- مخبر الكترونييات القدرة الكهربائيه. جامعة تشرين – 2005