

## ملحق 1

### معامل القدرة

Power Factor

#### مقدمة:

كثيرا ما نسمع عن معامل القدرة Power Factor عند حساب القدرة الكهربائية وما له تأثير سيء عندما يكون منخفضا، فمعامل القدرة هو المقياس لمدى استخدام القدرة المنتجة من المصدر Source في الأحمال Loads. فالقدرة المنتجة من المصدر = الجهد (من المولد)  $\times$  التيار (السحب من الحمل).

فالجهد يكون عبارة عن موجة جيبية Sine wave له تردد ثابت (50 أو 60 هيرتز) ويكون له قيمة ثابتة حسب تصميم كل مولد وليس له أي علاقة بالحمل، فقد يكون الجهد (220 - 380 - 460 - 3300 - 6600 - 20000 فولت). أما التيار فيكون عبارة عن موجة جيبية أيضا وله نفس التردد ولكن لا يكون ثابت بل يختلف باختلاف الحمل.

ويوضح ذلك القاعدة الكهربائية التالية:

**الجهد يحدده المصدر والتيار يحدده الحمل:**

لذلك لحساب القدرة الكهربائية وكذلك حساب معامل القدرة لابد من معرفة طبيعة الأحمال الكهربائية.

فتنقسم الأحمال الكهربائية إلى :

- 1- أحمال حثية وهي الأحمال التي تحتوي على ملفات Inductance (XL).
  - 2- أحمال مادية بحتة وهي التي تحتوي على مقاومة مادية Resistance (R).
  - 3- أحمال سعوية وهي الأحمال التي تحتوي على مكثفات Capacitance (XC).
- فهل يتم الاستفادة من كل القدرة الكهربائية المسحوبة من المنبع سواء أكان الحمل عبارة عن مقاومة مادية أو مقاومة حثية أو مقاومة سعوية؟ أم هناك معامِل للقدرة يختلف باختلاف الحمل.

أولاً: القدرة في حالة الأحمال الحثية Inductive load :

الأحمال الحثية هي الأحمال التي تحتوي على ملفات Coils مثل المحركات Motors والمولدات Generators والمحولات Transformers والملفات الخانقة Shock Coils.



شكل (84) دائرة بها ملف

ومن خصائص الملف أن التيار الذي يمر فيه لا يصل إلى قيمته العظمى منذ اللحظة الأولى لتوصيل الجهد بالملف ولكن يزيد تدريجياً.

ومعاوقة الملف لمرور التيار تسمى الممانعة الحثية (Inductance Reactance (XL) وتقاس بالأوم ويتم حسابها كالتالي:

ممانعة الملف =  $2 \pi \times \text{التردد} \times \text{حث الملف}$

$$XL = 2 \pi F L$$

حيث:  $3.14 = \pi$        $F = \text{التردد}$        $L = \text{معامل الحث الذاتي}$

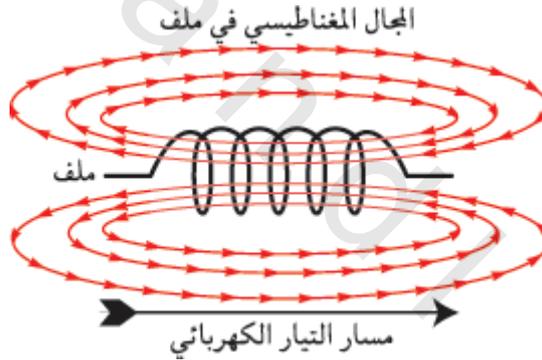
وحدات قياس الحث الذاتي للملف:

يقاس الحث الذاتي لملف بوحدة الهنري (Henry) أو المللي هنري

ولكي نعرف سبب عدم وصول التيار الذي يمر في الملف إلى قيمته العظمى منذ اللحظة الأولى لتوصيل الجهد بالملف يتم تسليط جهد متردد على الملف ومقارنة موجتي الجهد والتيار.

فعند تسليط الجهد على الملف المثالي يحدث الآتي:

1- يمر تيار في الملف، ونتيجة لمرور التيار في الملف يتولد مجال مغناطيسي Magnetic Field حول الملف، وحيث إن قيمة التيار المار في الملف تتغير زيادة ونقصا كما هو الحال مع التيار المتردد، فإن قيمة المجال المغناطيسي الناشئ عن التيار تتغير أيضا زيادة ونقصا.

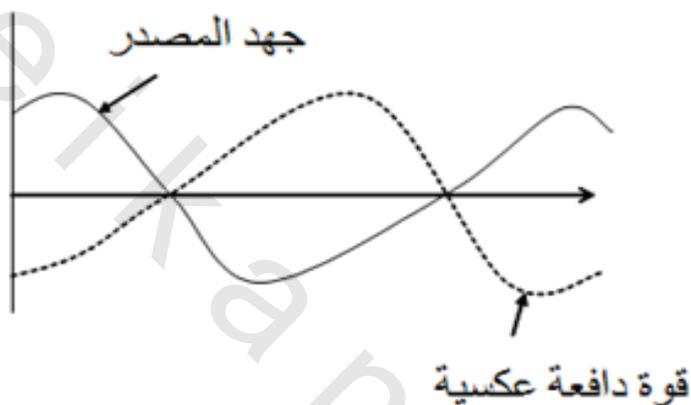


شكل (85) المجال المغناطيسي المتولد في الملف

2- وحسب ظاهرة الحث الكهرومغناطيسي تقوم لفات الملف بقطع خطوط الفيض المغناطيسي المتولدة.

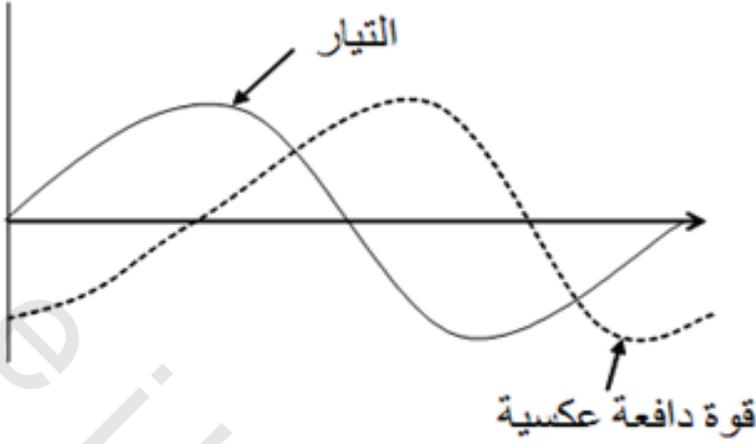
3- عندما تقطع لفات الملف خطوط الفيض المغناطيسي، يتولد فيض آخر وهذا الفيض يولد على طرفي الملف قوة دافعة كهربية عكسية Back Electro Motive Force (bemf) تساوي وتضاد جهد المنبع طبقا لقاعدة لينز، وتعارض الزيادة

والنقص في التيار المار في الملف وكلما زاد معدل تغير التيار زادت قيمة هذا الجهد المعارض لحدوث التغيير (الملف في الكهرباء يشبه الكتلة في الميكانيكا فالكتلة لها عزم قصور ذاتي أي تحتزن الطاقة إن شئت أن تحركها وتعوّك أن شئت أن توقفها مثل الملف يعيق إدخال التيار إليه و بعد أن يمر يعيق إنقاصه).

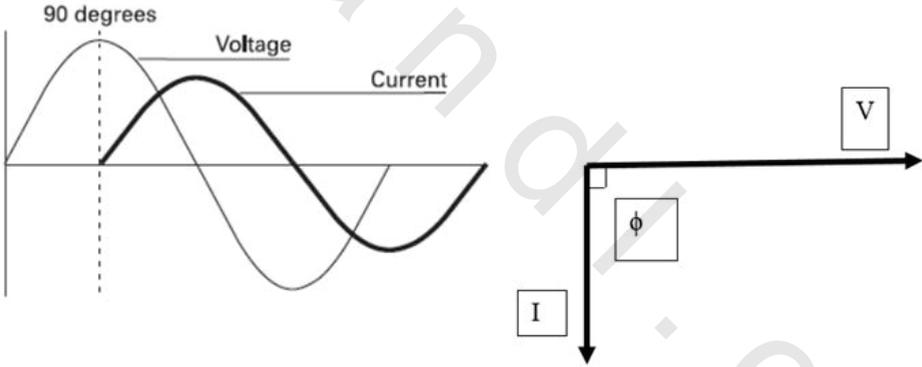


شكل (86) توليد قوة دافعة عكسية تعاكس جهد المصدر

4- حيث إن القوة الدافعة الكهربائية العكسية تعارض مرور التيار الأصلي في الملف، فإذا كانت القوة الدافعة العكسية قيمة عظمى فإن التيار يساوي صفراً، وإذا كانت القوة الدافعة العكسية تساوي صفراً فإن التيار يكون قيمة عظمى كما في الشكل التالي:



شكل (87) القوة الدافعة العكسية تعارض مرور التيار



شكل (88) رسم المتجهات والموجات لدائرة بها ملف

من رسم المتجهات يتضح أن متجه الجهد يكون على المحور السيني ومتجه التيار يكون على المحور الصادي متأخرا عنه بزاوية مقدارها  $90^\circ$  وبالتالي سوف يكون هناك قيمتان للتيار:

1- قيمة في نفس اتجاه الجهد وتساوي  $I \cos 90$ .

2- قيمة في الاتجاه العمودي على الجهد  $I \sin 90$ .

حساب القدرة في حالة الملف المثالي:

نتيجة لوجود قيمتين للتيار فسوف يكون هناك قيمتان للقدرة:

1- القيمة الأولى للقدرة =  $\sqrt{3} \times \text{لجهد} \times \text{التيار} \times \cos 90^\circ$ .  
وحيث إن  $\cos 90^\circ = 0$  فإن القيمة الأولى = صفر.

$$\text{Power 1} = \sqrt{3} V \times I \times \cos 90^\circ = 0$$

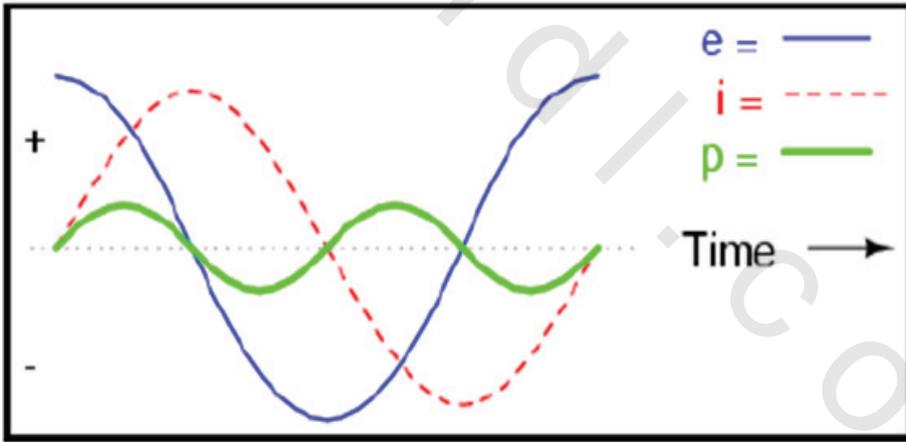
2- القيمة الثانية للقدرة =  $\sqrt{3} \times \text{لجهد} \times \text{التيار} \times \sin 90^\circ$

وحيث إن  $\sin 90^\circ = 1$  فإن قيمة القدرة الثانية = القدرة المسحوبة

من المنبع

$$\text{Power 2} = \sqrt{3} V \times I \times \sin 90^\circ = \sqrt{3} V \times I = S$$

والرسم التالي يوضح القدرة المتولدة في الملف المثالي وهي عبارة عن حاصل ضرب موجة الجهد في موجة التيار جميع الأحمال التي تحتوي على ملفات تعتمد على المغناطيسية كأساس لعملها والتيار اللازم لهذا الغرض لا يستفاد منه.



شكل (89) موجات الجهد والتيار والقدرة لدائرة بها ملف مثالي

فبعد أن ينتج القوة المغناطيسية يعود مرة أخرى إلى المصدر وهذا التيار يسمى التيار غير الفعال Reactive Current أي أن التيار المسحوب من المنبع يكون هو التيار المستخدم في التمغنط فقط.

ونجد أن القدرة تتأرجح بين الجزء الموجب والجزء السالب، وهذا يعني أن الملف يسحب قدرة من المنبع في ربع الموجة الأول، وتخزن هذه القدرة في المجال المغناطيسي المتولد في الملف ثم يعيدها إلى المنبع في الربع الثاني للموجة، وهذه القدرة هي المسئولة عن توليد المجال المغناطيسي في الملف، وتكون محصلة القدرة المستهلكة في الملف المثالي تساوي صفراً. وتم الاصطلاح على تسمية القدرة في حالة الملف المثالي بـ القدرة الغير فعالة Reactive Power .

ويرمز لها بالرمز Q ووحدتها الـ فار (VAR) Volt Ampere Reactance .

$$V \times I \times \sin 90 = \sqrt{3} V \times I = S \sqrt{3} = Q$$

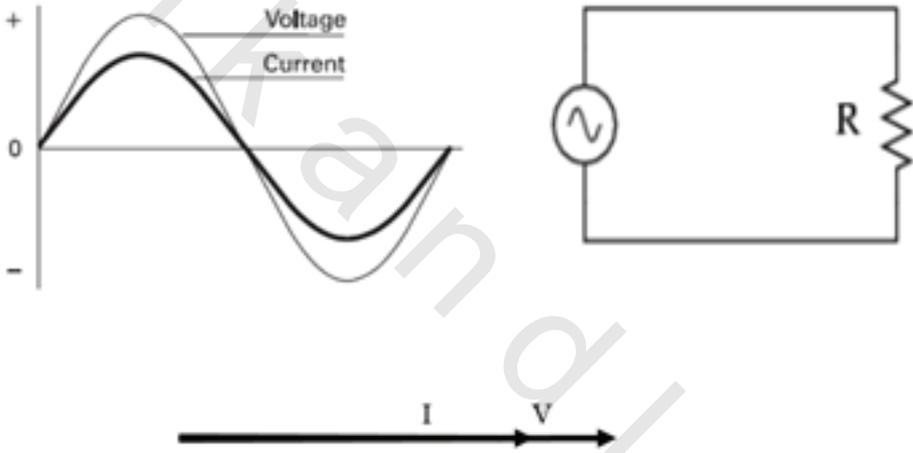
أي أنه في حالة الملف المثالي يكون التيار متأخراً Lagging عن الجهد بزاوية مقدارها 90 درجة، وذلك نتيجة لتولد القوة الدافعة العكسية التي تعارض مرور التيار والقدرة المتولدة في الملف هي قدرة غير فعالة (Reactive Power)، ويرمز لها بالرمز (Q)، هي نفسها القدرة المسحوبة من المنبع

$Q = \text{reactive power} \quad Q = I^2 X \quad Q = \frac{E^2}{X}$

*Measured in units of Volt-Amps-Reactive (VAR)*

ثانياً: القدرة في حالة الأحمال المادية Resistive Load :

في حالة الأحمال التي تحتوي على مقاومة مادية بحتة (اللمبات العادية - المكواه الكهربائية - السخانات - الأفران...) نجد أنه عند مرور تيار متردد فيها فإن موجتي الجهد والتيار تبدآن من نفس النقطة وتنتهيان عند نفس النقطة، أي أنهما متطابقتان في الوجه أو في الطور أو "in phase" وبالتالي لا يوجد بينهما إزاحة Phase Shift أي أن الزاوية بين التيار والجهد = صفر.



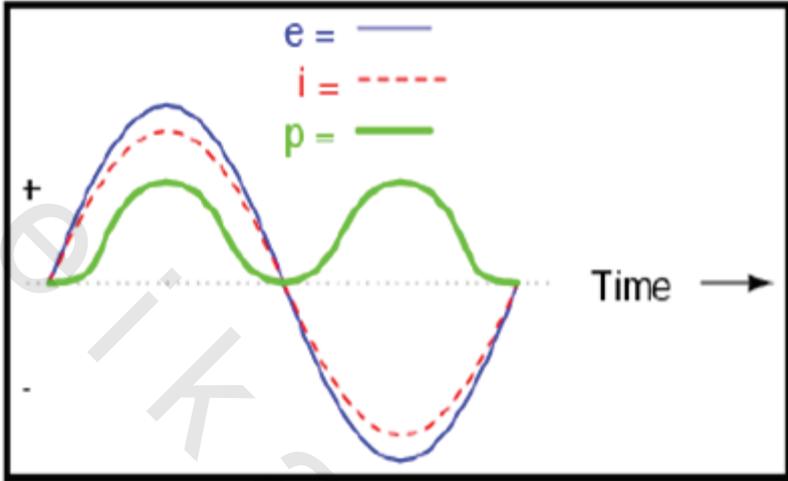
شكل (90) المتجهات و الدائرة الكهربائية والموجات لحمل له مقاومة مادية فقط

حساب القدرة في الأحمال المادية:

القدرة في الأحمال المادية (ثلاثة أوجه Three Phase) =  $\sqrt{3} \times \text{جهد الخط} \times \text{تيار الخط} \times \cos \phi$

$$\text{Power} = \sqrt{3} V \times I \times \cos 0 = \sqrt{3} V \times I$$

والشكل التالي يوضح القدرة المتولدة في المقاومة المادية وهي عبارة عن حاصل ضرب موجة الجهد في موجة التيار



شكل (91) موجات الجهد والتيار والقدرة لحمل له مقاومة مادية فقط

من الرسم يتضح أن موجة القدرة تكون موجبة دائماً، أي أنه يتم الاستفادة من كل القدرة المنتجة من المنبع في الأحمال المادية وغالبا ما تكون على هيئة حرارة أو ضوء.

وتم الاصطلاح على تسمية القدرة في حالة المقاومة بالقدرة الفعالة Active Power.

ويرمز لها بالرمز P ووحدتها الـ وات أو كيلووات Watt or Kilowatt.

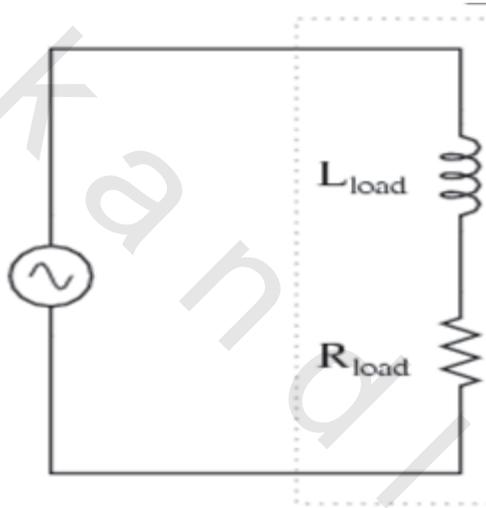
$$P = \sqrt{3} V \times I = S$$

أي أن القدرة المستهلكة في الحمل ويطلق عليها القدرة الفعالة (Active Power) ويرمز بالرمز (P) هي نفسها القدرة المسحوبة من المنبع ويطلق عليها القدرة الظاهرية (Apparent Power) ويرمز لها بالرمز (S).

مما سبق نلاحظ أنه يتم الاستفادة من كل القدرة المتولدة في حالة المقاومة المادية، أما في حالة الملف المثالي فلا يتم الاستفادة من أي قدرة.

ثالثاً: القدرة عندما تكون الدائرة تحتوي على ملف ومقاومة مادية:

عند دراسة القدرة في الأحمال التي تحتوي على ملفات افترضنا أن الملف مثالي ولكن في الحياة العملية غالباً ما يكون الملف غير مثالي، أي أن له مقاومة مادية Resistance وممانعة حثية Inductive Reactance كما في المحرك والمحول والملف الخائق، فمادة النحاس المستخدمة في الملف يكون لها مقاومة مادية.



شكل (92) دائرة كهربائية بها حمل مادي وحمل حثي

ففي الدوائر الكهربائية يتم تمثيل الملف على أنه ممانعة حثية ( $X_L = 2 \pi F L$ ) متصلة على التوالي مع مقاومة مادية ( $R$ ) وتسمى المقاومة الكلية في هذه الحالة بالمعاوقة ( $Z$ ) Impedance وتساوي:

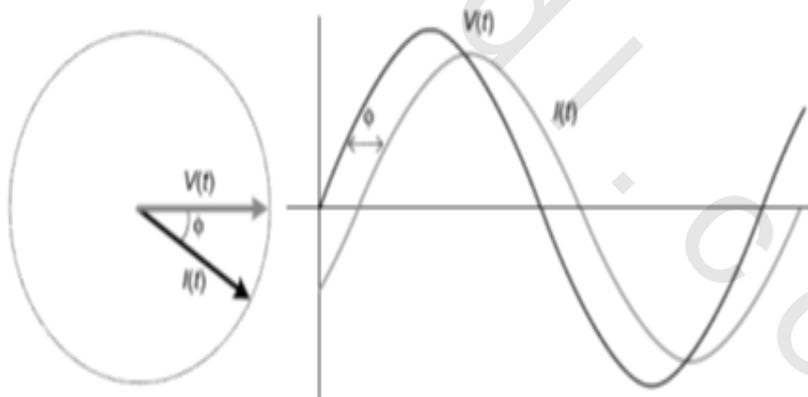
$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

وفي هذه الحالة تتولد موجتان للتيار، إحداهما تمر في المقاومة المادية والأخرى تمر في الممانعة الحثية، المركبة الأولى للتيار تكون في نفس الوجه مع الجهد (الزاوية بين موجة الجهد وموجة التيار تساوي صفراً) والمركبة الثانية تكون متأخرة بزاوية مقدارها 90 درجة وتكون محصلة الموجتين هي موجة متأخرة عن الجهد بزاوية أكبر من الصفر وأقل من 90 درجة، ونستنتج من ذلك الآتي:

1- إذا كان الحمل يحتوي على مقاومة مادية أكبر من المقاومة الحثية فإن الزاوية تكون أقرب إلى الصفر.

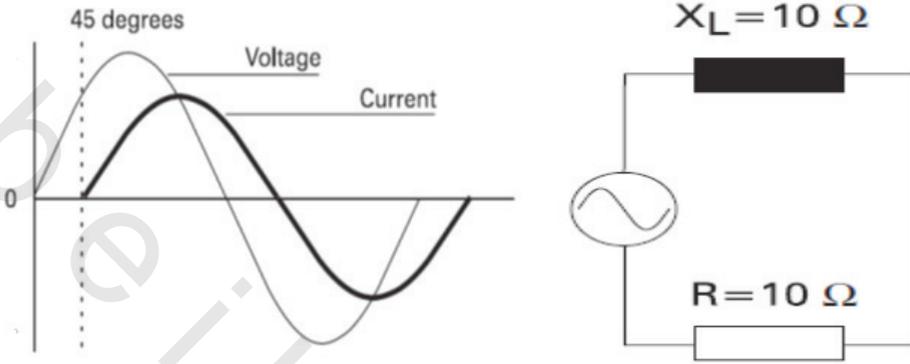
2- إذا كان الحمل يحتوي على مقاومة حثية أكبر من المقاومة المادية فتكون الزاوية أقرب إلى 90 درجة.

فالشكل التالي يبين موجة الجهد والتيار لملف له مقاومة مادية ومقاومة حثية، حيث تكون الزاوية بين موجة الجهد والتيار تساوي  $\phi$ ، وأن هذه الزاوية، كما بينا، هي أكبر من الصفر وأقل من 90 درجة ( $0 < \phi < 90$ ).



شكل (93) المتجهات والموجات لدائرة بها ملف ومقاومة

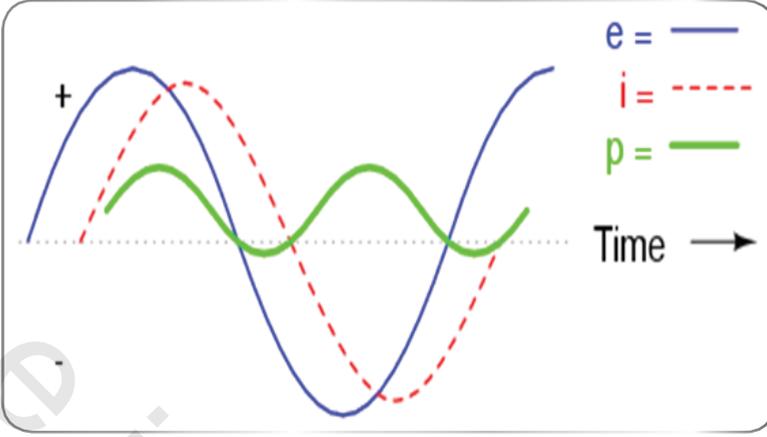
ولنفترض ملفاً له مقاومة مادية ومقاومة حثية لهما نفس القيمة كما في الشكل التالي:



شكل (94) الدائرة الكهربائية والموجات لدائرة بها ملف ومقاومة لهما نفس القيمة

فعندما تحتوي الدائرة على مقاومة مادية ومقاومة حثية لهما نفس القيمة فإن موجة التيار تتأخر عن موجة الجهد بزاوية مقدارها 45 درجة. وفي هذه الحالة يمر تيار له مركبتان:

- 1- المركبة الأولى تمر في المقاومة البحتة، وتكون في نفس الطور مع الجهد (كما رأينا في حالة الحمل المادي) ويرمز لها بالرمز  $(I_r)$  وتكون هي المسئولة عن سحب القدرة الفعالة من المصدر وتحويلها إلى طاقة مستهلكة في الحمل.
- 2- المركبة الثانية للتيار تمر في الملف وتكون متأخرة عن الجهد بزاوية مقدارها 45 ويرمز لها بالرمز  $(I_{xL})$  وهي تسحب قدرة غير فعالة من المصدر تتبادلها معه مرتان في كل دورة وتكون هي المسئولة عن إنشاء المجال المغناطيسي اللازم لعمل المعدة (المحرك أو المحول أو المولد أو الملف الخانق). والشكل التالي يوضح القدرة المتولدة في المقاومة والملف



شكل (95) موجات الجهد والتيار والقدرة لدائرة بها ملف ومقاومة

ثالثا: القدرة في حالة الأحمال السعوية Capacitive Load :

الأحمال السعوية هي الأحمال التي بها مكثفات، ويتكون المكثف من سطحين معدنيين بينهما مادة عازلة (ورق - سيراميك - بلاستيك.....إلخ). وعند التأثير بجهد متردد على مكثف مثالي يتكون مجال كهربائي داخل المادة العازلة ويتم شحنه وتفريغه باستمرار طبقا لتغيير جهد المنبع وينتج عن ذلك مرور تيار متردد في المكثف.

ومن خصائص المكثف المثالي أن الجهد الذي يمر فيه لا يصل إلى قيمته العظمى منذ اللحظة الأولى لتوصيله بمصدر الجهد المتردد ولكن يزيد تدريجيا. والغرض الأساسي من عمل المكثف في دوائر التيار المتردد هو تخزين الطاقة الكهربائية داخل المجال الكهربائي المتولد في العازل وتفريغها تبعا لظروف التشغيل.

ومعاوقة المكثف لمرور التيار تسمى الممانعة السعوية Inductance Capacitance (XC) وتقاس بالأوم ويتم حسابها كالتالي:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

ممانعة المكثف =  $1 / (\pi \times 2 \times X \text{ التردد} \times \text{سعة المكثف})$

حيث:

سعة المكثف = C

التردد = F

$\pi = 3.14$

وحدات قياس سعة المكثف:

تقاس سعة المكثف بوحدة الفاراد (Farad) أو الميكروفاراد (=1 $\mu$ F) Micro Farad

(10<sup>-6</sup> F) أو النانوفاراد (1nF = 10<sup>-9</sup> F) أو البيكوفاراد (1pF = 10<sup>-12</sup> F) Pico Farad .

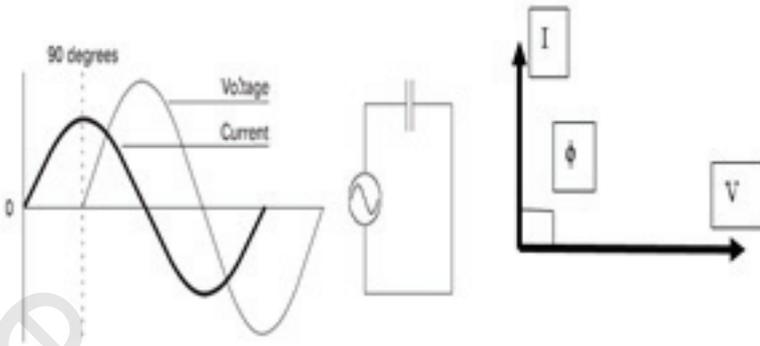
**عملية الشحن و التفريغ للمكثف في ربع موجه تتم كالآتي:**

1- عند توصيل المكثف بمصدر جهد متردد تبدأ عملية الشحن، ويكون التيار في المكثف أكبر ما يمكن عندما يكون الجهد صفرا (بداية عملية الشحن يكون جهد المكثف صفرا ويكون تدفق الشحنات كبير يعني التيار قيمة عظمي) ثم بعد ذلك يزيد جهد الشحن من الصفر حتى يصل إلى أقصى قيمه له خلال الربع الأول من الموجه. ويبدأ التيار في التخامد ويصبح صفرا في اللحظة التي تكون فيها قيمة الجهد أكبر ما يمكن على المكثف (فالمكثف في الكهرباء يشبه الزنبرك في الميكانيكا فالزنبرك يخزن الطاقة في صورة ضغط أشبه بالمكثف الذي تخزن الطاقة في صورة ضغط كلاهما قوة دافعة كهربية أو ميكانيكية).

2- في حالة التفريغ فإن الجهد يقل من أقصى قيمة له حتى يصل إلى الصفر خلال الربع الثاني من الموجه.

3- تيار التفريغ يزيد في الاتجاه العكسي من الصفر إلى أكبر قيمة سالبة.

وهكذا تتوالي عملية الشحن والتفريغ في المكثف.



شكل (96) المتجهات و الدائرة الكهربائية والموجات لحمل له مكثف

من خلال عملية الشحن والتفريغ للمكثف وبالنظر إلى منحنيات الجهد والتيار نلاحظ أن موجة التيار تسبق موجة الجهد بزاوية مقدارها 90 درجة.

القدرة الفعالة = الجهد x التيار x جتا 90° (جتا 90 = صفر)

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \phi$$

أي أن القدرة المستهلكة في الحمل ويطلق عليها القدرة الفعالة (Active Power)

ويرمز بالرمز (P) تساوي صفرا

القدرة غير الفعالة = الجهد x التيار x جا 90 (جا 90 = 1)

$$Q = \sqrt{3} \times V \times I \times \sin \phi$$

أي أن القدرة غير الفعالة (Reactive Power) ويرمز لها بالرمز (Q) وتقاس بـ

(ف.أ.ر) وفي هذه الحالة =  $I \times \sqrt{3} V$

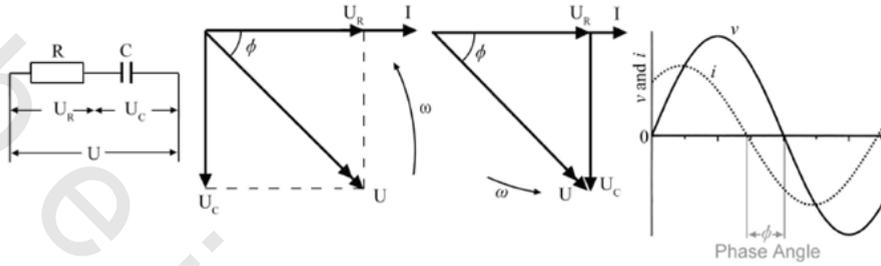
وهي نفسها القدرة المسحوبة من المنبع ويطلق عليها القدرة الظاهرية

(Apparent Power) ويرمز لها بالرمز (S)، أي أن الطاقة المخزونة في المكثف في

الربع الأول والمسحوبة من المنبع أثناء شحن المكثف تعود إلى المنبع في الربع

الثاني أثناء تفريغ المكثف.

رابعاً: القدرة عن في الحالة السابقة افترضنا أن المكثف مثالي ولكن في الحياة العملية غالباً ما يكون المكثف غير مثالي، أي أنه له مقاومة مادية حتى يتم تفرغ تيار المكثف من خلالها.



شكل (97) المتجهات والموجات لدائرة بها مكثف ومقاومة

كما ذكرنا في الملف نعيد الكلام في حالة المكثف.

1- إذا كانت الزاوية = صفر ، جتا  $0 = 1$  (المقاومة البحتة) فإن كل القدرة المسحوبة من المنبع تستهلك في الحمل.

2- إذا كانت الزاوية =  $90^\circ$  ، جتا  $0 = 90$  (المكثف المثالي). فإن المكثف يسحب شحنة من المصدر.

3- إذا كانت الزاوية  $0 > \phi > 90$  (مكثف + ملف) فإن جزء من القدرة المسحوبة من المنبع يستهلك في الحمل وجزء يستخدم لشحن المكثف.

لذلك يكون معامل القدرة في الأحمال التي تحتوي على مكثف مثالي يساوي (صفرًا) ولا يتم الاستفادة من القدرة.

وفي الأحمال التي تحتوي على مكثف ومقاومة يكون معامل القدرة متقدم بزاوية  $\phi$  وهذه الزاوية تكون أكبر من الصفر وأقل من  $90$  ويكون معامل القدرة

.Leading Power Factor

مما سبق يتضح أن جيب تمام الزاوية بين متجه الجهد ومتجه التيار ( $\cos \phi$ ) هو الذي يحدد القدرة المستهلكة في الأحمال كالتالي:

1- إذا كانت الزاوية = صفر ، جتا ( صفر) = 1 (المقاومة البحتة).

فإن كل القدرة المسحوبة من المنبع تستهلك في الحمل.

2- إذا كانت الزاوية = 90 ، جتا 90 = صفر (الملف المثالي).

فإن القدرة المسحوبة من المنبع تستخدم لبناء المجال المغناطيسي في الملف ولا تستهلك في الحمل.

3- إذا كانت الزاوية  $\phi > 90 > \phi$  صفر (مقاومة + ملف).

فإن جزءا من القدرة المسحوبة من المنبع يستهلك في الحمل وجزءا يستخدم لبناء المجال المغناطيسي في الملف..

وتم تسمية هذه القيمة (جيب تمام الزاوية بين متجه الجهد و التيار  $\cos \phi$ )

بمعامل القدرة (P. F) Power Factor

فمعامل القدرة هو المقياس لمدى استغلال القدرة المنتجة من المنبع في الأحمال، أي هل يتم الاستفادة كل القدرة المنتجة من المنبع في الحمل أم يتم الاستفادة من جزء منها فقط.

ففي الأحمال التي تحتوي على مقاومة مادية فقط يكون معامل القدرة (واحد) unity Power Factor وهذا يعني أنه يتم الاستفادة من كل القدرة المنتجة من المنبع.

وفي الأحمال التي تحتوي على ملف مثالي يكون معامل القدرة (صفرا) ولا يتم الاستفادة من القدرة.

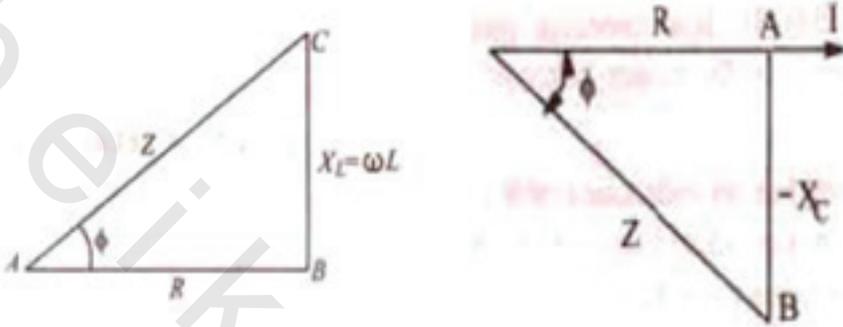
وفي الأحمال التي تحتوي على ملف ومقاومة يكون معامل القدرة متأخر بزاوية  $\phi$  وهذه الزاوية تكون أكبر من الصفر وأقل من 90 ويكون معامل القدرة

Lagging Power Factor.

كيفية حساب معامل القدرة:

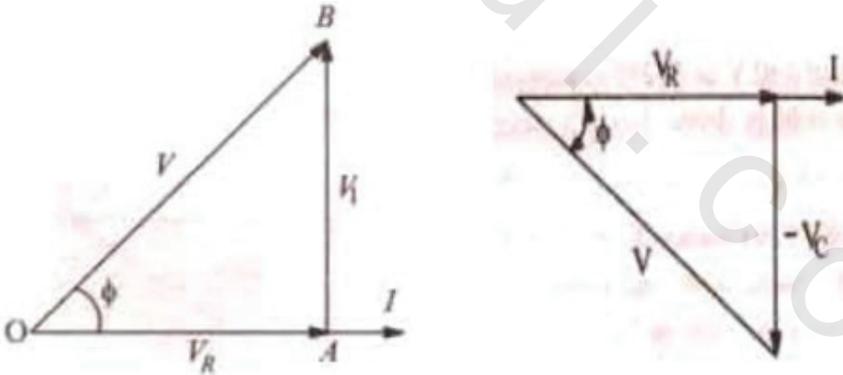
يمكن حساب معامل القدرة عن طريق التالي:

1- مثلث المقاومات ويكون فيه معامل القدرة  $(R / Z = \cos \phi)$



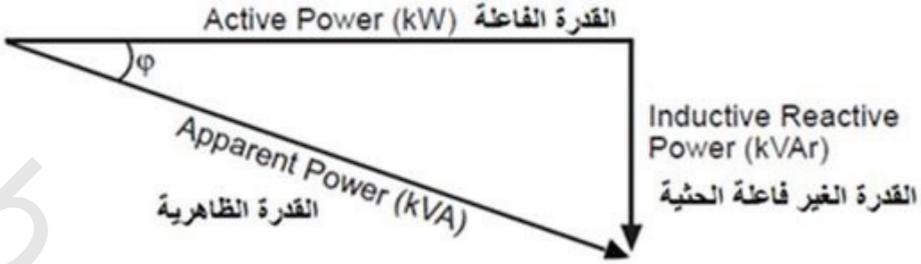
شكل (98) مثلث المقاومات

2- مثلث الجهود ويكون فيه معامل القدرة  $(V_R / V = \cos \phi)$ .



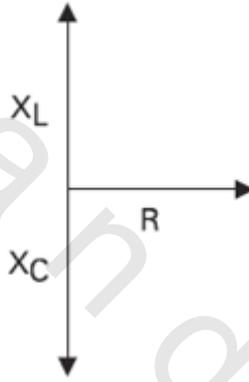
شكل (99) مثلث الجهود

3- مثلث القدرة ويكون فيه معامل القدرة  $(\text{KVA} / \text{KW} = \phi \text{ Cos})$ .



شكل (100) مثلث القدرة

تحسين معامل القدرة:



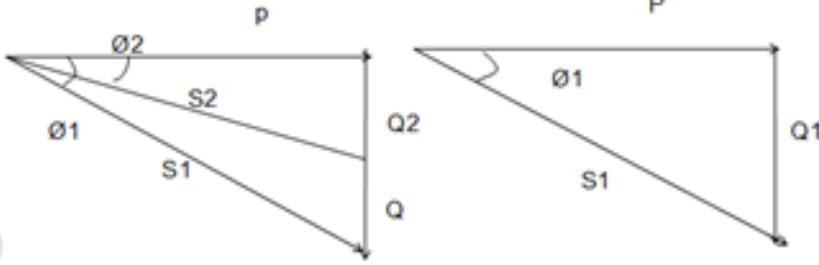
شكل (101) رسم المتجهات لدائرة بها مكثف وملف ومقاومة مادية

لاحظنا أن الحمل الحثي يسحب من المصدر قدرة غير فعالة ذات معامل قدرة متأخر بزاوية  $0 < \phi < 90$ .

والمكثف يسحب من المصدر قدرة غير فعالة ذات معامل قدرة متقدم بزاوية  $90 < \phi < 0$ .

فقد تبين أن الحل الأمثل لتحسين معامل القدرة هو إمداد الحمل الحثي بقدرة غير فعالة في عكس اتجاه قدرته غير الفعالة عن طريق استخدام المكثفات فتقل بذلك قدرته الظاهرية ويقل التيار المسحوب.

حساب حجم المكثف المطلوب:



شكل (102) مثلث القدرة لحساب حجم المكثف المطلوب

من الشكل السابق نلاحظ الآتي:-

- 1- القدرة الفعالة قبل التحسين P.
- 2- القدرة الغير فعالة قبل التحسين Q1.
- 3- القدرة الظاهرية قبل التحسين S1.
- 4- معامل القدرة قبل التحسين  $\cos \phi_1$ .

وبعد التحسين:

- 1- القدرة الفعالة بعد التحسين P لم يحدث لها أي تغيير.
- 2- القدرة الغير فعالة بعد التحسين Q2 وهي أقل من Q1.
- 3- القدرة الظاهرية بعد التحسين S2 وهي أقل من S1.
- 4- معامل القدرة بعد التحسين  $\cos \phi_2$  وهو أكبر من  $\cos \phi_1$ .

$$\tan \phi_2 = Q_2 / P \quad \text{then} \quad Q_2 = P \times \tan \phi_2$$

$$\tan \phi_1 = (Q + Q_2) / P \quad \text{then} \quad (Q + Q_2) = P \times \tan \phi_1$$

وبطرح المعادلتين نحصل على:

$$Q + Q_2 - Q_2 = P \tan \phi_1 - P \tan \phi_2$$

$$Q = P (\tan \phi_1 - \tan \phi_2)$$

أي أنه بمعرفة القدرة الفعالة للحمل ومعامل القدرة الفعلى ومعامل القدرة المراد الوصول إليه يمكن حساب القدرة الغير الفعالة المطلوبة.

$$KVAR = kW \times \tan \Theta$$

$$KVAR_{\text{uncorrected}} = kW \times \tan \Theta_{\text{uncorrected}}$$

$$KVAR_{\text{corrected}} = kW \times \tan \Theta_{\text{corrected}}$$

$$KVAR_{\text{required for correction}} = kW \times (\tan \Theta_{\text{uncorrected}} - \tan \Theta_{\text{corrected}})$$

مثال:

إذا كان لدينا محرك قدرته 100 كيلوات ومعامل القدرة 0.7 وجهد التشغيل 380 فولت

ومطلوب تحسين معامل القدرة ليصبح 0.95 احسب الآتي:

- 1- القدرة الظاهرية.
- 2- القدرة الغير فعالة للحمل.
- 3- توضيح ذلك على مثلث القدرات.
- 4- قيمة القدرة الغير فعالة بالفار المطلوب إضافتها لتحسين معامل القدرة ليصبح 0.95.
- 5- ما هي سعة المكثف المطلوب.
- 6- ما هو التغير الحادث في ظروف التشغيل.

الإجابة:

1- يمكن حساب القدرة الظاهرية من العلاقة.

$$\text{Power Factor} = \frac{\text{Real Power}}{\text{Apparent Power}}$$

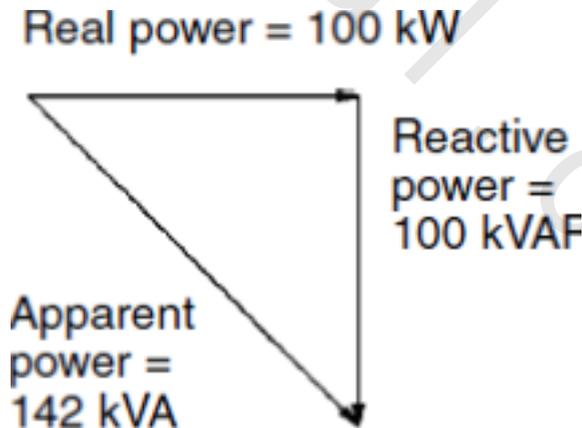
$$\text{Apparent power} = 100 / 0.7 = 142 \text{ KVA}$$

2- ويمكن حساب القدرة الغير فعالة من العلاقة.

$$\text{Reactive power} = \sqrt{(\text{Apparent power})^2 - (\text{True power})^2}$$

$$\text{Reactive power} = 100 \text{ KVAR}$$

3- وبالتالي يمكن رسم مثلث القدرة.



شكل (103) مثلث القدرة للمثال السابق

4- ويمكن حساب القدرة الغير فعالة المطلوبة من العلاقة التالية.

$$Q = P (\tan \phi_1 - \tan \phi_2)$$

$$\phi_1 = \cos^{-1} 0.7 = 45^\circ \text{ and } \tan 45^\circ = 1$$

$$\phi_2 = \cos^{-1} 0.95 = 18^\circ \text{ and } \tan 18^\circ = 0.33$$

$$Q = 100 (1 - 0.33) = 67 \text{ KVAR}$$

5- ويمكن حساب سعة المكثف المطلوب.

$$Q = \sqrt{3} \times V \times I_c = 3 \times V^2 / X_c$$

$$X_c = 3 \times V^2 / Q = 3 \times 380 \times 380 / 67000 = 6.5 \Omega$$

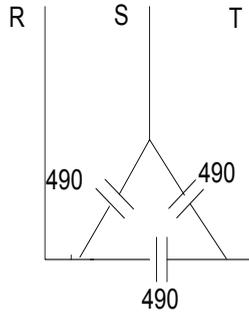
$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$6.5 = 1 / 2 \times 3.14 \times 50 \times C$$

$$C_t = 1 / 2 \times 3.14 \times 50 \times 6.5 = 4.9 \times 10^{-4} \text{ F}$$

$$C = 490 \mu\text{F}$$

فيتم استخدام ثلاث مجموعات من المكثفات على التوازي (Ct = 3 x 490 μF).



شكل (104) المكثفات المطلوبة

6- التغيير في ظروف التشغيل.

أولاً: قبل تحسين معامل القدرة:

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \phi$$

$$100000 = \sqrt{3} \times 380 \times I \times 0.7$$

$$I = 217 \text{ A}$$

$$S = \sqrt{3} \times V \times I = 142.8 \text{ KVA}$$

ثانياً: بعد تحسين معامل القدرة:

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \phi$$

$$100000 = \sqrt{3} \times 380 \times I \times 0.95$$

$$I = 160 \text{ A}$$

أي أن التيار اصبح 160 أمبير بدلا من 217 أمبير وبالتالي تم توفير 57 أمبير تم

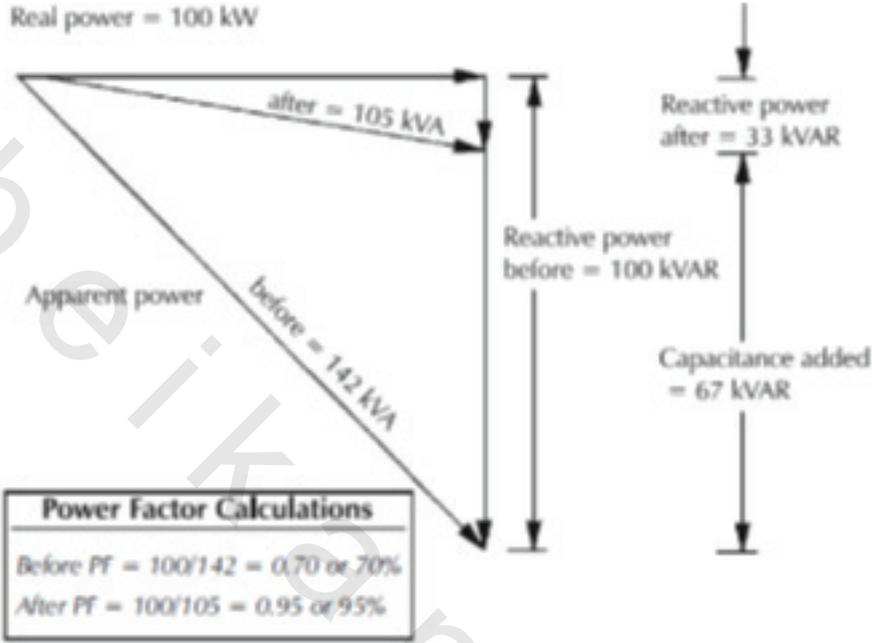
استعواضهم من المكثفات

$$S = \sqrt{3} \times V \times I = 105.3 \text{ KVA.}$$

والقدرة الظاهرية أصبحت 105.3 كيلوفولت أمبير بدلا من 142.8 كيلوفولت أمبير

أي أنه تم توفير 37.5 كيلوفولت أمبير.

ويمكن توضيح ذلك على مثلث القدرة كالتالي:



شكل (105) مثلث القدرة قبل وبعد التحسين

فوائد تحسين معامل القدرة:

1- فوائد تحسين معامل القدرة للمنظومات الجديدة:

1- تحسين معامل القدرة يمكن العميل من استخدام محولات ذات قدرات منخفضة وكابلات ذات مساحة مقطع صغير ومفاتيح ومعدات قطع أصغر حجماً.

2- فوائد تحسين معامل القدرة للمنظومات التي في الخدمة:

1- تخفيض الفقد الكهربائي (KW) في الكابلات والمحركات والمحولات وباقي المعدات الكهربائية حيث يتناسب فقد الطاقة الكهربائية مع قيمة مربع التيار ويضاف قيمة هذا الفقد إلى قراءة عدادات الطاقة الكهربائية (الكيلووات

ساعة) فينتج عن خفض التيار بالموصلات بقيمة 10 % مثلا تخفيضا في فقد الطاقة الكهربائية بمقدار يصل إلى 20 %.

**% reduction of  
power losses =**

$$100 - 100 \left( \frac{\text{original PF}}{\text{new PF}} \right)^2$$

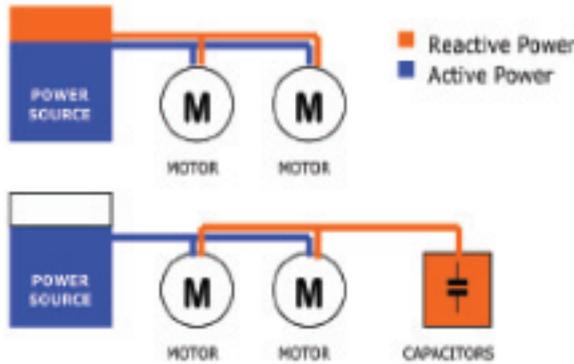
فمثلا إذا تم تحسين معامل القدرة من 65.0 إلى 9.0 فإن الفقد في القدرة يقل بقيمة 48 %

$$\text{Reduction of power losses} = 100 - 100 \times \left( \frac{.65}{.90} \right)^2 = 48\%$$

2- خفض الهبوط في الجهد due to reduced voltage drop .Improve Voltage regulation  
تخفض مكثفات تحسين معامل القدرة التيار الغير فعال الذي يمر بالموصلات من جهة المصدر ومن ثم ينخفض الهبوط في الجهد والفقد في الطاقة وبالتالي يتحسن أداء المحركات وباقي المعدات الكهربائية.

$$\% \text{ of Voltage Rise} = \frac{\text{kVAR of capacitors} \times \% \text{ Impedance of Transformer}}{\text{kVA of Transformer}}$$

3- زيادة القدرة الفعالة المتاحة KVA for the same KW working power . More  
مع تحسين معامل القدرة لحمل مغذٍ من محول، تنخفض قيمة التيار المار بالمحول ومن ثم يمكن إضافة أحمال جديدة عليه.



شكل (106) توضيح زيادة القدرة المتاحة

$$KW = KVA \times PF$$

والجدول التالي يوضح تأثير تحسين معامل القدرة على القدرة الفعالة بالكيلووات عندما تكون القدرة الكلية 600 كيلو فولت أمبير.

POWER FACTOR	60%	70%	80%	90%	100%
ACTIVE POWER	360 KW	420 KW	480 KW	540 KW	600 KW
REACTIVE POWER	480 KVAR	428 KVAR	360 KVAR	262 KVAR	0 KVAR
TOTAL POWER	600 KVA	600 KVA	600 KVA	600 KVA	600 KVA

4- خفض القدرة الظاهرية Less total KVA for the same KW working power مع تحسين معامل القدرة لحمل مغذى من محول، تنخفض قيمة التيار المار بالمحول وبالتالي تقل القدرة الظاهرية.

$$KVA = \sqrt{3} \times KV \times I$$

والجدول التالي يوضح تأثير تحسين معامل القدرة على القدرة الكلية بالكيلو فولت امبير عندما يكون الحمل يستهلك قدرة فعالة قدرها 600 كيلووات.

POWER FACTOR	60%	70%	80%	90%	100%
ACTIVE POWER	600 KW	600 KW	600 KW	600 KW	600 KW
REACTIVE POWER	800 KVAR	612 KVAR	450 KVAR	291 KVAR	0 KVAR
TOTAL POWER	1000 KVA	857 KVA	750 KVA	667 KVA	600 KVA

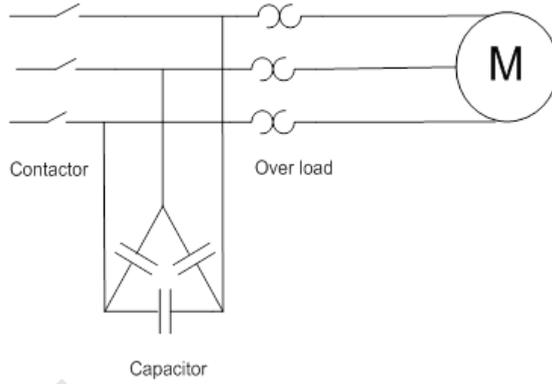
طرق تحسين معامل القدرة للمحركات الحثية:

بعد معرفة قيمة القدرة الغير فعالة المطلوبة لعملية تحسين معامل القدرة ومعرفة سعة المكثفات المطلوبة، يجب معرفة طرق تحسين معامل القدرة للأحمال كالتالي:

1- تحسين معامل القدرة لكل محرك على حده Individual Capacitor .

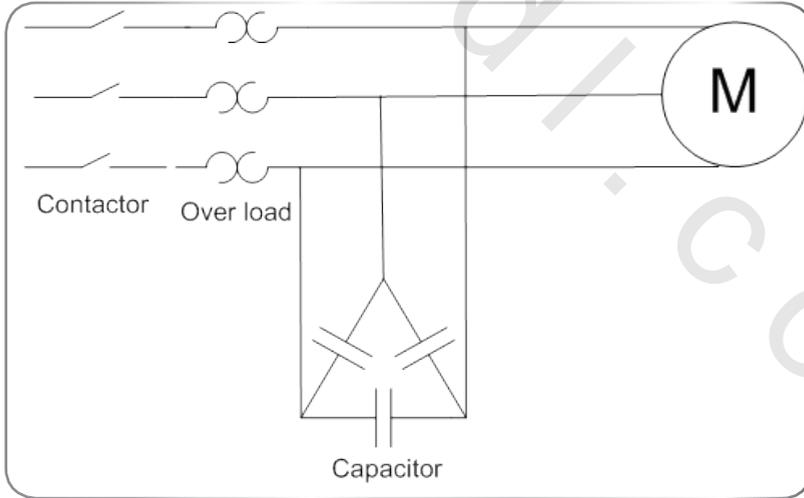
فمثلاً إذا كان الحمل هو محرك فعن طريق معرفة قدرة المحرك ومعامل القدرة الفعلي ومعامل القدرة المطلوب الوصول إليه يمكن حساب قدرة وسعة المكثفات المطلوبة ويتم توصيل المكثفات بأحد الطرق التالية:

أ- يتم توصيل المكثفات بعد الكونتاكتور وقبل الأوفرلود، وبالتالي نضمن أن المكثفات تدخل الخدمة عند تشغيل المحرك فقط وأن توصيل المكثفات لا يؤثر على قيمة التيار المضبوط عليها الأوفرلود.



شكل (107) تحسين معامل القدرة لكل محرك على حده عن طريق توصيل المكثفات قبل الأوفرلود

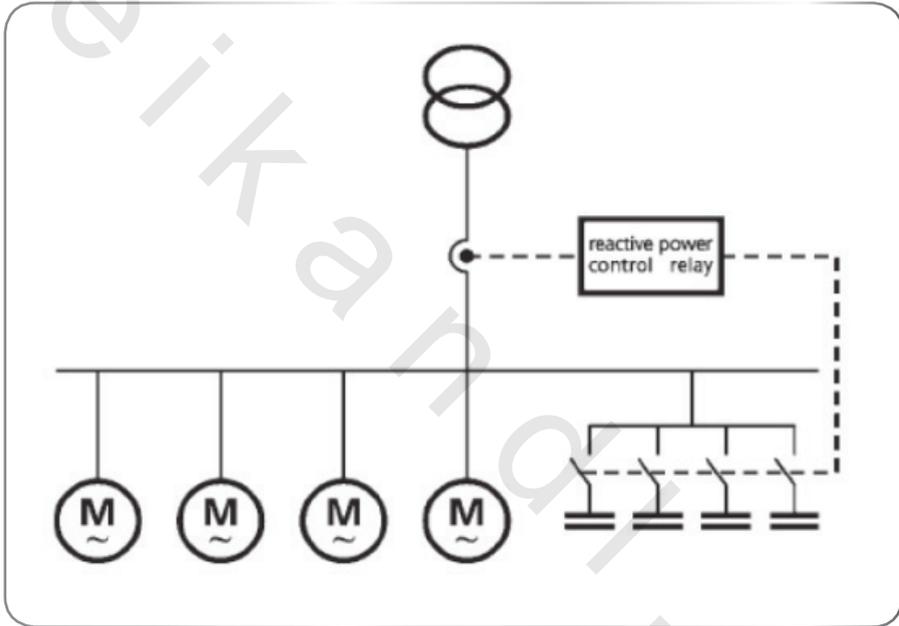
ب- يتم توصيل المكثفات بعد الأوفرلود، وبالتالي نضمن أن المكثفات تدخل الخدمة عند تشغيل المحرك فقط كما في الحالة الأولى وفي هذه الحالة فإن توصيل المكثفات يؤثر على قيمة التيار المضبوط عليها الأوفرلود وبالتالي يتم إعادة ضبط الأوفرلود حسب قيمة التيار بعد التحسين.



شكل (108) تحسين معامل القدرة لكل محرك على حده عن طريق توصيل المكثفات بعد الأوفرلود

ج- يتم توصيل المكثفات بين المفتاح الرئيسي والكنتاكتور، وفي هذه الحالة يمكن للمكثفات أن تدخل الخدمة في حالة عدم تشغيل المحرك وهذه الطريقة يجب عدم استخدامها.

2- تحسين معامل القدرة لكل الأحمال معا عن طريق استخدام Capacitor Bank .  
في هذه الطريقة يتم توصيل هذه الوحدة على قضبان لوحة التوزيع الرئيسية أي يتم توصيلها كأنها حمل من الأحمال وعن طريق جهاز مبرمج Regulator يتم دخول وخروج المكثفات حسب زيادة ونقص الأحمال



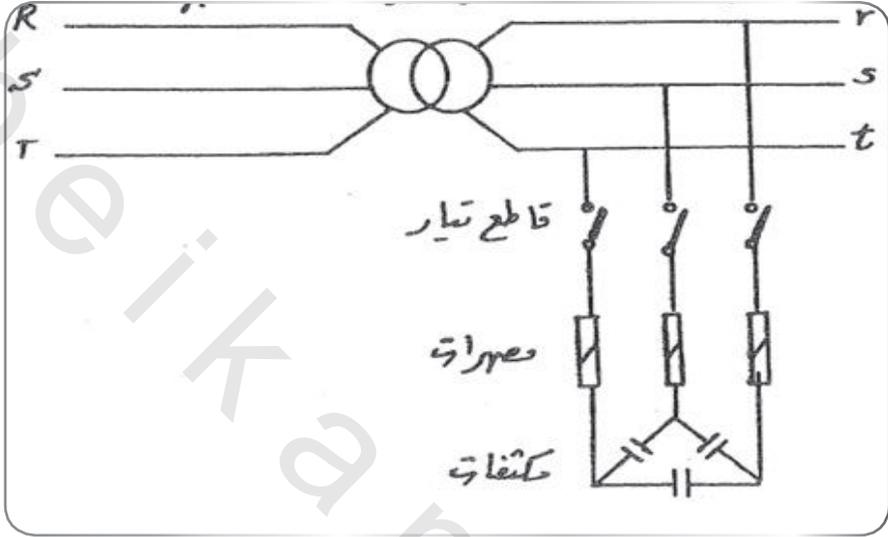
شكل (109) تحسين معامل القدرة باستخدام Capacitor Bank

### العوامل التي يتوقف عليها معامل القدرة للمحرك:

- 1- معامل القدرة للمحرك يزيد بزيادة القدرة المسحوبة من المحرك .
- 2- معامل القدرة للمحرك يزيد بزيادة سرعة المحرك.
- 3- معامل القدرة للمحرك يزيد بزيادة حمل المحرك.

### تحسين معامل القدرة لمحولات التوزيع:

لتحسين معامل القدرة لمحولات التوزيع يتم توصيل مكثفات على الملف الثانوي (توصيل مباشر) وذلك لمعادلة قدرة المغنطة بالمحول والشكل التالي يوضح كيفية توصيل المكثفات على المحول.



شكل (110) تحسين معامل القدرة لمحولات التوزيع

والجدول التالي يبين قيمة المكثفات اللازم إضافتها لمحولات التوزيع:

قدرة المكثفات Kvar عند الجهود			قدرة المحول KVA
٣٠/٢٥ ك.ف	٢٠/١٥ ك.ف	١٠/٥ ك.ف	
٥٥	٥٠	٤٥	١٠٠٠ ك.ف.أ
٤٥	٣٥	٣٠	٧٥٠ ك.ف.أ
٣٠	٢٥	٢٠	٥٠٠ ك.ف.أ
١٠	٨	٦	١٠٠ ك.ف.أ

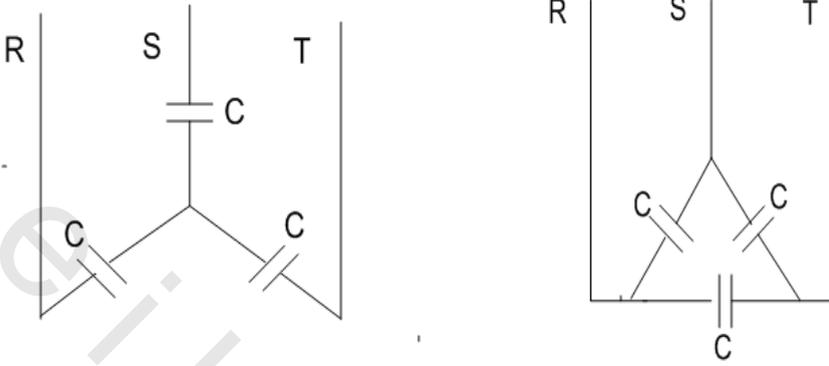
والجدول التالي يوضح قدرات المكثفات وتيار كل مكثف والكابل المناسب

لكل مكثف:

طريقة توصيل وحدات المكثف:

K var	$\mu F (3 \times C\Delta)$	Ampere (A)	Copper cable size (mm <sup>2</sup> )
3	3 x 19.5	3 x 4.33	1.5
4	3 x 26.5	3 x 5.77	1.5
5	3 x 33	3 x 7.2	1.5
7.5	3 x 50	3 x 10.8	1.5
10	3 x 66	3 x 14.4	1.5
12.5	3 x 83	3 x 18	2.5
15	3 x 100	3 x 21.6	4
20	3 x 133	3 x 28.8	6
25	3 x 166	3 x 36.1	10
30	3 x 200	3 x 43.4	16
35	3 x 233	3 x 50.6	25
40	3 x 266	3 x 57.6	25
50	3 x 333	3 x 72.2	35
60	3 x 400	3 x 86.8	50
75	3 x 499	3 x 108	70
100	3 x 666	3 x 144	95
180		3 x 260	240

دائماً تم توصيل وحدات المكثفات على شكل دلتا وذلك للحصول على سعة أعلى مما لو كانت على شكل ستار



شكل (111) طرق توصيل المكثفات

في حالة التوصيل على شكل دلتا تكون السعة المكافئة بين الفازين S & R =  $3C/2$

وفي حالة التوصيل على شكل نجمة تكون السعة المكافئة بين الفازين S & R =  $C/2$

فلاحظ أنه في حالة التوصيل على شكل دلتا تكون السعة المكافئة أعلى من السعة المكافئة في حالة التوصيل نجمة.

**تجنب عملية الزيادة في تصحيح معامل القدرة Over**

**:correction**

يجب الحذر من المبالغة في تصحيح معامل القدرة لأنه عند وصول معامل القدرة إلى الوحدة ecanoseR rotcaf rewop ytinU تحدث حالة الرنين ويحدث الآتي:

1- المحاثة الحثية تساوي المحاثة السعوية ( $CX = LX$ )

2- المعاوقة في هذه الحالة تساوي المقاومة المادية فقط ( $R = Z$ ).

3- حيث إن المقاومة المادية للأحمال صغيرة جداً فإنه يتولد تيار عالٍ جداً

$$.(V / R = I)$$

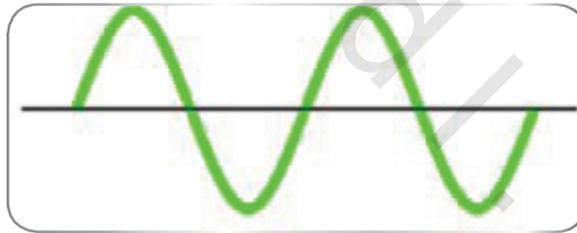
## ملحق 2

التوافقيات Harmonics

## مقدمة

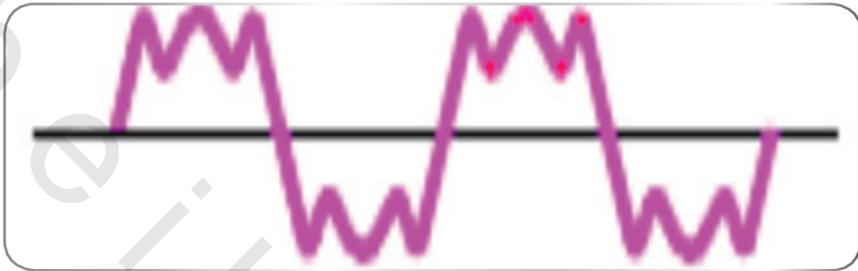
عندما تحدثنا عن معامل القدرة ذكرنا أنه نتيجة لوجود أحمال حثية وأحمال سعوية، فإنه يوجد فرق في الطور بين موجة الجهد وموجة التيار بمقدار من 0 إلى 90 درجة، ولكن نتيجة لوجود أحمال غير خطية في الشبكات الكهربائية (دوائر الكترولنيات القوى، مصابيح التفريغ، أفران القوس الكهربائي، الأجهزة المحتوية على دوائر الكترولنية) ظهرت مشكلة أخرى هي إشارات كهربائية غير مرغوب فيها تظهر مركبة على الموجة الحاملة الأساسية Fundamental بالشبكات الكهربائية وتردها عبارة عن مضاعفات التردد الأساسي وتتسبب في تشوية شكل موجة التيار أو موجة الجهد أو الاثنان معا وهذه الموجات تسمى التوافقيات Harmonics.

ففي المولدات الكهربائية بمحطات توليد الكهرباء من المفروض أن يتم توليد جهود متزنة ذات موجة جيبيية ثابتة المقدار والتردد، كما في الشكل التالي:



شكل (112) موجة جيبيية لها تردد واحد

ولكن هذا الهدف لا يتحقق لأن المولدات المتزامنة Synchronous Generator تولد جهوداً لها موجات غير نقية، وذلك بسبب طبيعة اللف لهذه المولدات، كما أن الأحمال في منظومات القوي الكهربائية وخصوصاً الصناعية لها طبيعة غير خطية لها تأثير على الشكل الجيبي لموجات الجهد والتيار.

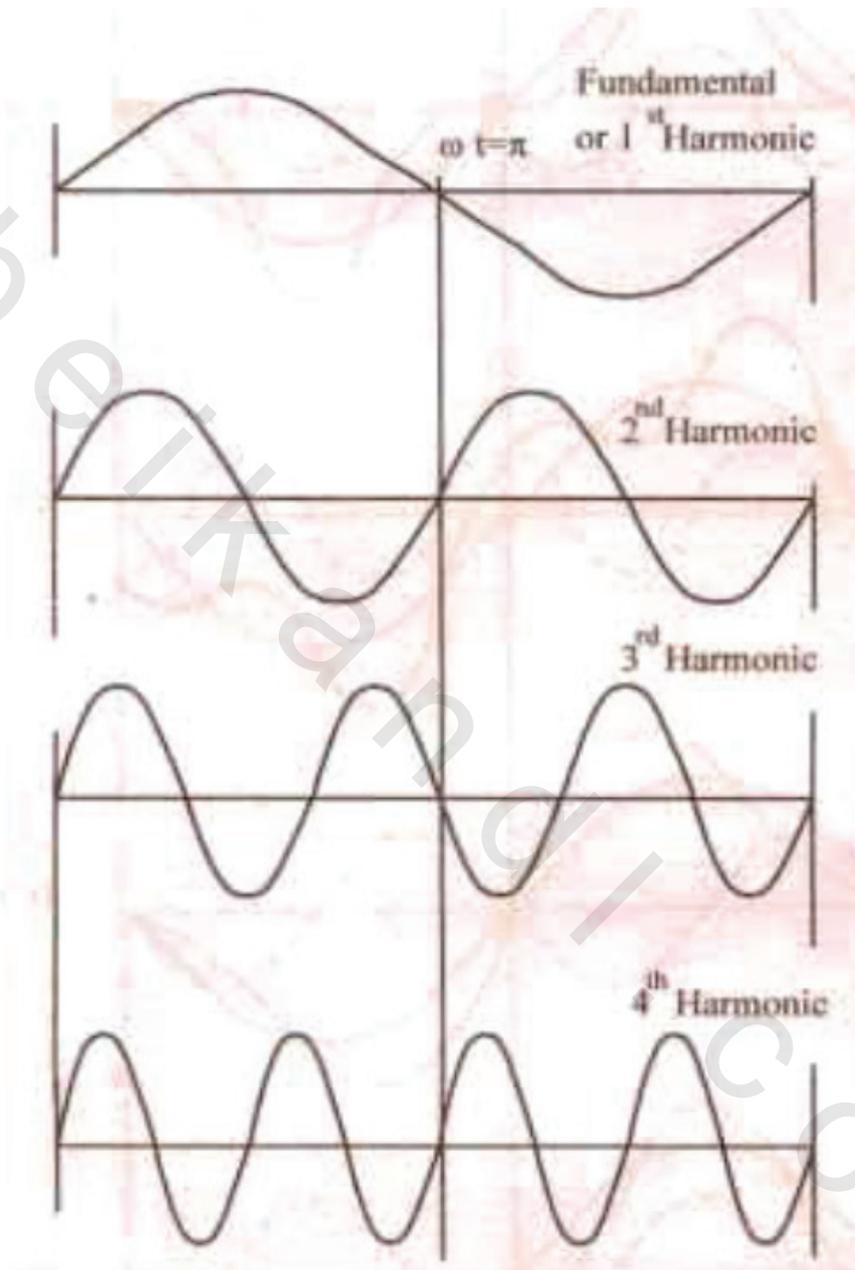


شكل (113) موجة جيبية بها توافقيات

### تحليل التوافقيات:

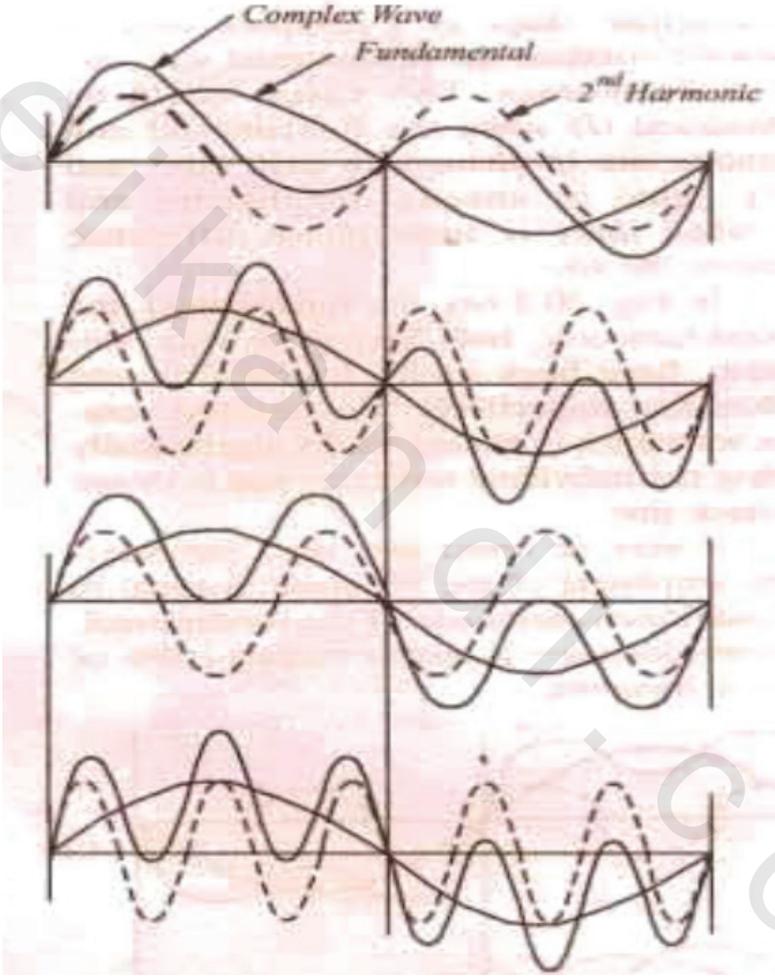
العالم فوريير هو أول من قام بتحليل التوافقيات مستخدماً متسلسلة معينة تم تسميتها متسلسلة فوريير حيث يتم تحليل التوافقيات إلى حاصل جمع عدد من الموجات الجيبية ذات ترددات مضاعفة للتردد الأساسي والذي قيمته 50 هيرتز، فالموجة الجيبية التي لها نفس تردد الموجة الأصلية تسمى المركبة الأساسية Fundamental Component أما باقي الموجات الجيبية فتسمى بالتوافقيات Harmonics.

وتسمى كل توافقية حسب قيمة ترددها بالنسبة للتردد الأساسي وليس حسب مقدارها فالتوافقية التي ترددها  $50 \times 2 = 100$  HZ تسمى بالتوافقية الثانية والتوافقية التي ترددها  $50 \times 3 = 150$  HZ تسمى بالتوافقية الثالثة والتوافقية التي ترددها  $50 \times 4 = 200$  HZ تسمى بالتوافقية الرابعة، كما في الشكل التالي:



شكل (114) موجة جيبية أساسية وموجات توافقيات ثانية وثالثة ورابعة

والشكل التالي يوضح شكل الموجة الكلية Complex Wave والموجة الأساسية Fundamental وكذلك نوع التوافقيات الموجودة، فالموجة الأولى بها توافقية ثانية والموجة الثانية بها توافقية رابعة والموجة الثالثة بها توافقية ثالثة والموجة الرابعة بها توافقية خامسة.



شكل (115) الموجة الكلية والتوافقيات المكونه لها

## أنواع التوافقيات:

يمكن تقسيم التوافقيات حسب ترددتها إلى نوعين رئيسيين هما:

1- توافقيات زوجية Even Harmonics :

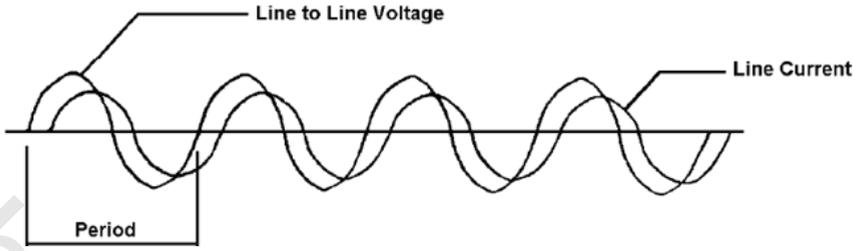
هي التوافقيات التي يكون ترددتها زوجيا، ويكون عبارة عن عدد زوجي مضروب في التردد الأساسي  $2 \times 50 - 4 \times 50 - 6 \times 50 - 8 \times 50 \dots\dots\dots$

2- توافقيات فردية Odd Harmonics :

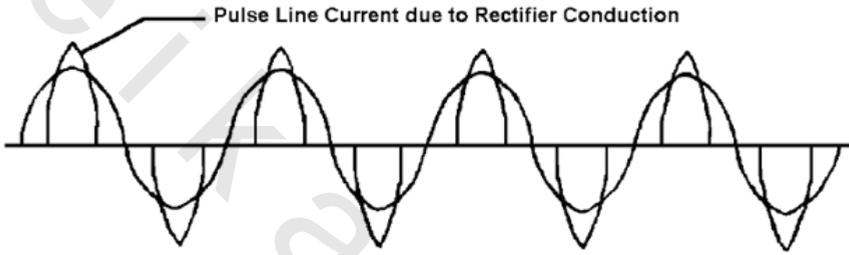
هي التوافقيات التي يكون ترددتها فردي ويكون عبارة عن عدد فردي مضروب في التردد الأساسي  $3 \times 50 - 5 \times 50 - 7 \times 50 - 9 \times 50 \dots\dots\dots$

## أسباب ظهور التوافقيات:

تظهر التوافقيات في نظم القوى الكهربائية عادة بسبب وجود أحمال لاخطية Non Linear Loads وهذه الأحمال تختلف تماما عن الأحمال الخطية Linear Loads من حيث إن التيار المار بها لا يكون على علاقة خطية مع الجهد في هذا الحمل وبذلك فإن شكل موجة التيار لا يشبه شكل موجة الجهد (فالوضع الطبيعي أن موجة التيار تشبه موجة الجهد من حيث كونها موجة جيبيية والفرق بينهم هو وجود إزاحة في الطور يختلف باختلاف الحمل مقاومة مادية أو حمل حثي أو حمل سعوي). والشكل التالي يوضح الشكل الموجي للتيار عند مروره في حمل خطي وآخر لا خطي، حيث نلاحظ أن شكل موجة التيار في الحمل الخطي تكون موجة جيبيية أما شكل موجة التيار في الحمل اللاخطي يكون عبارة عن نبضات وهذه النبضات تختلف من حمل لآخر.



شكل (116) موجة الجهد والتيار في الحمل الخطي



شكل (117) موجة الجهد والتيار في الحمل الغير الخطي

#### مصادر توليد التوافقيات:

- 1- أفران القوس الكهربائي Electric Arc Furnace : حيث تعتبر هذه الأفران من أهم مصادر توليد التوافقيات وتستخدم هذه الأفران في صناعة الصلب.
- 2- المبدلات الكهربائية Electrical Converters : وهي دوائر التوحيد التي تستخدم في تحويل التيار المتردد إلى مستمر والعكس وتتكون من الدايمود Diodes الترانزستور Transistors والثايرستور Thyristors وتستخدم هذه المبدلات في صناعة الكمبيوتر وفي معظم الأجهزة الإلكترونية وفي أنظمة الـ UPS للحماية من انقطاع الكهرباء وفي أجهزة التحكم في سرعة المحركات.
- 3- الآلات الدوارة Rotating Machines (المولدات والمحركات التزامنية والحثية): نتيجة الأسنان والفجوات في العضو الدوار وعدم انتظام الثغرة أو الفجوة الهوائية ونتيجة ممانعة السلك المصنوعة منه الملفات.
- 4- المحولات الكهربائية Transformers: نتيجة التشبع والتيارات الدوامية.
- 5- مصابيح الفلوريسنت Fluorescent Lamps.

## الأضرار الناتجة عن التوافقيات:

- 1- نقصان المفاعلة السعوية للمكثفات XC وذلك نتيجة لزيادة التردد نتيجة لوجود التوافقيات مما يؤدي إلى زيادة التيار المار بها وبالتالي قد يسبب تلف المكثفات.
- 2- تؤثر التوافقيات على كروت أجهزة الحماية مما يسبب تكرار الفصل الخطأ Malfunction كما تعمل التوافقيات على تعطيل عمل نظم التحكم وأجهزة القياس وأجهزة الحماية التي تعتمد في عملها على التردد الأساسي.
- 3- تؤثر التوافقيات تأثيرا واضحا على أجهزة الاتصالات حيث تحدث تداخل في خطوط الاتصالات ويحدث تشويه للإشارات المنقولة كما تؤثر على تشغيل أجهزة الكمبيوتر.
- 4- التأثير على الآلات الدوارة والمحولات فهذه المعدات مصممة للعمل على تردد 50 أو 60، هيرتز فعند زيادة التردد نتيجة لوجود التوافقيات تقل كفاءة الأجهزة الكهربائية كالمحولات والأجهزة الدوارة وذلك بسبب زيادة المفاقيد الحديدية لأنها تتناسب طرديا مع مربع التردد وزيادة المفاقيد النحاسية بسبب زيادة مقاومتها نتيجة لظاهرة الـ Skin Effect التي تزيد بزيادة التردد وهذه المفاقيد تخرج على هيئة طاقة حرارية وبالتالي تسبب ارتفاع درجة حرارة الجهاز مما قد يؤدي إلى تلفه.
- 5- عند استخدام المكثفات لتحسين معامل القدرة، فعند قيمة معينة للمكثفات قد نصل إلى تردد الرنين وهو التردد الذي تتساوى فيه الممانعة الحثية مع الممانعة السعوية، وبالتالي تصبح المعاوقة في الدائرة هي المقاومة المادية فقط مما يؤدي إلى مرور تيار عالي قد يسبب في عمل أجهزة الحماية وفصل أجزاء من الشبكة دون وجود أي خطأ.
- 6- تسبب التوافقيات ارتفاع في درجة حرارة الموصلات والفيوز والقواطع بسبب ظاهرة الـ Skin Effect التي تسبب زيادة المقاومة للموصلات.
- 7- مقاومة موصلات الخطوط الكهربائية والكابلات ومقاومة ملفات المحولات تزيد بنسبة قد تصل إلى 30% للتوافقيات مقارنة للتردد الأساسي 50 هرتز.

### طرق إزالة التوافقيات:

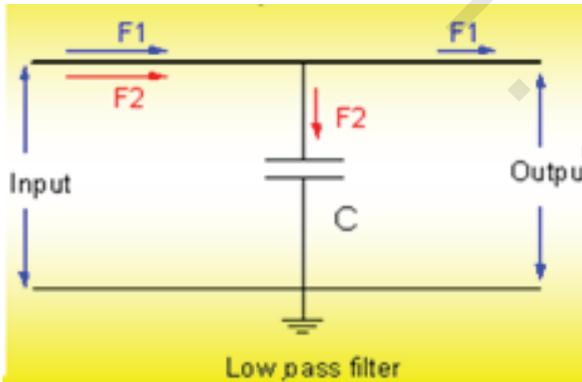
- 1- زيادة مساحة مقطع السلك لتقليل اثر التوافقيات.
- 2- ترحيل تردد الرنين فى مصادر التوافقيات الناتجة عن دوائر الحثية والسعوية.
- 3- زياده عدد نبضات التوحيد إذا كانت الموحدات هي مصدر التوافقيات.
- 4- تقليل وإعادة توزيع الأحمال بقدر المستطاع.
- 5- استخدام مرشحات (فلتر) filters.

### المرشحات filters:

إن الغرض الرئيسي من تركيب مرشحات التوافقيات هو التخلص من تيار أو جهد تردد معين، فعند التفكير في تركيب مرشحات يجب أولاً قياس تيارات وجهود التوافقيات في الجزء من الشبكة المراد تركيب المرشحات بها. ويتكون المرشح من مفاعلات Reactors ومكثفات Capacitors ومقاومات Resistances متصلة على التوالي أو التوازي أو التوالي والتوازي معاً.

### تصميم مرشح التردد المنخفض:

يتركب أبسط مرشح من مكثف واحد فقط، كما في الشكل التالي:



شكل (118) دائرة مرشح مكون من مكثف واحد

و سوف نرى كيف يعمل المكثف كفلتر من المعادلة البسيط التي تحدد قيمة ممانعة المكثف و المعادلة هي

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

فإذا كان لدينا أحمال غير خطية nonlinear وكانت موجة التيار لهذا الحمل تتكون من التردد الأساسي (F1 = 50 Hz) وتردد توافقيات من الدرجة السابعة (F2 = 350 Hz).

فإذا تم تركيب فلتر، كما في الشكل السابق، وكانت قيمة المكثف 2 ميكروفاراد فنلاحظ الآتي :

$$X_{C1} = 1 / 2 \times 3.14 \times 50 \times 0.000002 = 1592.4 \Omega$$

$$X_{C2} = 1 / 2 \times 3.14 \times 350 \times 0.000002 = 227.5 \Omega$$

من المعادلتين السابقتين نجد أن مسار التيار الذي يتكون من التردد الأساسي F1 في اتجاه الحمل أسهل من مساره في اتجاه المكثف ، لأن ممانعة المكثف في هذه الحالة تكون أكبر بكثير من معاوقة الحمل و مسار التيار الذي يتكون من التوافقية السابعة F2 يكون في اتجاه المكثف أسهل من مساره في اتجاه الحمل لأن ممانعة المكثف في هذه الحالة تكون أقل من معاوقة الحمل و بذلك نكون قد فصلنا بين الترددين . وهذا ببساطة شديدة هو أساس عمل المرشحات للتخلص من التوافقيات.