كفاءة وجودة الطاقة الكهربائية في المنشآت الصناعية

الدكتور حسان السويدان[1]

الملخص

يركز البحث على مسألتين أساسيتين وهما رفع كفاءة الطاقة الكهربائية في المنشآت الصناعية بهدف تخفيض كمية الطاقة اللازمة لوحدة المنتج دون التأثير في مستوى الإنتاج. ولتحقيق هذا الهدف يجب تشغيل نظام الإنارة ضمن شروط محددة، وإدخال تجهيزات عامل الاستطاعة وتخفيض ضياعات الطاقة الكهربائية في محولات التغذية الكهربائية.

والمسألة الثانية هي جودة التغذية الكهربائية في هذه المنشآت ومصادر الاضطرابات مثل انحراف واهتزاز التوتر والتردد وكذلك التوافقيات، فضلاً عن أوجه المعالجة لتلك الاضطرابات.

تم في سياق البحث تقديم تحليل كفاءة وجودة الطاقة الكهربائية لإحدى الشركات النسيجية، وقد أظهرت نتائج البحث أنه يمكن التوفير في فاتورة الكهرباء وزيادة وثوقية الشبكة الكهربائية المغذية في آن معاً من خلال اتخاذ بعض الإجراءات التقنية في مثل هذه المنشآت.

[1] قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة دمشق.

1- مقدمة:

تعد الطاقة الكهربائية إحدى دعائم تحقيق برامج التنمية الاقتصادية والاجتماعية في جميع البلدان متطورة كانت أم نامية، ومن المعروف أن التوجه الأساسي في المنشآت الصناعية هو زيادة الإنتاج بصورة رئيسية لذلك كان من الصعب التفكير بكلفة الطاقة الكهربائية المستخدمة في العملية الإنتاجية خاصة وأنه لا تزال الطاقة الكهربائية في بلادنا مدعومة من قبل الدولة، ولذلك فإن موضوع دراسة كفاءة الطاقة لم يكن حتى وقت قريب من أولويات المنشآت الصناعية.

مع تزايد كلفة فاتورة الطاقة الكهربائية للمنشآت الصناعية تصاعد الوعي والتفكير في كفاءة هذه الطاقة لدى إدارات هذه المنشآت ولاسيما تلك التابعة للقطاع الخاص. وقد أصبحت البحوث المتعلقة بهذا المجال من الأنشطة الحديثة في المنشآت الصناعية التي تهدف إلى تخفيض الاستهلاك دون التأثير في المستوى الإنتاجي داخل المصانع.

إن عمل التجهيزات الكهربائية بصورة طبيعية في المنشآت الصناعية يتعلق بجودة الطاقة الكهربائية، وقد أصبحت جودة الطاقة الكهربائية في المنشآت الصناعية تأخذ حيزاً مهماً من الاهتمام نظراً لتأثيرها في كلفة الطاقة ووثوقية شبكات التغذية والعملية الإنتاجية ككل. لذلك أصبح من الأهمية بمكان أن تقوم هذه المنشآت بدراسة خصائص التغذية الكهربائية لمختلف أقسام المنشأة وذلك عن طريق إجراء قياسات وجمع البيانات والمعلومات عن مختلف الأحمال في كل قسم، وتحديد قيم الاضطرابات على شبكات التغذية ومقارنتها مع الحدود المسموحة وفقاً للنظم القياسية.

يقدم هذا البحث تحليلاً لبعض جوانب إدارة الطاقة الكهربائية المستهلكة في المنشأة الصناعية وزيادة كفاءتها في بعض المجالات مثل نظام الإنارة، وتحسين عامل الاستطاعة، وضياعات المحولات.

كما تم في البحث دراسة نوعية الطاقة الكهربائية المستهلكة في المنشـأة الصـناعية ومراقبة جودتها من خلال دراسة الاضطرابات التي تتعـرض لهـا مثـل انحـراف واهتزاز التوتر، انحراف واهتزاز التردد فضلاً عن التوافقيات.

تم في سياق هذا العمل تطبيق الدراسة على المنظومة الكهربائية للشـركة الخماسـية للغزل والنسيج وتحليل كفاءة الطاقة الكهربائية في الأقسام المختلفة من الشركة ونوعية وجودة هذه الطاقة وتقديم بعض الاقتراحات التي تسهم في تحسـين كفـاءة ونوعيـة الطاقة الكهربائية المستهلكة في هذه الشركة[8].

2- نظام الإنارة:

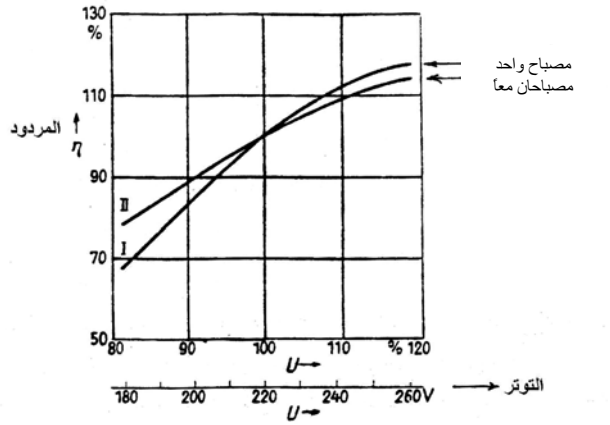
يقدم نظام الإنارة فرصاً عديدة لتوفير الطاقة الكهربائية، وفي كثير من الحالات يمكن تحسين الإنارة وتخفيض كلفة التشغيل في آنٍ معاً مما يشكل استثماراً جيداً في المنشآت الصناعية.

تشكل الطاقة الكهربائية المستهلكة في نظام الإنارة ما نسبته %(5-25) مـن الطاقـة الكهربائية المستهلكة في المؤسسة الصناعية، ويمكن إدخال تحسينات على نظام الإنارة والحصول على وفر لا بأس به في الطاقة الكهربائية المستهلكة في هذا النظـام مـن خلال بعض الإجراءات السهلة التي نستعرضها فيما يأتي مع التأكيد علـى ضـرورة تحقيق سويات الإنارة المنصـوص عليهـا مـن قبـل الهيئـة الهندسـية للإنـارة (Illumination Engineering Society IES) وذلك لضمان إنتاجية العمال والسـلامة العامة للأشخاص والمعدات.

يتكون نظام الإنارة من المنابع الضوئية (المصابيح)، وأجهـزة الإنـارة، والملفـات الخانقة. وتؤثر كل من هذه المركبات في الأداء وكلفة التشغيل السنوية لنظام الإنارة.

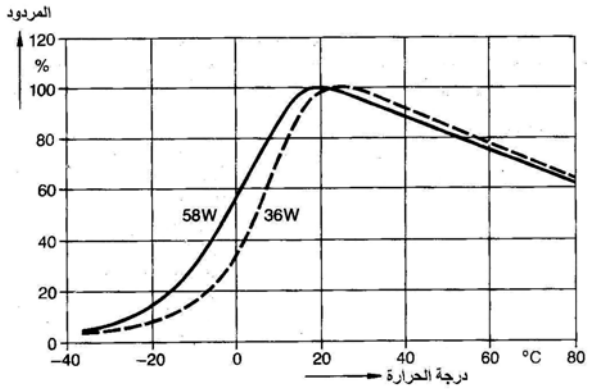
تشكل مصابيح الفلوريسانت الجزء الأعظم من مصابيح الإنارة في المنشآت الصناعية نظراً لارتفاع مردودها الضوئي مقارنة مع المصابيح المتوهجة (قرابة ثلاثة أمثـال) وانخفاض مستوى الإبهار والحرارة.

يقدر العمر الطبيعي لمصباح الفلوريسانت بـ 7500 (ساعة)، ويـنخفض مـردودة بمقدار %(15-20) بعد 4000 ساعة عمل. يسبب انخفـاض التـوتر المطبـق علـى المصابيح صعوبات في بداية التشغيل وفي أثنائه، كما أن ارتفاع التوتر يسبب انهيـار المصابيح، ويبين الشكل (1) تغير مردود مصباح الفلوريسانت مع تغير التوتر.



الشكل (1) تغيير مردود مصباح الفلوريسانت مع تغير التوتر[1]

فيما يتعلق بدرجة حرارة العمل فإن أفضل مردود للمصباح عند درجة حرارة تشغيل 20-25C°، ويوضح الشكل (2) العلاقة بين درجة الحرارة والمردود، ويلاحظ من هذا الشكل انخفاض المردود عند درجات الحرارة المنخفضة لذلك يجب الانتباه إلى درجة الحرارة الداخلية صيفاً وشتاء عند استخدام أنظمة التكييف.



الشكل (2) تأثير درجة الحرارة في مردود مصابيح الفلوريسانت[2]

استبدال المصابيح:

إن الطريقة المعتمدة في كثير من المنشآت هو الانتظار حتى تلف المصباح ثم استبداله، وهذه الاستراتيجية ليست بالضرورة هي الفضلى، إذْ إنّها لا تأخذ بالحسبان عوامل مختلفة مثل كلفة اليد العاملة وانخفاض الفيض الضوئي بزيادة ساعات العمل كما هو مبين في الشكل (3). وقد بينت التجارب أن استبدال جميع المصابيح دفعة واحدة في المنشأة بعد انتهاء عمرها الاستثماري هو أكثر اقتصادية من الطريقة السابقة لأنها تتمتع بالمزايا الآتية:

1- تخفيض كلفة اليد العاملة.

2- تخفيض كلفة المصابيح : لأن شراء مجموعة مصابيح دائماً أقل كلفة من شراء مصابيح على دفعات متعددة.

3- جدولة صيانة المصابيح.

4- المحافظة على سويات إنارة منتظمة.

5- عدم الحاجة لتخزين المصابيح في المنشأة.

6- زيادة عمر الملف الخانق ذلك أن عمل الملف مع المصباح المتقادم يضعف فعاليته.

7- تقليص عدد التوقفات في منطقة العمل إذْ إن استبدال المصابيح بالمجموع يؤدي إلى تجنب الاستبدال غير المخطط له مسبقاً.

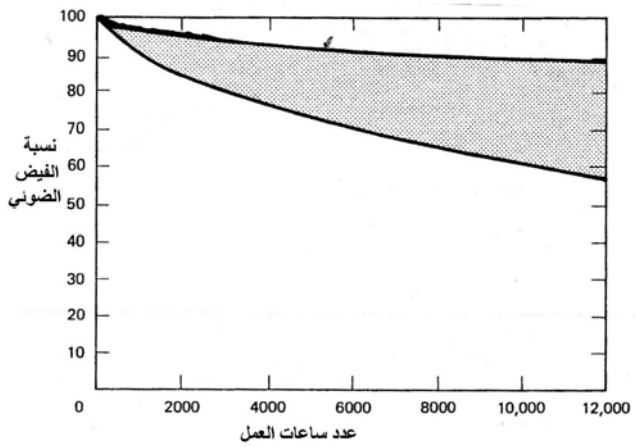
أما استبدال المصابيح موضعياً فيؤدي إلى انخفاض مردود الإضاءة العام في المنشـأة نتيجة لانخفاض مردود كل مصباح مع زيادة ساعات التشغيل.

وتحسب كلفة الاستبدال الموضعي من العلاقة الآتية [1]:

$$C = L + S \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

وكلفة الاستبدال الإجمالي من العلاقة :

$$C = \frac{L+G}{I} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$



الشكل (3) علاقة الفيض الضوئي لمصباح الفلوريسانت مع عدد ساعات العمل[1]

حيث:

C: كلفة الاستبدال الكلية للمصباح الواحد.

L: ثمن المصباح.

S: كلفة اليد العاملة لاستبدال المصباح الواحد في حالة الاستبدال الموضعي.

G: كلفة اليد العاملة لاستبدال المصباح الواحد في حالة الاستبدال الإجمالي.

I: المدة الزمنية الفاصلة بين استبدال إجمالي وآخر (كنسبة مئوية من عمر المصباح).

سنقوم الآن استناداً إلى ما تقدم بحساب كلفة استبدال المصابيح في الشركة الخماسية في الحالة الموضعية والحالة الإجمالية على أساس أن الوقت اللازم لاستبدال المصباح في الحالة الموضعية هو 15 دقيقة، وهو الزمن اللازم للعامل للقدوم إلى المكان المقصود وإحضار العدة والأدوات اللازمة ووسيلة الرفع للوصول إلى جهاز الإنارة وفكه واستبدال المصباح فيه، في حين الزمن اللازم لاستبدال المصابيح في الحالة الإجمالية وعلى صفوف متتابعة هو 3 دقائق، ومعلوم أن كلفة المصباح الواحد 2×36 واطاً في السوق المحلية هو بحدود 110 ليرة سورية. وعلى فرض أن كلفة الساعة الواحدة للفني الذي سيقوم بعملية الاستبدال هي 250 ليرة سورية، بالحساب نحصل على:

ليرة ثمن المصباح الواحد	L=110
ليرة سورية	S=15/60×250=62.5
ليرة سورية	G=3/60×250=12.5
	I=0.8

ومن ثَم:

ليرة سورية	C=110+62.5=172.5	في الحالة الموضعية
ليرة سورية	$C=\frac{110+12.5}{0.8}=122.5$	في الحالة الإجمالية

وباعتبار أن عدد مصابيح الفلوريسانت 2×36 واطاً في المنشأة قرابة 6000 مصباح فإن الكلفة الكلية للحالتين هي كالآتي:

الكلفة الكلية لاستبدال المصابيح في الحالة الموضعية

ليرة سورية 172.5×6000=1035000

الكلفة الكلية لاستبدال المصابيح في الحالة الإجمالية

ليرة سورية 122.5×6000=735000

ومن ذلك نرى أن الاستبدال الإجمالي للمصابيح يؤدي إلى وفر بحدود 29% عنه في حالة الاستبدال الموضعي، وذلك بإهمال معامل الخصم نتيجة العمر الاستثماري المحدود للمصباح.

عامل الاستطاعة:

يؤدي عامل الاستطاعة دوراً مهماً في دارات التيار المتناوب حيث ترتبط الاستطاعة المستهلكة بهذا العامل:

في دارة التيار المتناوب أحادي الطور:

$$I_L = \frac{P}{U_L \cos\phi} \quad \text{.....(3)}$$

في دارة التيار المتناوب ثلاثي الطور:

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3} U_L \cos\phi} \quad \text{.....(4)}$$

ويتضح من هذه المعادلات أنه من أجل توتر ثابت فإن تيار الحمل يتناسب عكساً مع عامل الاستطاعة، أي أنه كلما كان عامل الاستطاعة أصغر زاد تيار الحمل والعكس بالعكس.

وينتج عن عامل الاستطاعة الأقل من الواحد ما يأتي:

1) زيادة استطاعة التجهيزات بـ KVA:

تعطى استطاعة التجهيزات الكهربائية (مثل المولدات والمحولات والقواطع..الخ) دائماً بـ KVA وذلك لأنه عند تصنيع هذه الآلات في المصانع يكون عامل الاستطاعة غير معروف.

ونظراً لأن:

$$KVA = \frac{KW}{\cos\phi}$$

فإن استطاعة التجهيزات بالـ KVA تتناسب عكساً مع عامل الاستطاعة، وكلما صغر عامل الاستطاعة زادت استطاعة التجهيزات الكهربائية ومن ثَم حجمها وثمنها.

2) كبر مقطع النواقل وذلك بسبب ارتفاع قيمة التيار عند عامل الاستطاعة المنخفض.

3) زيادة الضياعات النحاسية I^2R وذلك بسبب ارتفاع قيمة التيار ومن ثَم انخفاض المردود.

4) ضعف تنظيم التوتر

5) انخفاض الاستطاعة المتاحة للنظام

ويرجع السبب في انخفاض عامل الاستطاعة على شبكة التغذية الكهربائية في المنشأة الصناعية إلى ما يأتي:

1- محركات التيار المتناوب التحريضية (أحادية وثلاثية الطور).

2- المصابيح الانفراغية والملفات.

3- الأفران الكهربائية ومعدات اللحام بالقوس الكهربائي.

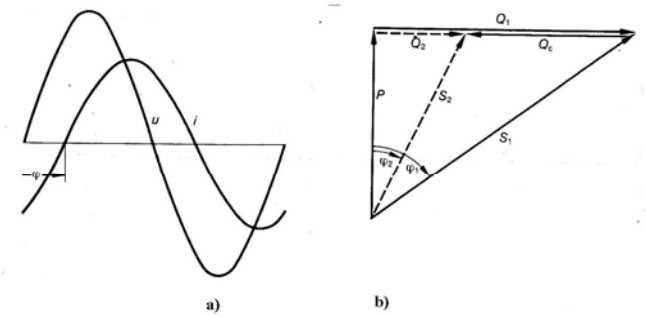
4- تجهيزات تقويم التيار الإلكترونية.

5- الأحمال الكهربائية المتغيرة.

وتتراوح قيمة عامل الاستطاعة في المنشآت الصناعية النسيجية [7] في المجال [0.7÷0.8].

تحسين عامل الاستطاعة:

تحتاج الأحمال التحريضية إلى الاستطاعة الردية لإنتاج الحقول المغناطيسية ويكون التيار متأخراً عن التوتر بمقدار الزاوية φ(الشكل 4).



الشكل (4)

a) الإزاحة بالطور بين التوتر والتيار في الأحمال التحريضية.

b) مخطط مثلث الاستطاعة قبل تحسين عامل الاستطاعة وبعده.

لذلك فإن هذه الأحمال تستجر استطاعة ظاهرية S وتكون دائماً أكبر من الاستطاعة الفعلية المطلوبة لهذه الأحمال وتعطى هذه الاستطاعة بالعلاقة الآتية:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad \text{.....(5)}$$

ومن المعروف أن عامل الاستطاعة هو نسبة الاستطاعة الفعلية إلى الاستطاعة الظاهرية

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad \text{.....(6)}$$

وترتبط كل من الاستطاعة الفعلية والاستطاعة الردية بالعلاقة الآتية [2]:

$$Q = P\tan\varphi \quad \text{.....(7)}$$

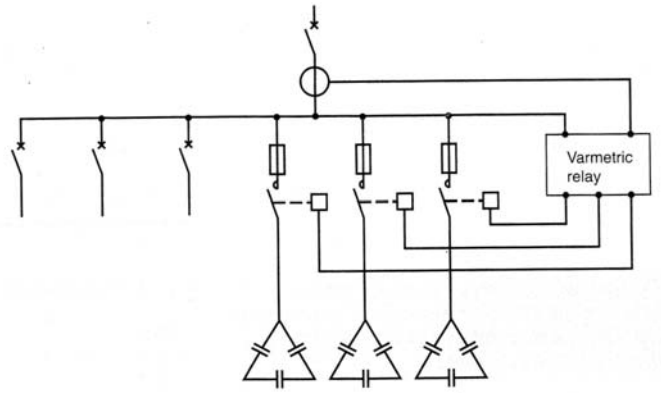
ويتم تحسين عامل الاستطاعة بربط مجموعات مكثفات على التفرع إما بصورة مستقلة مع كل حمل، أو مع بصور مركزية مع مجموعة الأحمال لتحسين عامل الاستطاعة لنظام التغذية بشكل كامل.

لتحسين عامل الاستطاعة من قيمة محددة $\cos\varphi_1$ إلى قيمة أخرى $\cos\varphi_2$ نحتاج إلى مجموعة مكثفات باستطاعة: (الشكل 4-b)

$$Q_C = P(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) \quad \text{.....(8)}$$

وتتكون وحدة تصحيح عامل الاستطاعة من جملة التحكم وقسم الاستطاعة الذي يضم المكثفات والكونتكتورات اللازمة لفصل ووصل المكثفات وقواطع حماية دارات المكثفات ووحدة تفريغ المكثفات عند فصلها عن منظومة التغذية الكهربائية.

وتقوم وحدة التحكم بقياس الاستطاعة الردية في نظام التغذية من خلال محولات التيار والتوتر، وعند انحراف قيمة هذه الاستطاعة عن القيمة المحددة مسبقاً تقوم هذه الوحدة بإعطاء الأوامر لكونتكتورات المكثفات بالفتح أو الإغلاق تبعاً لكل حالة على شكل خطوات تضم كل منها نسبة معينة من الاستطاعة الردية (الشكل 4c).



الشكل (4c) المخطط الصندوقي لوحدة مكثفات تحسين عامل الاستطاعة

ولتحقيق الاستقرار في عملية التحكم وفي الوقت نفسه تجنب التشغيل المتكرر لمجموعات المكثفات يفضل أن يكون مجموع الخطوات بين 5 و 12 خطوة.

لنحسب الآن مقدار الوفر السنوي الناتج عن تحسين عامل الاستطاعة من 0.8 متأخراً إلى 0.95 متأخراً في الشركة الخماسية، وذلك باعتبار أن الحمل الكلي هو 4000 KW عند عامل استطاعة متأخر 0.8، وأن المنشأة تعمل قرابة 3000 ساعة في العام والتعرفة الجديدة هي 4 ل.س لكل كيلواط ساعي حسب التعرفة المعمول بها بدءاً من أيلول 2007 بالإضافة إلى 100 ل.س لكل 1 KVA كلفة ثابتة، وأن تحسين عامل

الاستطاعة من 0.8 إلى 0.95 متأخراً يتم بواسطة مكثفات عديمة الضياع كلفتهـا 200 ل.س لكل 1KVAR مع الأخذ بالحسبان أن معدل الفائدة هو7%.

الحل:

الحمل الكلي للمنشأة هو 4000 KW

$$\cos\phi_1 = 0.8 \quad ; \tan\phi_1 = \tan(\cos^{-1} 0.8) = 0.75$$

$$\cos\phi_2 = 0.95 \quad ; \tan\phi_2 = \tan(\cos^{-1} 0.95) = 0.328$$

ومن ثَم الاستطاعة الردية التي يجب أن تقدمها المكثفات

$$Q_C = P(\tan\phi_1 - \tan\phi_2) = 4000(0.75 - 0.328) = 1688 \quad KVAR$$

الكلفة السنوية قبل تصحيح عامل الاستطاعة :

الحمل الكلي (بالـ KVA) $4000 / 0.8 = 5000$

الكلفة السنوية(لكل 1KVA) (بالليرة السورية) $100 \times 5000 = 500000$

الاستهلاك السنوي (KWh) $4000 \times 3000 = 12000000$

الكلفة السنوية للطاقة (ليرة سورية) $4.5 \times 12000000 = 54000000$

الكلفة السنوية الكلية (ليرة سورية) $500000 + 54000000 = 54500000$

الكلفة السنوية بعد تصحيح عامل الاستطاعة:

الحمل الكلي بالـ KVA $4000 / 0.95 = 4210.526$

الكلفة السنوية(لكل 1KVA) (بالليرة السورية) $100 \times 4210.526 = 421052.6$

الكلفة السنوية للطاقة (ليرة سورية) 54000000

الكلفة الكلية للمكثفات (ليرة سورية) $200 \times 1688 = 337600$

الفائدة السنوية(ليرة سورية) $0.07 \times 337600 = 23632$

الكلفة السنوية الكلية (ليرة سورية) 421052.6+54000000+23632=54444684

الوفر السنوي (ليرة سورية) $54500000 - 54444684 = 55316$

ويضاف إلى ذلك الوفر الناتج عن نسبة الحسم من فاتورة الكهرباء التي تقدمها مؤسسة الكهرباء لقاء تحسين عامل الاستطاعة، وتبلغ هذه النسبة 0.0215 في حال تحسين عامل الاستطاعة إلى 0.95.

الوفر السنوي الناتج عن الخصم (ليرة سورية) $54000000 \times 0.0215 = 1161000$

ومن ثم الوفر السنوي الكلي(ليرة سورية) $1161000 + 55316 = 1216316$

أي أن تركيب مكثفات تحسين عامل الاستطاعة يعطي وفراً سنوياً في فاتورة الكهرباء للشركة يصل إلى 1200000 ل.س وسطياً.

4- الضياعات في المحولات:

يعد المحول الكهربائي جزءاً بالغ الأهمية والفائدة في دارات التغذية الكهربائية، وهو بسيط في نظرياته وسهل في استخداماته حيث يقوم بعملية المواءمة بين أجزاء الدارة المختلفة أساساً في التوترات وذلك من خلال عملية تحويل الطاقة الكهربائية من ملف إلى آخر في المحول عبر المجال المغناطيسي للقلب الحديدي وينجم عن عملية التحويل هذه ضياعات في المحول تؤدي دوراً مهماً في تحديد مردوده، وتقسم هذه الضياعات إلى ضياعات اللاحمل وضياعات التحميل.

ضياعات اللاحمل:

تتكون الضياعات في حالة اللاحمل من الضياعات النحاسية في الملف الأولي $P_{Cu} = I_0^2 r_1$ وباعتبار أن تيار اللاحمل I_0 صغير لا يتعدى 5% من تيار الحمل الاسمي فإن الضياعات النحاسية في حالة اللاحمل تكون صغيرة عادة لا تتجاوز(1-2)% من مجموع الضياعات. وهناك أيضاً الضياعات في الدارة المغناطيسية (الصفائح الحديدية أو الفولاذية نتيجة لدورات التباطؤ والتيارات الإعصارية التي تعرف بتيارات EDDY و VOQUE وعادة تنخفض قيمة هذه الضياعات كلما قلت سماكة الصفائح المستخدمة في الدارة المغناطيسية [3].

الضياعات في حالة التحميل:

وتتكون هذه الضياعات من ضياعات اللاحمل P_0 فضلاً عن الضياعات النحاسية في ملف الأولي $I_1^2 r_1$ وفي الملف الثانوي $I_2^2 r_2$. ويبين الجدول/1/ قيم الضياعات النحاسية والحديدية لمحولات توزيع ذات استطاعة مختلفة مستخدمة في القطر.

الجدول /1/ ضياعات النحاس والحديد لمحولات التوزيع

استطاعة المحولة KVA	ضياعات الحديد (W)	الضياعات النحاسية (W) at 75C°
100	500	2000
200	800	3400
400	1380	5700
630	1980	8260
1000	2800	11880
2000	3980	17225
12500	15000	82000
20000	19500	115000

ويلاحظ من الجدول/1/ أن النسبة بين ضياعات النحاس والحديد هي قرابة 4 مرات وهي النسبة المتبعة عادة في تصميم محولات التوزيع.

ويلاحظ أن الضياعات النحاسية تعطى عند درجة حرارة معينة 75C° إذا كانت المواد العازلة المستخدمة من الدرجات (Class A,E,B) أو تكون 115C° إذا كانت المواد العازلة المستخدمة من الدرجات (Class F,H) [5].

مردود المحول:

نتيجة للضياعات الحديدية والنحاسية في المحول فإن استطاعة الخرج تقل عن استطاعة الدخل ويعبر عن هذا الفرق بالمردود كما يأتي:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}} = \frac{P_2}{P_1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (9)$$

حيث:

P_1 = الاستطاعة الاسمية للدخل

P_2 = الاستطاعة الاسمية للخرج

P_{Cu} = الضياعات النحاسية عند الحمل الكامل

P_{Fe} = الضياعات الحديدية عند التوتر الاسمي والتردد الاسمي

وجميع هذه القيم تقدر بالواط.

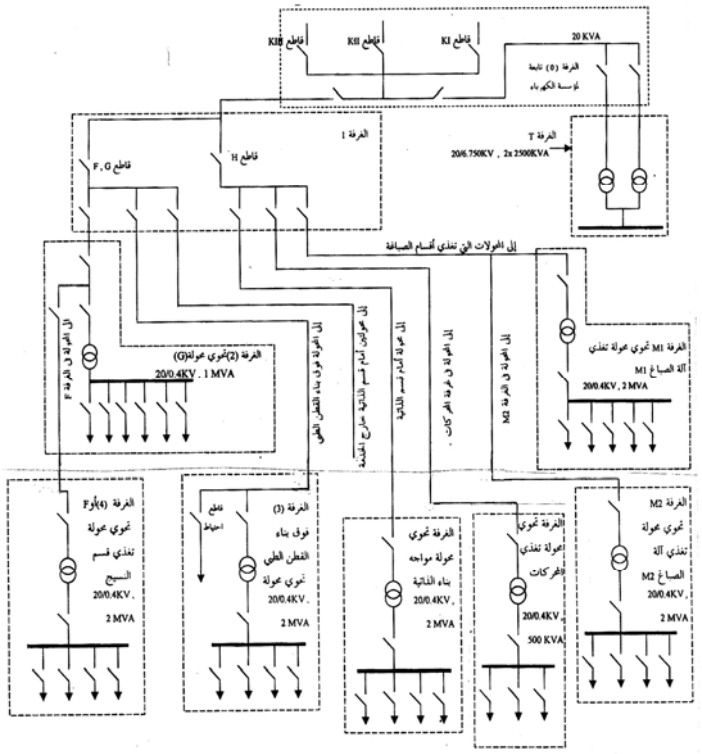
ومعلوم أن مردود المحولات يكون بقيمة عظمى عند تساوي الضياعات النحاسية مع الضياعات الحديدية.

هذا في المحولات بشكل عام، أما بالنسبة لمحولات التوزيع فإن الحالة تختلف بعض الشيء حيث تبقى هذه المحولات موصولة إلى مصدر التغذية طوال اليوم، ومن ثَم تكون الضياعات الحديدية مستمرة طوال الوقت على عكس الضياعات النحاسية التي تكون موجودة فقط في أوقات تحميل المحولات وهي مقسمة إلى ثلاث أوقات:

وقت يكون الحمل فيها أعظمياً عند عمل الخطوط الإنتاجية كلّها، ووقت يكون التحميل فيها جزئياً عند عمل بعض خطوط الإنتاج، ووقت تكون فيها المحولات دون حمل تقريباً بعد انتهاء ساعات العمل وأيام العطل وأوقات الصيانة وقد تبين لنا ذلك من خلال قياس المحددات (البارمترات) الكهربائية للمحولات M_1, M_2, M_C, G, F من شبكة التغذية الكهربائية للشركة الخماسية (الشكل5) حيث تم تسجيل بارمترات التوتر V والتيار A والاستطاعة الفعلية kW والاستطاعة الردية KVAR وعامل الاستطاعة P.F. نتائج القياسات مبينة بالجدول /2/.

الجدول /2/ بارمترات التحميل لمحولات التوزيع في الشركة الخماسية

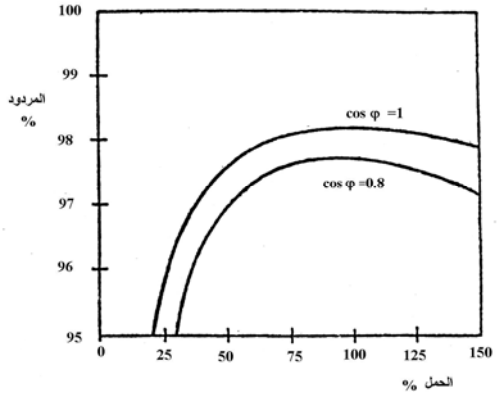
المحولة	الاستطاعة الاسمية (KVA)	القيمة الفعالة لتوتر الخط (Vrms)	الاستطاعة الفعلية (kW)	الاستطاعة الردية (KVAR)	القيمة الفعالة للتيار (A)	عامل الاستطاعة
F	2000	398÷358	680÷132	560÷120	1360÷240	0.76÷0.8
M_C	2000	406÷360	340÷250	230÷150	650÷480	0.8÷0.82
M_1	2000	396÷360	700÷60	110÷40	1100÷100	0.76÷0.98
M_2	2000	400÷360	230÷30	180÷20	450÷150	0.7÷0.83
G	1000	398÷350	480÷110	520÷150	1100÷210	0.6÷0.73



الشكل (5) شبكة التغذية الكهربائية للشركة الخماسية

ويتضح من الجدول السابق التباين في قيم التحميل للمحولات وبسبب ذلك يتم حساب المردود اليومي All Day Efficiency وهو النسبة بين القدرة التي يعطيها المحول إلى القدرة التي تؤخذ من مصدر التغذية خلال الـ 24 ساعة، وتكون قيمة هذا المردود منخفضة بسبب ارتفاع قيمة الضياعات الحديدية على مدى الـ 24 ساعة، ولهذا السبب يتم تجاوز شرط تحقيق مساواة الضياعات النحاسية بالضياعات الحديدية في محولات التوزيع وبدلاً من ذلك يراعى خفض النسبة بين ضياعات الحديد وضياعات النحاس عند التوتر والتيار الاسمي بحيث تتراوح بين 0.15 و0.3 تقريباً.

ويبين الشكل (6) العلاقة بين مردود المحول ونسبة التحميل عند عامل استطاعة 0.8 وعند عامل استطاعة يساوي الواحد. ومن هذا الشكل يتضح أن مردود المحولات في الشركة الخماسية يتراوح بين 96% و 97.5% تبعاً لدرجة التحميل لكل من هذه المحولات.



الشكل (6) العلاقة بين مردود المحول ونسبة تحميله[6]

ويمكن رفع قيمة هذا المردود عن طريق إعادة توزيع الحمولات على محولات الشركة؛ حيث نلاحظ مثلاً أن حمولة كل من محولة القسم الطبي MC ومحولة المصبغة M2 منخفضة، ويمكن جمع حمولة القسمين معاً على محولة واحدة حيث

استطاعة كل من المحولتين 2000KVA بحيث تزداد نسبة تحميلها ومن ثم تخفيض الفرق في قيمة الضياعات الحديدية إلى الضياعات النحاسية لهذه المحولة.

جودة التغذية الكهربائية:

تتميز القدرة الكهربائية بخصائص معينة يتم من خلالها الحكم على هذه القدرة من حيث صلاحيتها في خدمة العمليات الإنتاجية.

ويمكن تقسيم الأحمال الصناعية المستهلكة للقدرة الكهربائية إلى عدة أنواع كما يأتي:

1- الأحمال الصناعية التي تعمل بشكل مستمر.

2- الأحمال الصناعية التي تعمل بشكل متقطع.

3- الأحمال الصناعية التي تعمل بشكل متقطع ولكن متكرر.

وعند حل مسألة جودة التغذية لابد من حل مجموعة من المسائل التقنية اللازمة لتحسين نوعية القدرة الكهربائية خاصة بعد التوسع باستخدام الكترونيات القدرة الكهربائية وما ينجم عنها من اضطرابات تقلل من جودة هذه التغذية.

إن المؤشرات الأساسية لنوعية القدرة الكهربائية هي استقرار التوتر والتردد والموجة الجيبية لكل من التوتر والتيار. لذلك سنبحث في انحراف واهتزاز التوتر وكذلك انحراف واهتزاز التردد فضلاً عن التوافقيات التي تلوث الشكل الجيبي لكل من التيار والتوتر وتأثير كل ذلك في مؤشرات شبكة التغذية الكهربائية.

انحراف التوتر:

يعد انحراف التوتر الفعلي من أهم معايير نوعية الطاقة الكهربائية.

إن انحراف التوتر هو الفرق بين قيمة التوتر الفعلي U والتوتر الاسمي U_n للشبكة موضوع البحث:

$$\Delta U = U - U_n \quad \text{.....(10)}$$

أو :

$$\Delta U\% = \frac{U - U_n}{U_n} \times 100 \quad \text{.....(11)}$$

ووفقاً للنظم القياسية فإنه يسمح بانحراف التوتر عن التوتر الاسمي كما يأتي:

a) 10%+÷5%- على مداخل المحركات – التجهيزات الكهربائية اللازمة لإقلاعها.

b) 5%+÷2.5%- على مداخل أحمال الإنارة.

c) ±5% على مداخل بقية الأحمال.

وفي ظروف العطل يسمح بانحراف التوتر بـ 5% إضافية زيادة على القيم السابقة.

إن السبب الأساسي لانحراف التوتر في شبكات التغذية الكهربائية للمنشآت الصناعية هو تغير نظام عمل الأحمال الكهربائية أو تغيير نظام التغذية، وكذلك وصل الأحمال الأحادية والثلاثية الطور على الشبكة بصورة عشوائية [4].

ويؤدي انحراف التوتر حتى ضمن الحدود المسموح بها من قبل النظم العالمية إلى تغيير المؤشرات التقنية والاقتصادية لشبكات التغذية نتيجة لتأثير ذلك في ضياع الاستطاعة.

إن ارتفاع التوتر يؤثر في إجهاد المواد العازلة للتجهيزات الكهربائية الذي يؤدي مع الزمن إلى انهيارها، وتسبب النبضات العالية للتوتر تخريب للبيانات المخزنة في الحواسيب، وحدوث تشوهات في الدارات الالكترونية وانهيار بعض أجزائها.

أما انخفاض التوتر فيؤدي إلى زيادة المفاقيد في الآلات الكهربائية وزيادة التسخين والاهتزازات والتي قد تسبب انهياراً ميكانيكياً للمحركات، وكذلك يؤثر في عزم الإقلاع للمحركات الذي يتناسب مع مربع التوتر.

إن انحراف التوتر يؤثر بشكل مباشر في أداء المنابع الضوئية وأجهزة الإنارة وعدم استقرار عملها ولاسيما تلك التي تعتمد المصابيح الانفراغية؛ حيث يؤدي انحراف التوتر إلى عملها بشكل متقطع ورجفان الضوء الصادر عنها بشكل يتعب العين ويقصر من عمرها الاستثماري ويزيد من استهلاكها للاستطاعة.

اهتزاز التوتر :

وهو الفرق بين القيمة العظمى والقيمة الدنيا لتغيرات التوتر المتتابعة

$$\Delta U = U_{\max} - U_{\min} \quad \text{.....(12)}$$

أو كنسبة مئوية من التوتر الاسمي

$$\Delta U\% = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_n} \times 100 \quad \text{.....(13)}$$

وتعد الأحمال الآتي مصادر لاهتزاز التوتر:

المضخات، المصاعد، الضواغط، المراوح، المحركات، السخانات الكهربائية، ماكينات اللحام الموضعي، تجهيزات اللحام بالقوس الكهربائي، أفران القوس الكهربائي، مبدلات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح.

تخفيض اهتزاز التوتر:

إن قيمة اهتزاز التوتر المسموحة 5% لأحمال القوى الكهربائية حسب النظم العالمية ولتخفيض اهتزاز التوتر تستخدم عدة طرائق، والطريقة الأكثر بساطة لذلك هي نقل الأحمال التي تسبب اهتزاز التوتر إلى خطوط تغذية مستقلة.

حيث تستخدم في شبكات التوزيع محولات قدرة ذات ملفين على الطرف الثانوي حيث تربط الأحمال المستقرة على أحد الملفات في حين تربط الأحمال التي تسبب اهتزاز التوتر على الملف الآخر.

انحراف واهتزاز التردد:

يعرف انحراف التردد بأنه الفرق بين قيمة التردد الفعلي والتردد الاسمي :

$$\Delta f = f - f_n \quad \text{.....(14)}$$

أو كنسبة مئوية من التردد الاسمي

$$\Delta f\% = \frac{f - f_n}{f_n} \times 100 \quad \text{.....(15)}$$

في الظروف الطبيعية لعمل نظام القدرة الكهربائية يسمح بانحراف التردد بحدود $\pm 0.1\text{Hz}$ مدة عشر دقائق إذا كانت مستمرة أما إذا كانت هذه المدة متقطعة فنسمح بانحراف تردد $\pm 0.2\text{Hz}$ [7].

أما اهتزاز التردد فهو الفرق بين القيمة العظمى للتردد والقيمة الدنيا له خلال مدة زمنية محددة أي:

$$\Delta f = f_{\max} - f_{\min} \quad \text{.....(16)}$$

أو كنسبة مئوية

$$\Delta f\,\% = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_n} \times 100 \quad \text{.....(17)}$$

إن انحراف التردد وكذلك اهتزاز التردد يؤثر في عمل ووثوقية التجهيزات الكهربائية، فمثلاً في المحركات التحريضية ترتبط سرعة الدوران بتردد الشبكة من خلال العلاقة:

$$\omega = \frac{2\pi f}{p}(1-S) \quad \text{.....(18)}$$

حيث:

S: الانزلاق.

f: تردد شبكة التغذية.

p: عدد أزواج أقطاب المحرك.

ونظراً لأن العزم في المحركات التحريضية يرتبط بالسرعة فإن إنتاجية المحرك تتأثر كثيراً عند انحراف التردد، وفي بعض الحالات يمكن أن يحدث انهيار للعملية التكنولوجية.

ويؤثر انحراف التردد بشكل سيئ في شبكات التغذية للمنشآت الصناعية حيث يؤدي ذلك إلى زيادة مفاقيد الاستطاعة والتوتر، وفي بعض الحالات يؤدي انحراف التردد في بعض التجهيزات إلى حدوث الطنين.

التوافقيات:

أدى التقدم السريع في استخدام الكترونيات القدرة الكهربائية في الصناعة والتزايد المستمر للأحمال الصناعية غير الخطية إلى نشوء الموجات الكهربائية بصورة

ملحوظة وظهور التوافقيات [5,8] وكمثال على الأحمال التي تعد مصدراً للتوافقيـات في المنشآت الصناعية نذكر ما يأتي:

- آلات اللحام، أفران القوس الكهربائي، أفران التحريض الكهربائي.
- تجهيزات القيادة الالكترونية للمحركات التحريضية ومحركات التيار المستمر.
- أجهزة عدم انقطاع القدرة الكهربائية UPS.
- تجهيزات المكاتب : الحاسبات الالكترونية، آلات التصوير والنسخ....الخ.
- الأفران الكهربائية بالموجات القصيرة، أجهزة الإنارة ذات مصابيح الفلورسانت.
- التجهيزات الكهربائية التي تتضمن تشبعاً مغناطيسياً مثل المحولات.

ويشمل تأثير التوافقيات في الشبكة الكهربائية ما يأتي:

1- انصهار منصهرات مكثفات القدرة أو حدوث انهيار لعزل المكثفات.

2- المفاقيد الكبيرة وزيادة تسخين الآلات المتزامنة والتحريضية.

3- ارتفاع التوتر وزيادة التحميل نتيجة ظواهر الطنين.

4- حدوث تداخل في الإشارات والفصل الخاطئ لأجهزة الحماية ولاسيما تلك المزودة بمعالجات ميكروية Microprocessor Controller.

5- حدوث تداخل مع أجهزة التحكم للمحركات الكبيرة.

6- حدوث اهتزازات ميكانيكية بالآلات الدوارة.

ويعـرف تشـوه التوافقيـات الكلـي الـذي يرمـز لـه بـ (Total Harmonic Distortion)THD كما يأتي:

$$THD = \frac{r.m.s Value of\ all\ harmonics}{r.m.s Value of\ the\ fundamental} \times 100 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (19)$$

ويستنتج من هذه العلاقة التشوه الكلي للتوافقيات في موجة التيار:

$$THD(i) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} i_n^2}}{i_1} \times 100\% \quad \text{.....(20)}$$

والتشوه الكلي للتوافقيات في موجة التوتر :

$$THD(v) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100\% \quad \text{.....(21)}$$

وحسب المواصفات القياسية فإن قيمة هذا التشوه في موجة التوتر يجب أن لا يتعدى 5% إذْ إن النسب الأعلى من ذلك تؤدي إلى زيادة التسخين على خطوط الحيادي والمحركات والمحولات[4].

الدراسة العملية:

وبغية التعرف على خصائص التغذية الكهربائية في الشركة الخماسية قمنا بعمل قياسات وجمع البيانات والمعلومات عن نوعية القدرة الكهربائية باستخدام أجهزة تحليل الطاقة (Power Analysis) في بعض أقسام الشركة وهي قسم النسيج (المحولة F) وقسم القطن الطبي (المحولة Mc) وقسم المصبغة (المحولات M1) وتشمل هذه البيانات كلاً من التوتر V والتيار A والتردد والتوافقيات لكل من التوتر والتيار،الأشكال (13-7).

تم تركيب أجهزة تحليل الطاقة على طرف التوتر المنخفض في المحولات واستمرت مرحلة القياس مدة 72 ساعة ونبين فيما يأتي مناقشة علمية لهذه البارامترات وانعكاساتها على جودة التغذية في كل من هذه الأقسام.

(نظراً لمحدودية عدد الصفحات نكتفي بإيراد المنحنيات البيانية للمحولة F فقط).

توترات الخطوط

- قسم النسيج (المحولة F):

o القيمة الفعلية للتوتر 375V.

- القيمة العظمى للتوتر 398V.
- القيمة الدنيا للتوتر 358V.

انحراف التوتر:

$$\Delta U\% = \frac{U - U_n}{U_n} \times 100$$

$$\Delta U\% = \frac{375 - 380}{380} \times 100 = -1.315\%$$

وهذه القيمة هي ضمن القيم المسموحة لانحراف التوتر حسب النظم القياسية IEC1000-2-4.

أما اهتزاز التوتر فهو

$$\Delta U\% = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_n} \times 100$$

$$\Delta U\% = \frac{398 - 358}{380} \times 100 = 10.5\%$$

وهذه القيمة لاهتزاز التوتر أكبر من القيم المسموحة استناداً إلى النظم القياسية IEC 519 حيث إن المجال المسموح به وفقاً لهذه النظم ±5%.

- قسم القطن الطبي (المحولة Mc):

- القيمة الفعلية للتوتر 390 V.
- القيمة العظمى للتوتر 406 V.
- القيمة الدنيا للتوتر 360 V.

انحراف التوتر : $\Delta U\% = 2.63\%$ ضمن الحدود المسموحة

اهتزاز التوتر : $\Delta U\% = 12.1\%$ خارج الحدود المسموحة

- قسم المصبغة (M_1 المحولة) :

- القيمة الفعلية للتوتر 385 V.
- القيمة العظمى للتوتر 396 V.

- القيمة الدنيا للتوتر 360 V.

انحراف التوتر : $\Delta U\% = 1.315\%$ ضمن القيم المسموحة

اهتزاز التوتر : $\Delta U\% = 9.47\%$ خارج الحدود المسموحة

نلاحظ من دراسة الحالات السابقة أن انحراف التوتر في أقسام الشركة المدروسة هو ضمن الحدود المسموحة حسب النظم القياسية، في حين اهتزاز التوتر هو خارج الحدود المسموحة وفقاً لهذه النظم، ولمعالجة هذه المشكلة نقترح تركيب مجموعة من المكثفات على التفرع مع حمل كل من هذه الأقسام على أن يتم تعيير قيمة الممانعة السعوية لمجموعة كل قسم على حدة، وبحيث تقلل من اهتزاز التوتر قدر الإمكان وتجعله ضمن المجال المسموح به لاهتزاز التوتر.

التردد

- قسم النسيج (المحولة F) :

- القيمة الفعلية للتردد 50.01 Hz.
- القيمة العظمى للتردد 50.05Hz.
- القيمة الدنيا للتردد 49.88 Hz.

انحراف التردد :

$$\Delta f\% = \frac{f - f_n}{f_n} \times 100$$

$$\Delta f\% = \frac{50.01 - 50}{50} \times 100 = 0.02\%$$

وهذه القيمة هي أصغر بكثير من القيم المسموحة وهي ±2% حسب النظم القياسية IEC 1000-2-4.

كما أنها أصغر من القيمة المسموحة حسب المواصفات الأوربية EN50.160 لشبكات التوتر المنخفض حيث إن القيمة المسموحة لانحراف التردد حسب هذه النظم ±2%

اهتزاز التردد:

$$\Delta f\% = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_n} \times 100$$

$$\Delta U\% = \frac{50.01 - 49.88}{350} \times 100 = 0.26\%$$

وهذه القيمة أصغر أيضاً من القيمة المسموحة 2% لاهتزاز التردد حسب النظم القياسية السابقة.

- قسم القطن الطبي (المحولة Mc):

- القيمة الفعلية للتردد 50.03Hz.
- القيمة العظمى للتردد 50.04Hz.
- القيمة الدنيا للتردد 49.95 Hz.

انحراف التردد : $\Delta f\% = 0.06\%$ ضمن القيم المسموحة

اهتزاز التردد : $\Delta f\% = 0.16\%$ ضمن القيم المسموحة

- قسم المصبغة (المحولة M_1) :

- القيمة الفعلية للتردد 50.02Hz.
- القيمة العظمى للتردد 50.05Hz.
- القيمة الدنيا للتردد 49.98 Hz.

انحراف التردد : $\Delta f\% = 0.04\%$ ضمن القيم المسموحة

اهتزاز التردد : $\Delta f\% = 0.14\%$ ضمن القيم المسموحة

نلاحظ أن انحراف التردد في كل من الأقسام الثلاثة المدروسة هو ضمن الحدود المسموحة التي تبلغ ±2% حسب النظم القياسية IEC1000 2-4، و ±0.1Hz حسب المواصفات الأوربية EN50.160 لشبكات التوتر المنخفض.

التوافقيات

- قسم النسيج (المحولة F):

أ- التشوه الكلي لتوافقيات توتر الخط U_{THD}

تراوحت قيمة هذا التشوه بين 1% و 0 وبصورة متساوية على الخطوط الثلاثة، ونلاحظ أن هذه القيم تابعة لتغيرات الحمل وهي قيم صغيرة ومقبولة نسبياً.

ب- التشوه الكلي لتوافقيات التيار I_{THD}

تراوح التشوه الكلي للتيار في الأطوار الثلاثة بين 1% و2.3% وهو غير متماثل على هذه الأطوار، ويتعلق بزيادة تيار الحمل وانخفاضه ويصل في بعض الحالات إلى القيمة 3.5. وعند انخفاض قيمة الحمل خلال مرحلة التبديل بين الورديات فإن هذه القيمة تصل إلى 6.8% خلال مدة قصيرة، ثم عند بدء التحميل تعود إلى القيم العادية.

- قسم القطن الطبي (المحولة Mc):

أ- التشوه الكلي لتوافقيات توتر الخط U_{THD}

تراوحت قيمة التشوه بين 1% و 1.8% وهي قيم مقبولة.

ب- التشوه الكلي لتوافقيات التيار I_{THD}

كانت قيمة التشوه الكلي لتوافقيات التيار على الأطوار الثلاثة لهذا القسم متماثلة وتراوحت بين 5% و 10%.

- قسم المصبغة(M_1 المحولة):

أ- التشوه الكلي لتوافقيات توتر الخط U_{THD}

تراوحت قيمة هذا التشوه بين 0.1% و 0.8%، وكانت القيمة الأكثر استمرارية هي القيمة 0.5 وجميعها تقع ضمن المجال المسموح به.

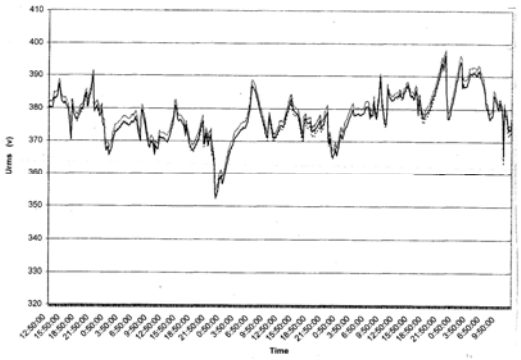
ب- التشوه الكلي لتوافقيات التيار I_{THD}

تباينت قيمة I_{THD} لهذا القسم بين 1% و 1.5% خلال مرحلة التحميل.

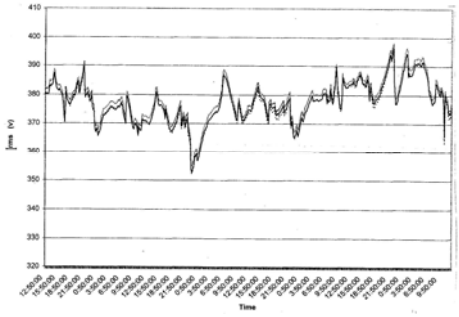
نلاحظ من دراسة التوافقيات في الأقسام المختلفة من الشركة الخماسية أن التشوه الكلي لتوافقيات توترات الخطوط هي ضمن القيم المسموحة حسب النظم القياسية IEEE 519-1992 وIEC 1000 التي تتراوح بين 3% و 5% على شبكات التوزيع حتى 66 kV.

كذلك الأمر بالنسبة للتشوه الكلي لتوافقيات التيار فإنه باستثناء القسم الطبي فإن قيمة هذا التشوه تقع ضمن القيم المسموحة حسب النظم القياسية السابقة التي تتراوح بين 1.5% و 5% على شبكات التوزيع.

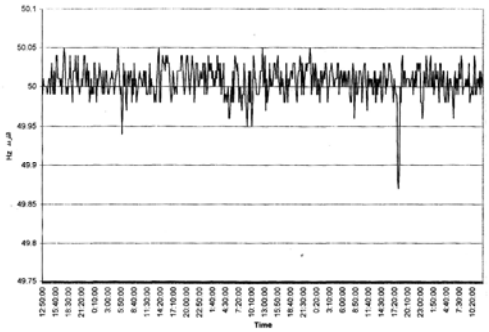
بالنسبة للقسم الطبي فإن القيم المرتفعة للتشوه في موجات التيار تعود إلى أن الخط جديد ويحتوي على مجموعة من دارات التحكم ذات العناصر الالكترونية الصناعية ولمعالجة التشوه بالتوافقيات في هذا القسم نقترح استخدام مرشحات التمرير (Passive Filters) على أن تربط على جهة التوتر المنخفض بالقرب من الأحمال التي تقوم بتوليد التوافقيات.



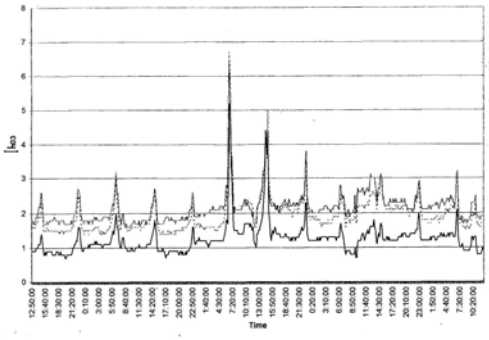
الشكل (7) تغيرات التوتر Urms مع الزمن في المحولة F



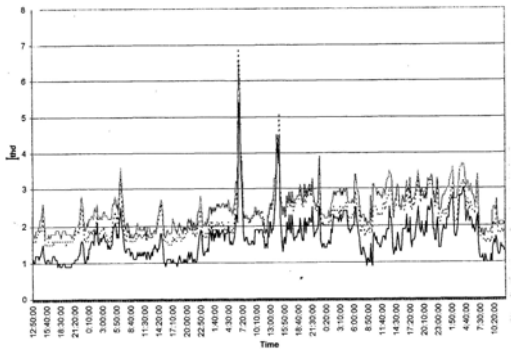
الشكل (8) تغيرات التيار Irms مع الزمن في المحولة F



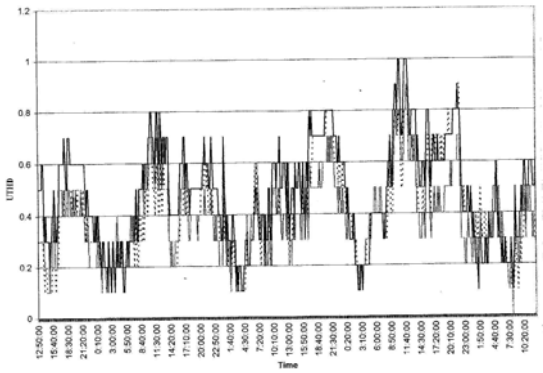
الشكل (9) تغيرات التردد مع الزمن في المحولة F



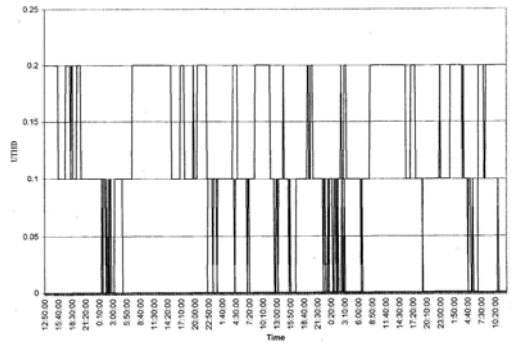
الشكل (10) التوافقية الثالثة لتيارات الأطوار الثلاثة في المحولة F



الشكل (11) التشوه الكلي للتيار في المحولة F



الشكل (12) التوافقية الثالثة للتوتر في المحولة F



الشكل (13) التشوه الكلي للتوتر في المحولة F

الخاتمة:

تعد مسألة تحسين كفاءة الطاقة الكهربائية وترشيد استهلاكها الخيار الأهم في الوقـت الحاضر، إذ ينظر إليه كبديل عن إنتاج هذه الطاقة وهو في معظم الحالات إن لم يكن في جميعها أقل كلفة على الاقتصاد من إقامة محطات جديدة لإنتاج الطاقة الكهربائية.

بيّنا في سياق البحث أنه يمكن تحسين كفاءة الطاقة الكهربائية المستهلكة في المنشـآت الصناعية عن طريق تطبيق بعض الإجراءات الممكنة مثل تشغيل نظام الإنارة داخـل المنشأة عند توتر ودرجة حرارة محددة، واستبدال مصابيح الفلوريسانت دفعة واحـدة

بعد انتهاء عمرها الاستثماري بدلاً من الاستبدال الموضعي لهذه المصـابيح، وكـذلك تركيب مكثفات لرفع عامل الاستطاعة إلى جانب التوتر المنخفض لمحولات التغذيـة والتركيز على مسألة تحميل المحولات بصورة منتظمة- قدر الإمكان- بحيـث يـتم عزل المحولات ذات الحمولات الخفيفة وزيادة المردود للمحولات العاملة.

وتسهم جودة التغذية الكهربائية في زيادة وثوقية التزود بالطاقة الكهربائيـة والعمليـة الإنتاجية مما ينعكس على كلفة وحدة المنتج في المنشأة الصناعية، وفي هذا الإطار تم تقديم تحليل كفاءة وجودة الطاقة الكهربائية في إحدى شركات القطاع العام النسـيجية، وقد أظهرت نتائج الدراسة أنه يمكن رفع معايير هذه الجودة عـن طريـق اسـتخدام محولات التنظيم والممانعات السعوية لتخفيض اهتزاز التوتر وتركيب المرشحات فـي نقطة محددة من شبكة التغذية للتقليل من التوافقيات.

المراجع

1. Guide to Energy Management, William J. Kennedy, FAIRMONT PRESS ,INC, 1994.
2. Electrical Installations Hndbook, SIEMENS, Jhon Wiley & Sons, 1997.
3. Power System Analysis, Hadi Saadat , McGrow –Hill,1999.
4. Electricity Distribution Network design, E.Lakervi, IEE, England,1995
5. Electrical Installation Guide, Schneider Electric, France, 2007.
6. Electrical Machines and other Applications,I. Hindmarsh, Pergamon Press, 1980.
7. Modern Power System Analysis, I. Nagrath, McGraw-Hill, 1980.
8. تقرير عن فرص ترشيد استخدام الطاقة في الشركة العربية للصـناعات المتحـدة، لجنة حفظ وترشيد الطاقة في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعـة دمشـق, 2004.

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق: 2007/9/16.