# القدرة الكهربائية

إعداد

المهندس مثنى محمد كاظم توفيق

رئيس مهندسين

المديرية العامة لتوزيع كهرباء الكرخ



٢٠١٧

# المحتويات

المقدمة ..... ٣

الفصل الاول : دوائر التيار المتناوب (AC) ..... ٤

دائرة مقاومة خالصة ..... ٤

دائرة المحاثة ..... ٦

دائرة المتسعة ..... ٧

دائرة مقاومة ومحاثة ومتسعة ..... ٩

الفصل الثاني : القدرة الكهربائية ..... ١٥

تصنيفات القدرة الكهربائية ..... ١٦

١- القدرة الحقيقية أو الفعالة (Active power) ..... ١٦

٢- القدرة غير الفعالة (Reactive power) ..... ١٦

٣- القدرة الظاهرية (Apparent power) ..... ١٧

القدرة في الدوائر ثلاثية الطور ..... ١٧

١- في حالة ربط (Y) ..... ١٨

٢- في حالة ربط (Δ) ..... ١٩

معامل القدرة (Power factor = cos φ) ..... ٢١

تأثير معامل القدرة المنخفض ..... ٢٥

تحسين معامل القدرة (Improving Power Factor) ..... ٢٥

تأثير معامل القدرة المرتفع ..... ٣١

معامل القدرة في القابلوات وخطوط النقل..... ٣٢

الفصل الثالث : إستخدام المتسعات في الشبكة الكهربائية..... ٣٤

قيم المتسعات وفق (IEEE Standard. 18-2002) ..... ٣٤

تصنيفات مجموعات المتسعات (capacitor banks)..... ٣٤

١- المتسعات الثابتة القيمة ..... ٣٥

٢- المتسعات المتغيرة القيمة (switched capacitors)..... ٣٦

تركيب مجموعات المتسعات (capacitor banks)..... ٤٠

الموقع الأمثل لمجموعة المتسعات على الشبكة ..... ٤١

محاذير ربط المتسعات على الشبكة ..... ٤١

المصادر..... ٤٢

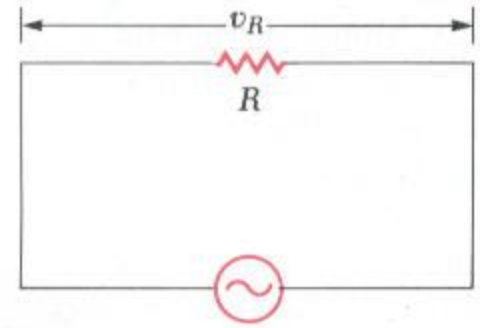
## المقدمة

لأن الطاقة الكهربائية المجهزة والمستهلكة تعد العنصر الأساسي المحدد لحجم الشبكة ونجاح أداءها، ومعيار مقدار الربح والخسارة المالية والإستثمار في الشبكة الكهربائية. لذا سنقدم في هذا الكراس المتواضع شرحاً عن عناصر الشبكة ونوع الحمل والقدرة الكهربائية التي يستهلكها في شبكات التوزيع وكيفية إجراء حساباتها والتي يحتاجها مهندسي التوزيع سواءً العاملين في الشبكات الهوائية أو في الدراسات أو التصاميم وكذلك في تشغيل البرامجيات المتخصصة بتحليل وتخطيط الشبكات. راجين المولى عز وجل أن يوفقنا لخدمة العراق العزيز.

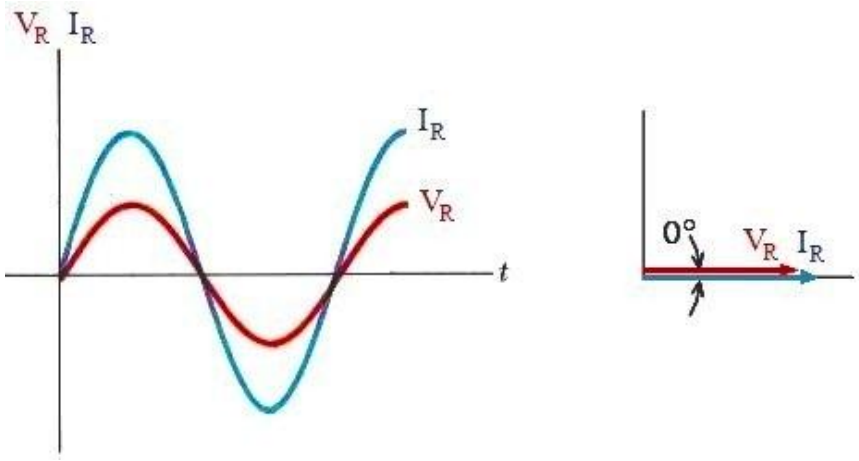
# الفصل الاول : دوائر التيار المتناوب (AC)

تكون عناصر الدوائر الكهربائية في التيار المستمر (DC) على شكل مقاومات فقط، بينما في التيار المتناوب (AC) فعناصر الدوائر الكهربائية تكون على شكل ممانعات. والممانعة هي المعارضة أو المعاوقة التي يلاقيها التيار المتناوب أثناء مروره في الموصل، وتنقسم إلى ثلاثة أنواع (المقاومة، والرادة الحثية وهي الممانعة التي تبديها المحاثة، والرادة السعوية وهي الممانعة التي تبديها المتسعة). ووحدة قياس الممانعة هي الأوم ويرمز له (Ω).

## دائرة مقاومة خالصة




في هذه الحالة نلاحظ أنه لا يوجد فرق طور بين التيار والفولتية (In phase) وقيمة القدرة تساوي حاصل ضرب التيار في الجهد ولا تأخذ قيمة سالبة لأن حاصل ضرب سالبين موجب ، وترددها ضعف تردد المصدر، ويسمى هذا النوع من القدرة بالقدرة الحقيقية أو القدرة الفعالة (Active power). ويرمز للمقاومة بالحرف (R) ووحدة قياس المقاومة هي الأوم ويرمز له (Ω).



حساب قيمة المقاومة للموصل

$$R = \rho \frac{l}{A} \qquad \Omega$$

*ρ = resistivity (or specific resistance) depends on conductor material and its temperature. (Ω. m)*
*l = length of conductor (m)*
*A = Actual conductor area ($m^2$)*

*$\rho = 1.724 \times 10^{-8}$ Ω. m for Copper*
*$\rho = 2.826 \times 10^{-8}$ Ω. m for Aluminum*

ومن المعلوم عند زيادة درجة الحرارة تزداد قيمة المقاومة وبشكل طردي ووفق المعادلة أدناه حيث يمكن حساب قيمة المقاومة لأي درجة حرارة بإستخدام قيمة المقاومة في درجة ($20C^o$) كمرجع والمتوفرة في جداول الأسلاك، والمعامل الحراري للمقاومة عند نفس درجة الحرارة ($\alpha_{20}$) والمذكور أدناه ولكل نوع من الموصلات.

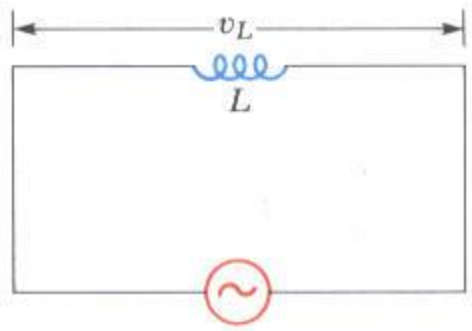
$$R_2 = R_1[1 + \alpha(t_2 - t_1)] \qquad \Omega$$

*$R_1$ = conductor resistance at temperature $t_1$ ° C (Ω)*
*$R_2$ = conductor resistance at temperature $t_2$ ° C (Ω)*
*α = temperature coefficient of resistance of conductor material*
*$t_1$ & $t_2$ = different conductor temperatures (in ° C)*
*$\alpha_{20}$ = 0.00393 for Copper*
*$\alpha_{20}$ = 0.00404 for Aluminum*
*$\alpha_{20}$ = 0.00347 for Aluminum Alloy*

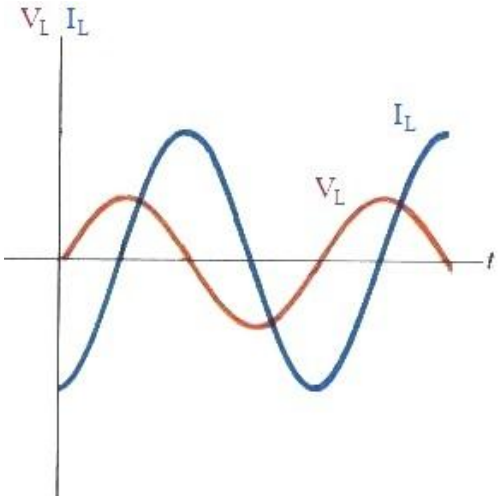
حساب قيمة المقاومة من حسابات الفولتية والتيار وفق قانون أوم

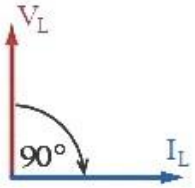
$$R = \frac{V}{I} \qquad \ldots\ldots\ldots \textit{Ohm's law}$$

## دائرة المحاثة




الحث (Inductance) هو خاصية فيزيائية تعكس قدرة الملف على تركيز الفيض المغناطيسي، وتؤدي إلى ممانعة الدائرة الكهربائية لأي تغيير في التيار الكهربائي. فالمقاومة تعارض مرور التيار بينما المحاثة تعارض التغيير في مرور التيار لأن التيار متناوب وتتغير شدته لذا تعتمد الرادة الحثية (الممانعة بسبب المحاثة) على التردد. ويرمز للمحاثة بالحرف (L) ووحدة قياس المحاثة هي الهنري ويرمز له (H). ويكون طور التيار المتناوب في المحاثة المثالية متأخراً عن طور الفولتية بمقدار ٩٠ °.



ويعرف جيب تمام زاوية فرق الطور بين التيار والفولتية بمعامل القدرة (power factor)، لذا فمعامل القدرة للمحاثة المثالية = صفر. أي إنها لا تستهلك قدرة كهربائية على شكل حرارة. واذا أخذنا مقاومة السلك بالإعتبار فإن فرق الطور سيقل عن ٩٠ $^{o}$ ويكون معامل القدرة صغير ولكن أكبر من الصفر. ونقول إن المحاثة الواقعية لها معامل قدرة لاحق (lagging power factor).

حساب قيمة المحاثة لمجموعة من المحاثات

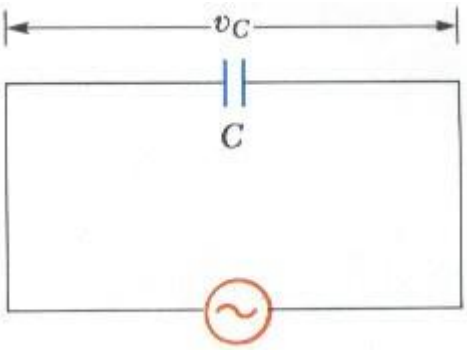
$$L_{eq} = L_1 + L_2 + \ldots + L_n \quad \ldots\ldots \text{for series combination}$$

$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \ldots + \frac{1}{L_n} \quad \ldots\ldots \text{for parallel combination}$$

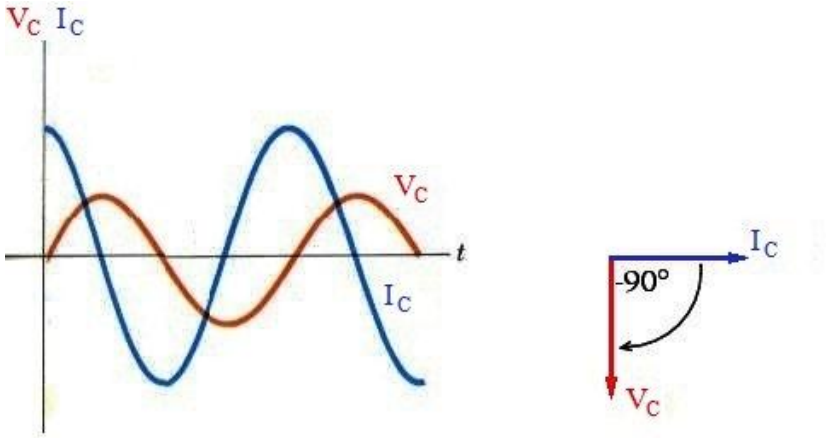
حساب قيمة الرادة الحثية (Inductive Reactance) وفق المعادلة

$$X_L = 2\pi f L$$

## دائرة المتسعة




السعة (capacitance) هي خاصية فيزيائية تعكس قدرة المتسعة أو المكثف على تخزين الشحنة الكهربائية، وتؤدي إلى ممانعة الدائرة الكهربائية. وبذلك فهي عكس المحاثة لأن الرادة السعوية (الممانعة بسبب المتسعة) تتناسب عكسياً مع تردد التيار المتناوب. ويرمز للمتسعة بالحرف (C) ووحدة قياس السعة هي الفاراد ويرمز له (F). ويكون طور التيار المتناوب في المتسعة المثالية متقدماً على طور الفولتية بمقدار ٩٠ $^{o}$.




وكما سبق يعرف جيب تمام زاوية فرق الطور بين التيار والفولتية بمعامل القدرة (power factor)، لذا فمعامل القدرة للمتسعة المثالية = صفر. أي إنها لا تستهلك قدرة كهربائية على شكل حرارة. واذا أخذنا مقاومة العازل بين لوحي المتسعة بالإعتبار فإن فرق الطور سيقل عن ٩٠ $^{o}$ ويكون معامل القدرة صغير ولكن أكبر من الصفر. ونقول إن المتسعة الواقعية لها معامل قدرة متقدم (leading power factor).

حساب قيمة السعة لمجموعة من المتسعات

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \ldots + \frac{1}{C_n} \quad \ldots\ldots \textit{for series combination}$$

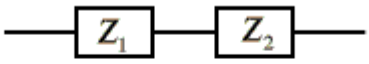
$$C_{eq} = C_1 + C_2 + \ldots + C_n \quad \ldots\ldots \textit{for parallel combination}$$

حساب قيمة الرادة السعوية (Capacitive Reactance) يكون وفق المعادلة

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

## دائرة مقاومة ومحاثة ومتسعة

تحسب قيم الممانعات على التوالي

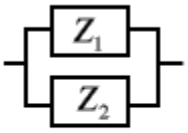



$$Z_1 + Z_2 = (R_1 + jX_1) + (R_2 + jX_2)$$
$$= (R_1 + R_2) + j(X_1 + X_2) = R_{eq} + jX_{eq}$$

$$|Z| = \sqrt{R_{eq}^2 + X_{eq}^2} \qquad \phi = \tan^{-1}\frac{X_{eq}}{R_{eq}}$$

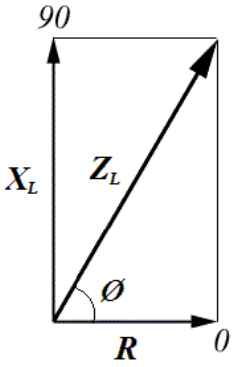
وتحسب قيم الممانعات على التوازي

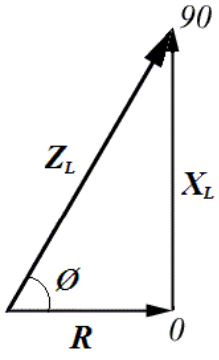
$$\frac{1}{Z_{eq}} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}$$




$$Z_{eq} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} \qquad Z_{eq} = R_{eq} + jX_{eq} = |Z|e^{j\phi}$$

$$Z_{equiv} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{(R_1 + jX_1)(R_2 + jX_2)}{(R_1 + R_2) + j(X_1 + X_2)} = R_{eq} + jX_{eq} = |Z|e^{j\phi}$$



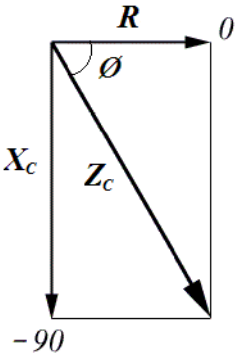



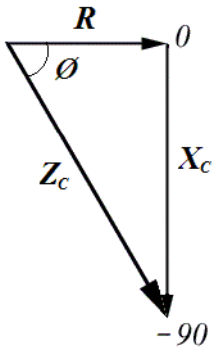
$$Z_L = R + jX_L$$

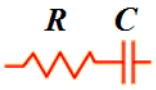
$$Z_L = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$\emptyset = tan^{-1}\frac{X_L}{R}$$

$$cos\ \emptyset = \frac{R}{Z_L}$$



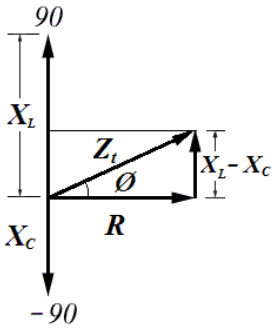



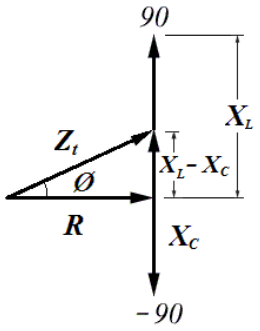

$$Z_C = R - jX_C$$

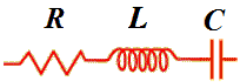
$$Z_C = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

$$\emptyset = \tan^{-1}\frac{X_C}{R}$$

$$\cos\emptyset = \frac{R}{Z_L}$$



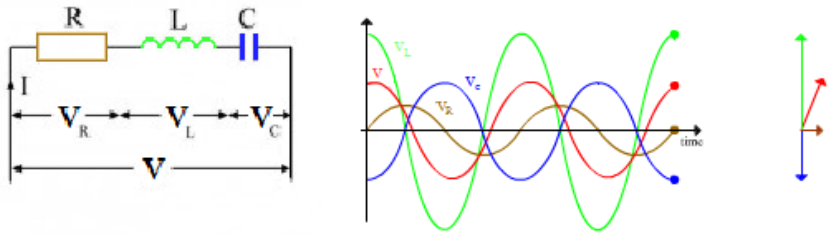

$$Z_L = R + j(X_L - X_C)$$

$$Z_L = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$\emptyset = \tan^{-1}\frac{X_L - X_C}{R}$$

$$\cos\emptyset = \frac{R}{Z_t}$$

## مثال (١)




A choke of inductance 0.318 H resistance 30Ω is connected in series with 53μF capacitance across a 24V, 50Hz supply. Calculate the circuit impedance, current and phase angle. Draw scale phasor and impedance diagrams.

$$X_L = 2\pi f L = 2\pi \times 50 \times 0.318 = 100\Omega$$

$$X_C = \frac{10^6}{2\pi f C'} = \frac{10^6}{2\pi \times 50 \times 33} = 60\Omega$$

$$Z = \sqrt{\left[R^2 + (X_L - X_C)^2\right]} = \sqrt{\left[30^2 + (100-60)^2\right]} = 50\Omega$$

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{24}{50} = 0.48A$$

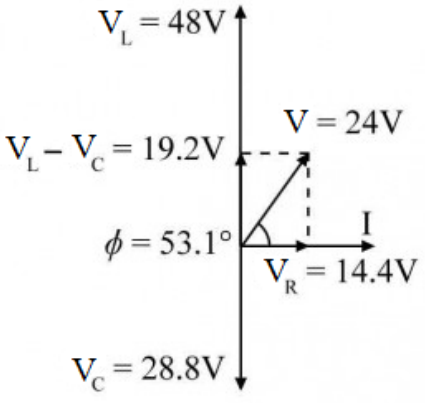
$$V_L = IX_L = 0.48 \times 100 = 48V$$

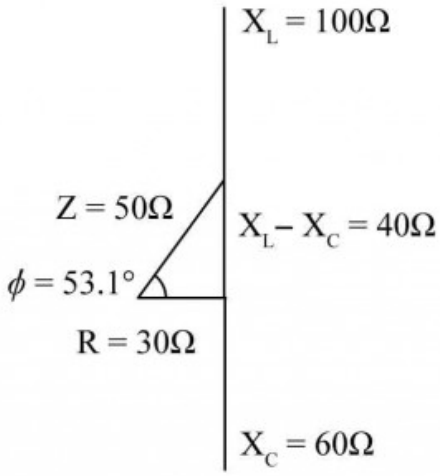
$$V_C = IX_C = 0.48 \times 60 = 28.8V$$

$$V_R = IR \ = 0.48 \times 30 = 14.4V$$

المجموع لا يساوي الفولتية الكلية لأن الجمع إتجاهي وهذه القيم زواياها مختلفة

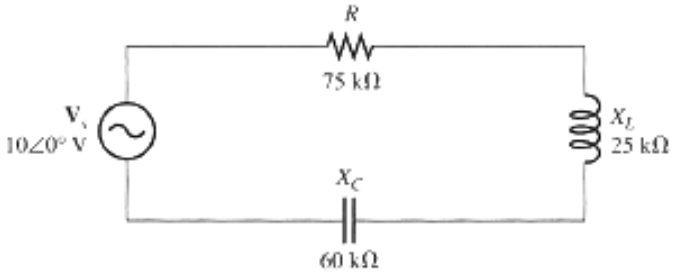
$$\tan\phi = \frac{V_L - V_C}{V_R} = \frac{48 - 28.8}{14.4} = 1.33 \quad \phi = 53.1^\circ \quad \text{lagging}$$



## مثال (٢)

*Question* Find the current and the voltages across each component in Figure . Express each quantity in polar form, and draw a complete voltage phasor diagram.




*Solution* First, find the total impedance.

$$\mathbf{Z} = R + jX_L - jX_C = 75\,\text{k}\Omega + j25\,\text{k}\Omega - j60\,\text{k}\Omega = 75\,\text{k}\Omega - j35\,\text{k}\Omega$$

Convert to polar form for convenience in applying Ohm's law.

$$\mathbf{Z} = \sqrt{R^2 + X_{tot}^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{X_{tot}}{R}\right)$$

$$= \sqrt{(75\,\text{k}\Omega)^2 + (35\,\text{k}\Omega)^2}\angle -\tan^{-1}\left(\frac{35\,\text{k}\Omega}{75\,\text{k}\Omega}\right) = 82.8\angle -25^\circ\,\text{k}\Omega$$

where $X_{tot} = |X_L - X_C|$.

Apply Ohm's law to find the current.

$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{V}_s}{\mathbf{Z}} = \frac{10\angle 0^\circ\,\text{V}}{82.8\angle -25^\circ\,\text{k}\Omega} = \mathbf{121\angle 25.0^\circ\,\mu A}$$

Now, apply Ohm's law to find the voltages across $R$, $L$, and $C$.

$$\mathbf{V}_R = \mathbf{IR} = (121\angle 25.0^\circ\,\mu\text{A})(75\angle 0^\circ\,\text{k}\Omega) = \mathbf{9.08\angle 25.0^\circ\,V}$$

$$\mathbf{V}_L = \mathbf{IX}_L = (121\angle 25.0^\circ\,\mu\text{A})(25\angle 90^\circ\,\text{k}\Omega) = \mathbf{3.03\angle 115^\circ\,V}$$

$$\mathbf{V}_C = \mathbf{IX}_C = (121\angle 25.0^\circ\,\mu\text{A})(60\angle -90^\circ\,\text{k}\Omega) = \mathbf{7.26\angle -65.0^\circ\,V}$$

Notice that $V_L$ is leading $V_R$ by 90°, and $V_C$ is lagging $V_R$ by 90°. Also, there is a 180° phase difference between $V_L$ and $V_C$. If the current phasor were shown, it would be at

## مثال (٣)

A 60Ω resistor, a pure 0.382H inductor and a 66.3μF capacitor are connected in parallel to a 240V 50Hz supply (figure below). Calculate the current taken from the supply and its phase angle to the supply voltage. First calculate the current in each branch:

$$I_R = \frac{V}{R} = \frac{240}{60} = 4A \quad \text{in phase with voltage}$$

$$X_L = 2\pi f L = 2 \times 3.142 \times 0.382\Omega = 120\Omega$$

$$I_L = \frac{V}{X_L} = \frac{240}{120} = 2A \quad \text{lagging voltage by } 90^\circ$$

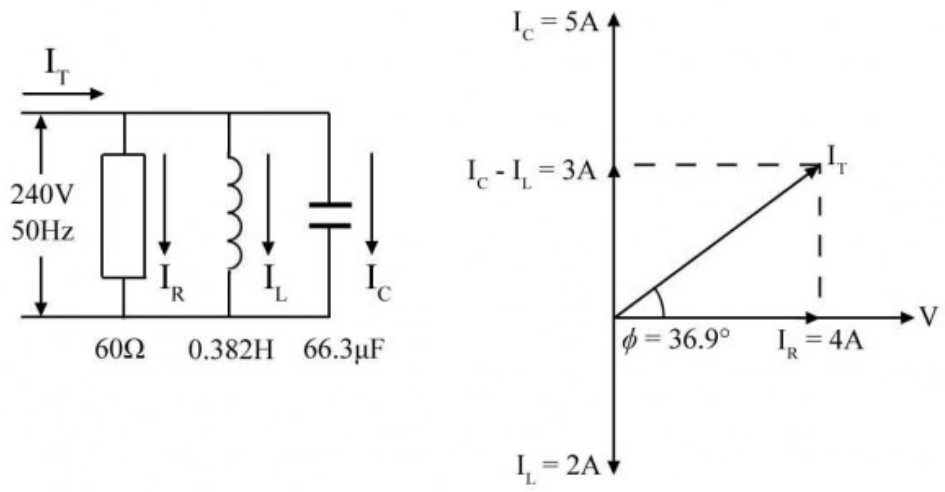
$$X_C = \frac{10^6}{2\pi f C'} = \frac{10^6}{2 \times 3.142 \times 50 \times 66.3} = 48\Omega$$

$$I_C = \frac{V}{X_C} = \frac{240}{48} = 5A \quad \text{leading voltage by } 90^\circ$$

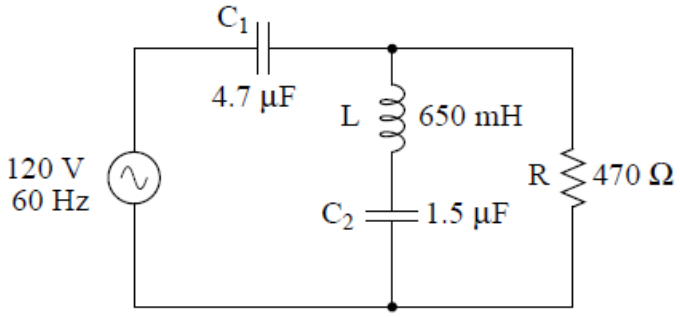
These currents drawn to scale are shown in figure below , $I_C$ is draw vertically up because in a capacitor current leads voltage by 90°, similarly $I_L$ is draw vertically down because in an inductor current lags voltage by 90°. Since $I_L$ is directly opposing $I_C$, their difference $I_C - I_L$ is 5 – 2 = 3A as shown. This current is added to $I_R$ by completing the parallelogram, and the phasor $I_T$ representing the current from the supply is draw in. By measurement:

$$I_t = 5A, \quad \text{and} \quad \phi = 36.9^\circ$$

Thus the current is 5A, leading the supply voltage by 36.9°.



**مثال (٤)**




*Reactances and Resistances:*

| | |
|---|---|
| $X_{C1} = \frac{1}{2\pi f C_1}$<br>$X_{C1} = \frac{1}{(2)(\pi)(60\ \text{Hz})(4.7\ \mu\text{F})}$<br>$X_{C1} = 564.38\ \Omega$ | $X_L = 2\pi f L$<br>$X_L = (2)(\pi)(60\ \text{Hz})(650\ \text{mH})$<br>$X_L = 245.04\ \Omega$ |
| $X_{C2} = \frac{1}{2\pi f C_2}$<br>$X_{C2} = \frac{1}{(2)(\pi)(60\ \text{Hz})(1.5\ \mu\text{F})}$<br>$X_{C2} = 1.7684\ \text{k}\Omega$ | $R = 470\ \Omega$ |

$Z_{C1} = 0 - j564.38\ \Omega$ *or* $564.38\ \Omega \angle -90^\circ$

$Z_{L\,-\,C_2} = 0 + j245.04 - j1.7684\text{k}\ \Omega$

$Z_{L\,-\,C_2} = -j1.5233\text{k}\ \Omega$ *or* $1.5233\ \Omega \angle -90^\circ$

$Z_R = 470 + j0\ \Omega$ *or* $470\ \Omega \angle 0^\circ$

$$Z_{R//(L--C2)} = \frac{1}{\frac{1}{Z_R} + \frac{1}{Z_{L--C2}}} = 429.15 - j132.41$$

$$= 449.11\ \Omega \angle -17.147^\circ$$

$$Z_{total} = Z_{C1} + Z_{R//(L--C2)} = 429.15 - j696.79$$

$$= 818.34\ \Omega \angle -58.371^\circ$$

$$I_{total} = \frac{V}{Z_{total}} = \frac{120 \angle 0^\circ}{818.34\ \Omega \angle -58.371^\circ} = 146.64 \angle 58.371^\circ\ \text{mA}$$

# الفصل الثاني : القدرة الكهربائية

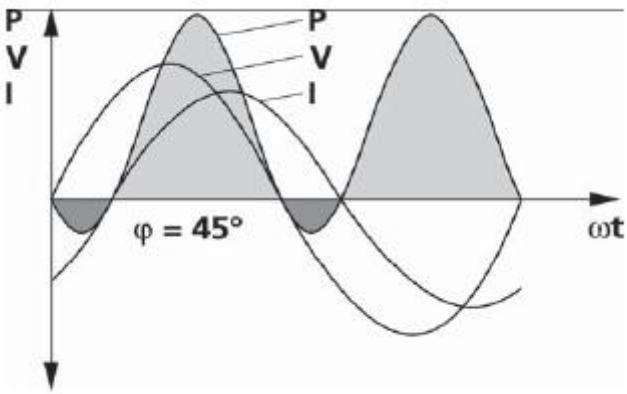
في دوائر (Active and reactive power) وعملياً قلما تجد دائرة مقاومة خالصة إلا وتختلط معها رادة حثية أو سعوية لأن الأجهزة بحاجة الى مجالات كهربائية ومغناطيسية في المحركات والمحولات وغيرها.

(والقدرة ليست حاصل ضرب التيار مع الجهد فقط بل يدخل عامل آخر يسمى عامل القدرة وهو جيب تمام الزاوية بين الجهد والتيار. لاحظ شكل موجة التيار يبين تأخيرها عن موجة الجهد بزاوية φ)

$$P = I * V * cos\ \varphi$$

وإذا كانت الدائرة ثلاثية الأطوار تكون المعادلة

$$P = \sqrt{3}\ * I * V * cos\ \varphi$$



## تصنيفات القدرة الكهربائية

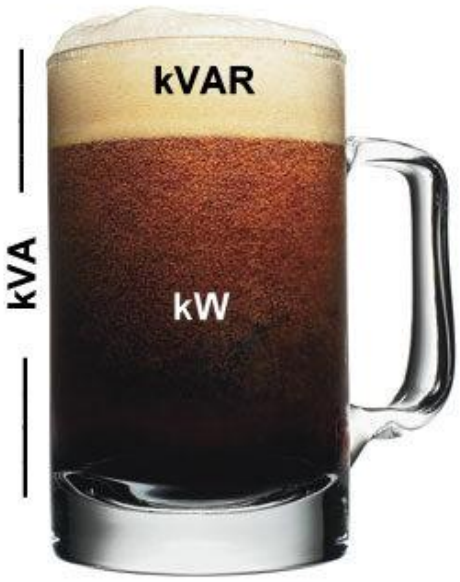
تصنف القدرة الكهربائية من حيث انجازها للشغل أو الطاقة الفعالة الى ثلاث أصناف :-

### ١- القدرة الحقيقية أو الفعالة (Active power)

وهي القدرة الفعلية التي تنجز شغل(work) أو طاقة فعالة. أي التي تستهلك في الدائرة بواسطة المقاومة (R) ويرمز لها (P) ووحدة قياسها (Watt).

### ٢- القدرة غير الفعالة (Reactive power)

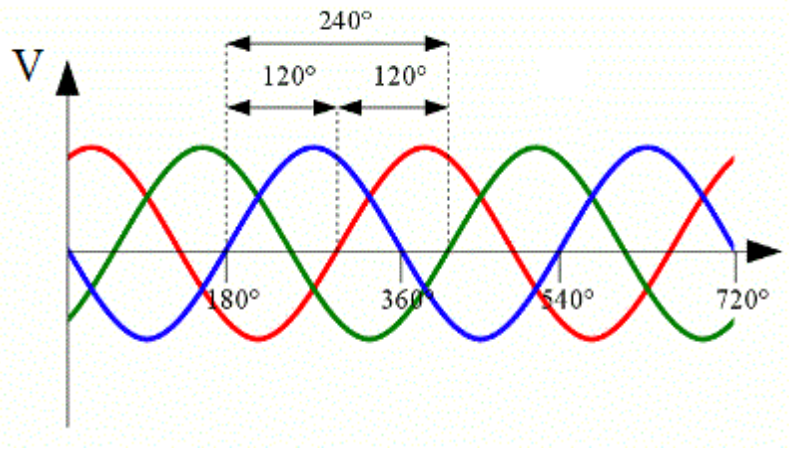
وهي القدرة العائدة الى المصدر وذلك لنشوء المجال المغناطيسي/ الكهربائي وتلاشيه (بواسطة الرادة الحثية والسعوية X) ويرمز لها (Q) ووحدة قياسها (Volt-Amps-Reactive) وتختصر (VAR). وقد تنجم عن متسعة أو عن محاثة أو كلاهما. في الحقيقة يمكن القول أنهما متعاكستان في الاتجاه (من الطبيعة الأساسية للمتسعة والملف حيث أن المتسعة يكون فيها أسبقية التيار والمحاثة يكون فيها تخلف التيار) ومتفقتان في التأثير على الدائرة الكهربائية. وليس لها فائدة بل مجرد تؤدي إلى زيادة التيار المجهز من المصدر. ويمكن تمثيلها على شكل كأس حيث تمثل الرغوة فيه القدرة غير الفعالة ووجودها يملأ حيز من الكأس بدون أي فائدة.

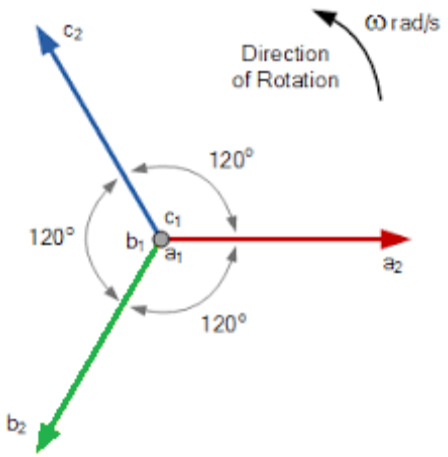


### ٣- القدرة الظاهرية (Apparent power)

وهي القدرة المسحوبة من المصدر (بواسطة الممانعة Z) ويرمز لها (S) ووحدة قياسها (VA). وهي حاصل ضرب الجهد والتيار وعدم اخذ فرق الطور بينهما في الاعتبار، أو حاصل الجمع الجبري للقدرة الفعالة والقدرة الغير الفعالة.

## القدرة في الدوائر ثلاثية الطور



## ١- في حالة ربط (Y)

تكون قيم الفولتية والتيار للخط وللطور كما موضحة أدناه

$$I_n = I_a + I_b + I_c = 0$$

$$V_p = |V_{an}| = |V_{bn}| = |V_{cn}|$$

$$V_{an} = V_p \angle 0°, \quad V_{bn} = V_p \angle -120°, \quad V_{cn} = V_p \angle +120°$$

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn} = V_p \angle 0° - V_p \angle -120° = \sqrt{3} V_p \angle 30°$$

$$V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} = \sqrt{3} V_p \angle -90°$$

$$V_{ca} = V_{cn} - V_{an} = V_{an} + V_{bn} = \sqrt{3} V_p \angle -150°$$

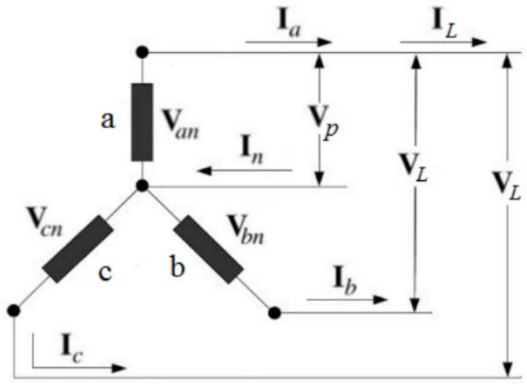
$$V_L = |V_{ab}| = |V_{bc}| = |V_{ca}|$$

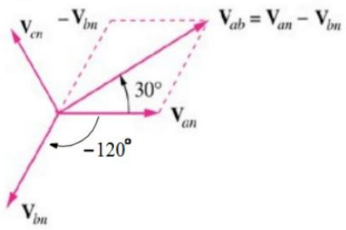
$$= \sqrt{3} |V_{an}| = \sqrt{3} |V_{bn}| = \sqrt{3} |V_{cn}| = \sqrt{3} V_p$$

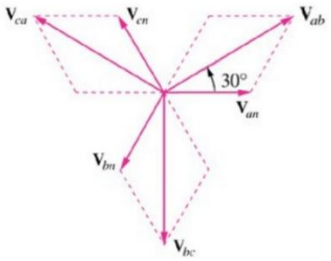
$$\boxed{V_L = \sqrt{3} V_p}$$

$$I_L = I_p = |I_a| = |I_b| = |I_c|$$

$$\boxed{I_L = I_p}$$




وعند تطبيق معادلة حساب القدرة لكل طور على حدة

$$P = I_p * V_p * \cos\varphi$$

وللأطوار الثلاثة تجمع قدرة كل طور من الأطوار الثلاثة

$$P = 3 * I_p * V_p * \cos\varphi$$

وعند تعويض قيم الفولتية والتيار للخط (التي وجدناها فيما سبق) بدلاً من الطور

$$V_L = \sqrt{3} V_p$$

$$V_p = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$$

$$I_L = I_p$$

ينتج

$$P = 3 * I_L * \frac{\boldsymbol{V_L}}{\sqrt{\boldsymbol{3}}} * \cos\varphi$$

$$P = \sqrt{3} * I_L * \boldsymbol{V_L} * \cos\varphi$$

**٢- في حالة ربط ($\Delta$)**

تكون قيم الفولتية والتيار للخط وللطور كما موضحة أدناه

$I_p = |I_a| = |I_b| = |I_c|$

$I_a = I_p \angle 0°,\ I_b = I_p \angle -120°,\ I_c = I_p \angle +120°$

$I_{ab} = I_a - I_b = I_p \angle 0° - I_p \angle -120° = \sqrt{3} I_p \angle 30$

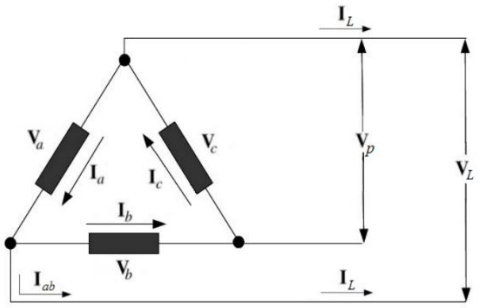
$I_{bc} = I_b - I_c = \sqrt{3} I_p \angle -90°$

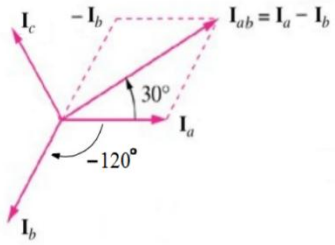
$I_{ca} = I_c - I_a = \sqrt{3} I_p \angle 150°$

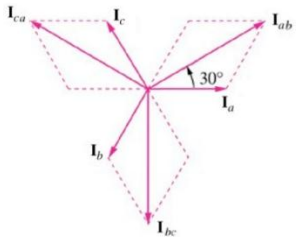
$I_L = |I_{ab}| = |I_{bc}| = |I_{ca}|$

$$I_L = \sqrt{3} I_p$$

$$V_L = V_p$$



وعند تطبيق معادلة حساب القدرة لكل طور على حدة كما في الحالة السابقة

$$P = I_p * V_p * \cos\varphi$$

وللأطوار الثلاثة تجمع قدرة كل طور من الأطوار الثلاثة

$$P = 3 * I_p * V_p * \cos\varphi$$

وعند تعويض قيم الفولتية والتيار للخط (التي وجدناها فيما سبق) بدلاً من الطور

$$V_L = V_p$$

$$I_L = \sqrt{3} I_p$$

$$I_p = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$$

ينتج

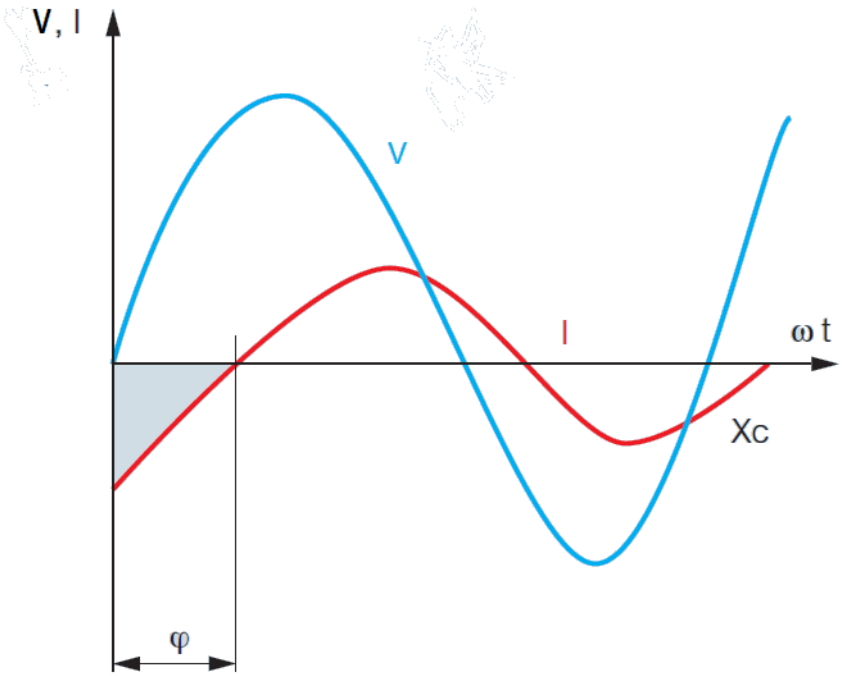
$$P = 3 * \frac{I_L}{\sqrt{\mathbf{3}}} * \boldsymbol{V_L} * cos\,\varphi$$

$$P = \sqrt{3} * I_L * \boldsymbol{V_L} * \cos\varphi$$

هذه هي المعادلة العامة لحساب القدرة الكهربائية وتنطبق على الربط (Y) و (Δ) للدوائر الثلاثية الطور.

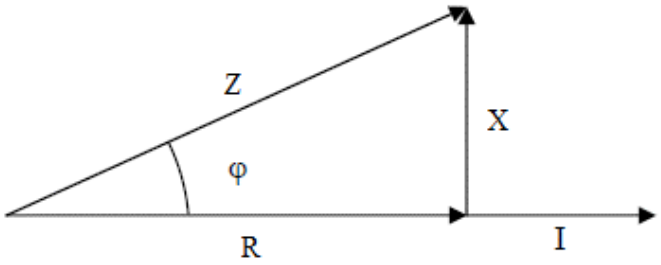
## معامل القدرة (Power factor = cos φ)

هو جيب تمام زاوية إزاحة الطور بين التيار والجهد ويعتبر أنسب معامل لحساب قيم القدرة الفعالة والغير الفعالة من التيار والجهد، أو هو النسبة بين المقاومة والممانعة أو هو النسبة بين القدرة الفعالة والقدرة الظاهرية. وفي الهندسة الكهربائية العملية أصبح هذا المعامل رمزاً لأستهلاك القدرة ونوعها.




$$power\ factor = \cos\phi = \frac{P}{S} = \frac{active\ _\ power\ _(kW)}{apparent\ _\ power\ _(kVA)}$$

من خلال مخطط مثلث الممانعة




$$Z = \sqrt{(R)^2 + (X)^2}$$

وعند ضرب قيم مثلث الممانعة بـ ($I^2$) لكل طور ينتج :-

$$P = I^2 R \quad (watts)$$

$$P = \frac{E^2}{R} \quad (watts)$$

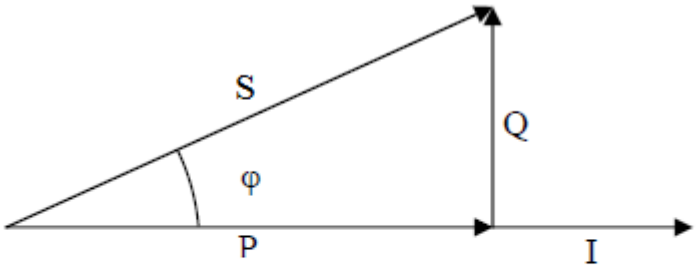
$$Q = I^2 X \quad (VAR)$$

$$Q = \frac{E^2}{X} \quad (VAR)$$

$$S = I^2 Z \quad (VA)$$

$$S = \frac{E^2}{Z} \quad (VA)$$

ويسمى المخطط التالي مثلث القدرة (Power triangle).




$$S = \sqrt{(P)^2 + (Q)^2}$$

$$\cos\phi = power\ factor = \frac{R}{Z} = \frac{P}{S}$$

$$\tan\phi = \frac{Q}{P} \qquad or \qquad \phi = \tan^{-1}\frac{Q}{P}$$

$$S = I * V$$

$$P = I * V * \cos\varphi$$

$$Q = I * V * \sin\varphi$$

وفي حالة شبكة ثلاثية الطور

$$S = \sqrt{3} * I_L * \boldsymbol{V_L}$$

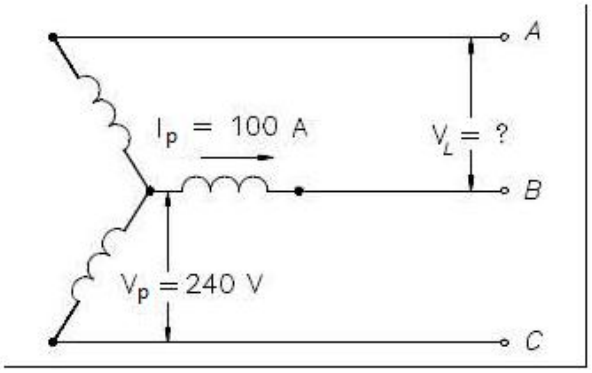
$$P = \sqrt{3} * I_L * V_L * \cos\varphi$$

$$Q = \sqrt{3} * I_L * \boldsymbol{V_L} * \sin\varphi$$

## مثال

Each phase of a wye- connected 3φ AC generator supplies a 100 A current at a phase voltage of 240V and a power factor of 0.9 lagging, as shown in Figure. Find:

1. $V_L$
2. $P_T$
3. $Q_T$
4. $S_T$




Solution:

1. $V_L = \sqrt{3}\,V_p$

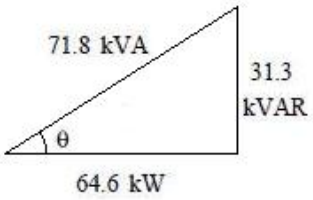
   $= (1.73)(240)$

   $V_L = 415.2$ volts

2. $P_T = \sqrt{3}\,V_L I_L \cos\theta$

   $= (1.73)(415.2)(100)(0.9)$

   $P_T = 64.6$ kW




3. $Q_T = \sqrt{3}\,V_L I_L \sin\theta$

   $= (1.73)(415.2)(100)(0.436)$

   $Q_T = 31.3$ kVAR

4. $S_T = \sqrt{3}\,V_L I_L$

   $= (1.73)(415.2)(100)$

   $S_T = 71.8$ kVA

## تأثير معامل القدرة المنخفض

إن إنخفاض معامل القدرة عن (١) أي زيادة قيمة الزاوية بين الفولتية والتيار يسبب :-

أولاً : إرتفاع قيمة القدرة الظاهرية (KVA) بسبب وجود القدرة غير الحقيقية (KVAR) وبالتالي إرتفاع التيار المجهز مما يؤدي الى إختناق في المغذيات والخطوط والمحولات ذات الحمولة العالية وهذا قد يسبب حالات إطفاء متكررة أو ضرر بالمعدات وحل الإختناق يعني كلفة عالية.

ثانياً : زيادة الخسائر في الشبكة بسبب زيادة التيار. لأن الخسائر تتناسب مع مربع التيار.

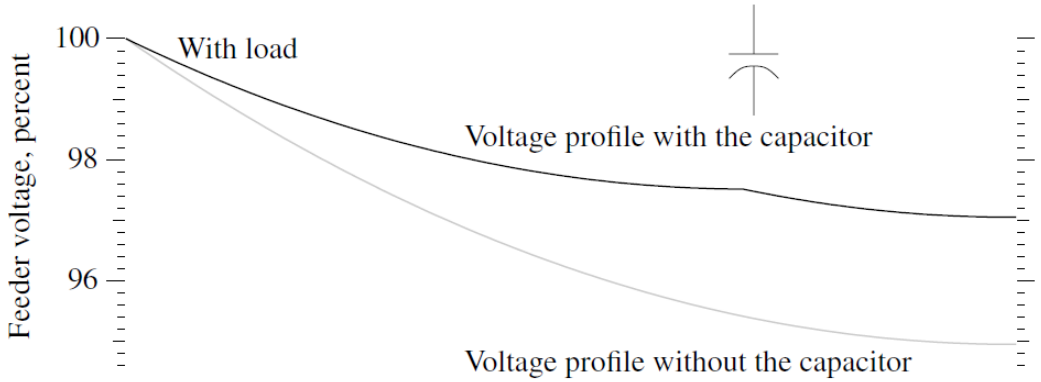
$$P = I^2 R \quad (watts)$$

ثالثاً : زيادة إنحدار الجهد بسبب زيادة التيار. لأن إنحدار الفولتية يتناسب طردياً مع التيار.

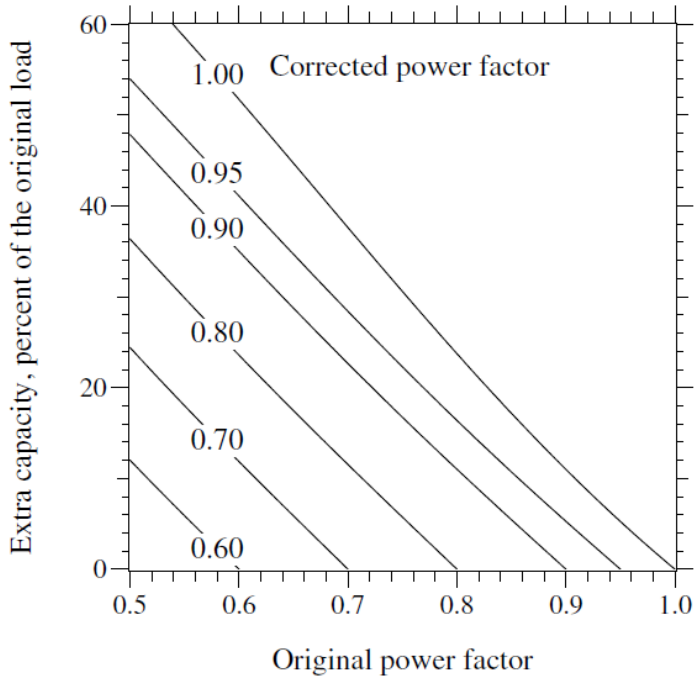
$$V_{drop} = I\ Z \quad (V)$$

## تحسين معامل القدرة (Improving Power Factor)

عند تحسين معامل القدرة ورفعه الى قيمة قريبة من (١) وليس (١) ستكون القدرة الظاهرية (KVA) قريبة جداً من القدرة الحقيقية المستهلكة (KW) والقدرة غير الحقيقية (KVAR) ستكون قليلة جداً. وهذا يعني خفض قيمة التيار المجهز وبالتالي تقليل الخسائر وتقليل قيمة إنحدار الجهد اي رفع قيمة الفولتية. وكما في المخططين التاليين:-




Voltage profiles after addition of a capacitor bank. (Copyright © 2002. Electric Power Research Institute. 1001691. *Improved Reliability of Switched Capacitor Banks and Capacitor Technology.* Reprinted with permission.)




Released capacity with improved power factor.

وبما إن أغلب الأحمال الكهربائية هي أما محركات أو محولات وملفات الأجهزة الكهربائية أو إنارة وتدفئة وكل هذه أحمال حثية ومقاومية مضافاً لها محولات وأسلاك الشبكة الكهربائية والتي لها مقاومة ومحاثة أيضاً. أما القابلوات فلها طبيعة سعوية وكذلك خطوط النقل أما في خطوط التوزيع الهوائية فيهمل التأثير السعوي لضآلته. لذا فأبسط الطرق لتحسين معامل القدرة هو إضافة المتسعات، فالمتسعة أو المكثف هو الجهاز الأفضل عملياً واقتصادياً لتحسين معامل القدرة فهي تنتج قدرة سعوية غير فعالة والتي هي عكس القدرة الحثية الغير فعالة تماماً. بالاختيار الدقيق لسعة المكثف المطلوب وموقعه على الشبكة من الممكن أن نلغي أو نقلل تأثير القدرة الغير فعالة للأحمال الحثية وتأثيراتها السلبية على الشبكة.

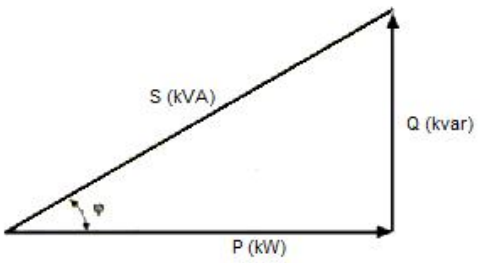
$$\cos\phi = \frac{\text{active power}}{\text{apparent power}} = \frac{\text{kW}}{\text{kVA}}$$

$$\sin\phi = \frac{\text{reactive power}}{\text{aparent power}} = \frac{\text{kvar}}{\text{kVA}}$$

$$\tan\phi = \frac{\text{reactive power}}{\text{active power}} = \frac{\text{kvar}}{\text{kW}}$$

$$\text{reactive power} = \text{active power} \cdot \tan\phi$$

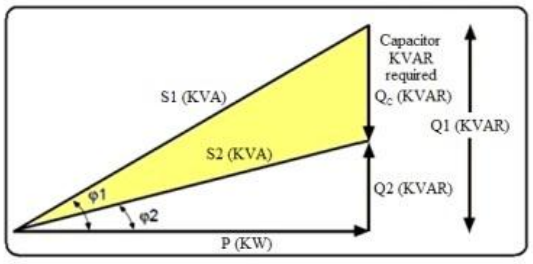
$$\text{kvar} = (\text{kW})(\tan\phi)$$




$$\text{reactive power at original power factor} = \text{active power} \cdot \tan\phi_1 = (\text{kW})(\tan\phi_1)$$

$$\text{reactive power at improved power factor} = \text{active power} \cdot \tan\phi_2 = (\text{kW})(\tan\phi_2)$$

$$\text{reactive power at required power factor} = \text{active power} \cdot (\tan\phi_1 - \tan\phi_2) = (\text{kW})(\tan\phi_1 - \tan\phi_2)$$



حيث إن ($\varphi_1$) تمثل الزاوية لمعامل القدرة قبل التصحيح و($\varphi_2$) تمثل الزاوية لمعامل القدرة بعد التصحيح أي بعد وضع المتسعة. وقيمة حاصل طرح ($\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2$) تسمى معامل الضرب للقدرة الحقيقية – عند ثبوتها – للحصول على القدرة غير الحقيقية للمتسعة وفق معامل القدرة المطلوب، وتعطى في جداول خاصة لسهولة الحسابات وكما في جدول (٢) التالي

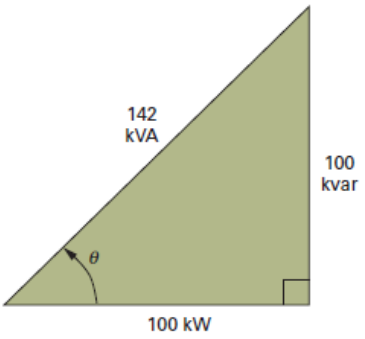
| Original Power Factor | Corrected Power Factor | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.80 | 0.81 | 0.82 | 0.83 | 0.84 | 0.85 | 0.86 | 0.87 | 0.88 | 0.89 | 0.90 | 0.91 | 0.92 | 0.93 | 0.94 | 0.95 | 0.96 | 0.97 | 0.98 | 0.99 | 1.0 |
| 0.50 | 0.982 | 1.008 | 1.034 | 1.060 | 1.086 | 1.112 | 1.139 | 1.165 | 1.192 | 1.220 | 1.248 | 1.276 | 1.306 | 1.337 | 1.369 | 1.403 | 1.440 | 1.481 | 1.529 | 1.589 | 1.732 |
| 0.51 | 0.937 | 0.962 | 0.989 | 1.015 | 1.041 | 1.067 | 1.094 | 1.120 | 1.147 | 1.175 | 1.203 | 1.231 | 1.261 | 1.292 | 1.324 | 1.358 | 1.395 | 1.436 | 1.484 | 1.544 | 1.687 |
| 0.52 | 0.893 | 0.919 | 0.945 | 0.971 | 0.997 | 1.023 | 1.050 | 1.076 | 1.103 | 1.131 | 1.159 | 1.187 | 1.217 | 1.248 | 1.280 | 1.314 | 1.351 | 1.392 | 1.440 | 1.500 | 1.643 |
| 0.53 | 0.850 | 0.876 | 0.902 | 0.928 | 0.954 | 0.980 | 1.007 | 1.033 | 1.060 | 1.088 | 1.116 | 1.144 | 1.174 | 1.205 | 1.237 | 1.271 | 1.308 | 1.349 | 1.397 | 1.457 | 1.600 |
| 0.54 | 0.809 | 0.835 | 0.861 | 0.887 | 0.913 | 0.939 | 0.966 | 0.992 | 1.019 | 1.047 | 1.075 | 1.103 | 1.133 | 1.164 | 1.196 | 1.230 | 1.267 | 1.308 | 1.356 | 1.416 | 1.559 |
| 0.55 | 0.769 | 0.795 | 0.821 | 0.847 | 0.873 | 0.899 | 0.926 | 0.952 | 0.979 | 1.007 | 1.035 | 1.063 | 1.093 | 1.124 | 1.156 | 1.190 | 1.227 | 1.268 | 1.316 | 1.376 | 1.519 |
| 0.56 | 0.730 | 0.756 | 0.782 | 0.808 | 0.834 | 0.860 | 0.887 | 0.913 | 0.940 | 0.968 | 0.996 | 1.024 | 1.054 | 1.085 | 1.117 | 1.151 | 1.188 | 1.229 | 1.277 | 1.337 | 1.480 |
| 0.57 | 0.692 | 0.718 | 0.744 | 0.770 | 0.796 | 0.822 | 0.849 | 0.875 | 0.902 | 0.930 | 0.958 | 0.986 | 1.016 | 1.047 | 1.079 | 1.113 | 1.150 | 1.191 | 1.239 | 1.299 | 1.442 |
| 0.58 | 0.655 | 0.681 | 0.707 | 0.733 | 0.759 | 0.785 | 0.812 | 0.838 | 0.865 | 0.893 | 0.921 | 0.949 | 0.979 | 1.010 | 1.042 | 1.076 | 1.113 | 1.154 | 1.202 | 1.262 | 1.405 |
| 0.59 | 0.619 | 0.645 | 0.671 | 0.697 | 0.723 | 0.749 | 0.776 | 0.802 | 0.829 | 0.857 | 0.885 | 0.913 | 0.943 | 0.974 | 1.006 | 1.040 | 1.077 | 1.118 | 1.166 | 1.226 | 1.369 |
| 0.60 | 0.583 | 0.609 | 0.635 | 0.661 | 0.687 | 0.713 | 0.740 | 0.766 | 0.793 | 0.821 | 0.849 | 0.877 | 0.907 | 0.938 | 0.970 | 1.004 | 1.041 | 1.082 | 1.130 | 1.190 | 1.333 |
| 0.61 | 0.549 | 0.575 | 0.601 | 0.627 | 0.653 | 0.679 | 0.706 | 0.732 | 0.759 | 0.787 | 0.815 | 0.843 | 0.873 | 0.904 | 0.936 | 0.970 | 1.007 | 1.048 | 1.096 | 1.156 | 1.299 |
| 0.62 | 0.516 | 0.542 | 0.568 | 0.594 | 0.620 | 0.646 | 0.673 | 0.699 | 0.726 | 0.754 | 0.782 | 0.810 | 0.840 | 0.871 | 0.903 | 0.937 | 0.974 | 1.015 | 1.063 | 1.123 | 1.266 |
| 0.63 | 0.483 | 0.509 | 0.535 | 0.561 | 0.587 | 0.613 | 0.640 | 0.666 | 0.693 | 0.721 | 0.749 | 0.777 | 0.807 | 0.838 | 0.870 | 0.904 | 0.941 | 0.982 | 1.030 | 1.090 | 1.233 |
| 0.64 | 0.451 | 0.474 | 0.503 | 0.529 | 0.555 | 0.581 | 0.608 | 0.634 | 0.661 | 0.689 | 0.717 | 0.745 | 0.775 | 0.806 | 0.838 | 0.872 | 0.909 | 0.950 | 0.998 | 1.068 | 1.201 |
| 0.65 | 0.419 | 0.445 | 0.471 | 0.497 | 0.523 | 0.549 | 0.576 | 0.602 | 0.629 | 0.657 | 0.685 | 0.713 | 0.743 | 0.774 | 0.806 | 0.840 | 0.877 | 0.918 | 0.966 | 1.026 | 1.169 |
| 0.66 | 0.388 | 0.414 | 0.440 | 0.466 | 0.492 | 0.518 | 0.545 | 0.571 | 0.598 | 0.626 | 0.654 | 0.682 | 0.712 | 0.743 | 0.775 | 0.809 | 0.846 | 0.887 | 0.935 | 0.995 | 1.138 |
| 0.67 | 0.358 | 0.384 | 0.410 | 0.436 | 0.462 | 0.488 | 0.515 | 0.541 | 0.568 | 0.596 | 0.624 | 0.652 | 0.682 | 0.713 | 0.745 | 0.779 | 0.816 | 0.857 | 0.905 | 0.965 | 1.108 |
| 0.68 | 0.328 | 0.354 | 0.380 | 0.406 | 0.432 | 0.458 | 0.485 | 0.511 | 0.538 | 0.566 | 0.594 | 0.622 | 0.652 | 0.683 | 0.715 | 0.749 | 0.786 | 0.827 | 0.875 | 0.935 | 1.078 |
| 0.69 | 0.299 | 0.325 | 0.351 | 0.377 | 0.403 | 0.429 | 0.456 | 0.482 | 0.509 | 0.537 | 0.565 | 0.593 | 0.623 | 0.654 | 0.686 | 0.720 | 0.757 | 0.798 | 0.846 | 0.906 | 1.049 |
| 0.70 | 0.270 | 0.296 | 0.322 | 0.348 | 0.374 | 0.400 | 0.427 | 0.453 | 0.480 | 0.508 | 0.536 | 0.564 | 0.594 | 0.625 | 0.657 | 0.691 | 0.728 | 0.769 | 0.817 | 0.877 | 1.020 |
| 0.71 | 0.242 | 0.268 | 0.294 | 0.320 | 0.346 | 0.372 | 0.399 | 0.425 | 0.452 | 0.480 | 0.508 | 0.536 | 0.566 | 0.597 | 0.629 | 0.663 | 0.700 | 0.741 | 0.789 | 0.849 | 0.992 |
| 0.72 | 0.214 | 0.240 | 0.266 | 0.292 | 0.318 | 0.344 | 0.371 | 0.397 | 0.424 | 0.452 | 0.480 | 0.508 | 0.538 | 0.569 | 0.601 | 0.635 | 0.672 | 0.713 | 0.761 | 0.821 | 0.964 |
| 0.73 | 0.186 | 0.212 | 0.238 | 0.264 | 0.290 | 0.316 | 0.343 | 0.369 | 0.396 | 0.424 | 0.452 | 0.480 | 0.510 | 0.541 | 0.573 | 0.607 | 0.644 | 0.685 | 0.733 | 0.793 | 0.936 |
| 0.74 | 0.159 | 0.185 | 0.211 | 0.237 | 0.263 | 0.289 | 0.316 | 0.342 | 0.369 | 0.397 | 0.425 | 0.453 | 0.483 | 0.514 | 0.546 | 0.580 | 0.617 | 0.658 | 0.706 | 0.766 | 0.909 |
| 0.75 | 0.132 | 0.158 | 0.184 | 0.210 | 0.236 | 0.262 | 0.289 | 0.315 | 0.342 | 0.370 | 0.398 | 0.426 | 0.456 | 0.487 | 0.519 | 0.553 | 0.590 | 0.631 | 0.679 | 0.739 | 0.882 |
| 0.76 | 0.105 | 0.131 | 0.157 | 0.183 | 0.209 | 0.235 | 0.262 | 0.288 | 0.315 | 0.343 | 0.371 | 0.399 | 0.429 | 0.460 | 0.492 | 0.526 | 0.563 | 0.604 | 0.652 | 0.712 | 0.855 |
| 0.77 | 0.079 | 0.105 | 0.131 | 0.157 | 0.183 | 0.209 | 0.236 | 0.262 | 0.289 | 0.317 | 0.345 | 0.373 | 0.403 | 0.434 | 0.466 | 0.500 | 0.537 | 0.578 | 0.626 | 0.685 | 0.829 |
| 0.78 | 0.052 | 0.078 | 0.104 | 0.130 | 0.156 | 0.182 | 0.209 | 0.235 | 0.262 | 0.290 | 0.318 | 0.346 | 0.376 | 0.407 | 0.439 | 0.473 | 0.510 | 0.551 | 0.599 | 0.659 | 0.802 |
| 0.79 | 0.026 | 0.052 | 0.078 | 0.104 | 0.130 | 0.156 | 0.183 | 0.209 | 0.236 | 0.264 | 0.292 | 0.320 | 0.350 | 0.381 | 0.413 | 0.447 | 0.484 | 0.525 | 0.573 | 0.633 | 0.776 |
| 0.80 | 0.000 | 0.026 | 0.052 | 0.078 | 0.104 | 0.130 | 0.157 | 0.183 | 0.210 | 0.238 | 0.266 | 0.294 | 0.324 | 0.355 | 0.387 | 0.421 | 0.458 | 0.499 | 0.547 | 0.609 | 0.750 |
| 0.81 | | 0.000 | 0.026 | 0.052 | 0.078 | 0.104 | 0.131 | 0.157 | 0.184 | 0.212 | 0.240 | 0.268 | 0.298 | 0.329 | 0.361 | 0.395 | 0.432 | 0.473 | 0.521 | 0.581 | 0.724 |
| 0.82 | | | 0.000 | 0.026 | 0.052 | 0.078 | 0.105 | 0.131 | 0.158 | 0.186 | 0.214 | 0.242 | 0.272 | 0.303 | 0.335 | 0.369 | 0.406 | 0.447 | 0.495 | 0.555 | 0.698 |
| 0.83 | | | | 0.000 | 0.026 | 0.052 | 0.079 | 0.105 | 0.132 | 0.160 | 0.188 | 0.216 | 0.246 | 0.277 | 0.309 | 0.343 | 0.380 | 0.421 | 0.469 | 0.529 | 0.672 |
| 0.84 | | | | | 0.000 | 0.026 | 0.053 | 0.079 | 0.106 | 0.134 | 0.162 | 0.190 | 0.220 | 0.251 | 0.283 | 0.317 | 0.354 | 0.395 | 0.443 | 0.503 | 0.646 |
| 0.85 | | | | | | 0.000 | 0.027 | 0.053 | 0.080 | 0.108 | 0.136 | 0.164 | 0.194 | 0.225 | 0.257 | 0.291 | 0.328 | 0.369 | 0.417 | 0.477 | 0.620 |
| 0.86 | | | | | | | 0.000 | 0.026 | 0.053 | 0.081 | 0.109 | 0.137 | 0.167 | 0.198 | 0.230 | 0.264 | 0.301 | 0.342 | 0.390 | 0.450 | 0.593 |
| 0.87 | | | | | | | | 0.000 | 0.027 | 0.055 | 0.083 | 0.111 | 0.141 | 0.172 | 0.204 | 0.238 | 0.275 | 0.316 | 0.364 | 0.424 | 0.567 |
| 0.88 | | | | | | | | | 0.000 | 0.028 | 0.056 | 0.084 | 0.114 | 0.145 | 0.177 | 0.211 | 0.248 | 0.289 | 0.337 | 0.397 | 0.540 |
| 0.89 | | | | | | | | | | 0.000 | 0.028 | 0.056 | 0.086 | 0.117 | 0.149 | 0.183 | 0.220 | 0.261 | 0.309 | 0.369 | 0.512 |
| 0.90 | | | | | | | | | | | 0.000 | 0.028 | 0.058 | 0.089 | 0.121 | 0.155 | 0.192 | 0.233 | 0.281 | 0.341 | 0.484 |
| 0.91 | | | | | | | | | | | | 0.000 | 0.030 | 0.061 | 0.093 | 0.127 | 0.164 | 0.205 | 0.253 | 0.313 | 0.456 |
| 0.92 | | | | | | | | | | | | | 0.000 | 0.031 | 0.063 | 0.097 | 0.134 | 0.175 | 0.223 | 0.283 | 0.426 |
| 0.93 | | | | | | | | | | | | | | 0.000 | 0.032 | 0.066 | 0.103 | 0.144 | 0.192 | 0.252 | 0.395 |
| 0.94 | | | | | | | | | | | | | | | 0.000 | 0.034 | 0.071 | 0.112 | 0.160 | 0.220 | 0.363 |
| 0.95 | | | | | | | | | | | | | | | | 0.000 | 0.037 | 0.079 | 0.126 | 0.186 | 0.329 |
| 0.96 | | | | | | | | | | | | | | | | | 0.000 | 0.041 | 0.089 | 0.149 | 0.292 |
| 0.97 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0.000 | 0.048 | 0.108 | 0.251 |
| 0.98 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0.000 | 0.060 | 0.203 |
| 0.99 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0.000 | 0.143 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0.000 |

**Multipliers to Determine Capacitor Kilovars Required for Power Factor Correction**

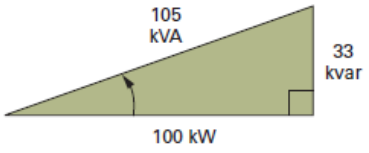
## مثال ١

As the triangle relationships in **Figure** demonstrate, kVA decreases as power factor increases. At 70% power factor, it requires 142 kVA to produce 100 kW. At 95% power factor, it requires only 105 kVA to produce 100 kW. Another way to look at it is that at 70% *power factor, it takes 35% more current to do the same work.*

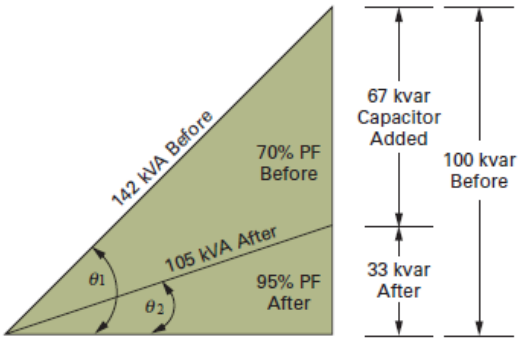
The power triangle in **Figure** shows apparent power demands on a system before and after adding capacitors. By installing power capacitors and increasing power factor to 95%, apparent power is reduced from 142 kVA to 105 kVA — *a reduction of 35%.*




$$\cos\theta_1 = PF = \frac{100}{142} = 70\%$$




$$\cos\theta_2 = PF = \frac{100}{105} = 95\%$$



## مثال ٢

P = true power = $I^2R$ = 119.365 W

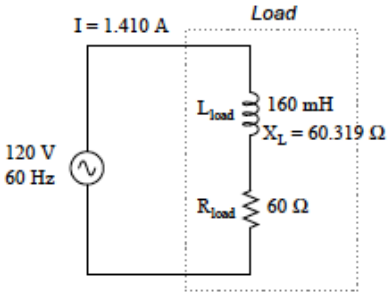
Q = reactive power = $I^2X$ = 119.998 VAR

S = apparent power = $I^2Z$ = 169.256 VA

$$I_{R\text{-}L} = \frac{V_{total}}{Z_{R\text{-}L}} = \frac{120 \angle 0°}{85.079 \angle 45.15°} = 1.41 \angle -45.15° \text{ A}$$

$$\text{Power factor} = \frac{\text{True power}}{\text{Apparent power}} = \frac{119.365 \text{ W}}{169.256 \text{ VA}} = 0.705$$

$\cos 45.152° = 0.705$



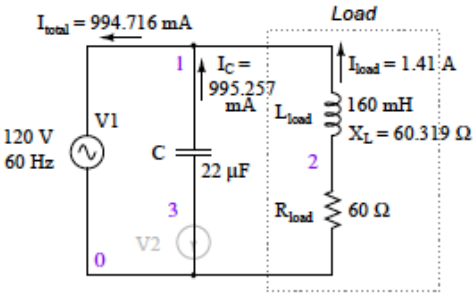

معامل قدرة واطئ ويبغي تصحيحه بإضافة قدرة غير فعالة مساوية أو أقل من القدرة غير الفعالة الموجودة في الدائرة معاكسة بالإتجاه (أي سعوية) وذلك بوضع متسعة نحسب قيمتها كالتالي

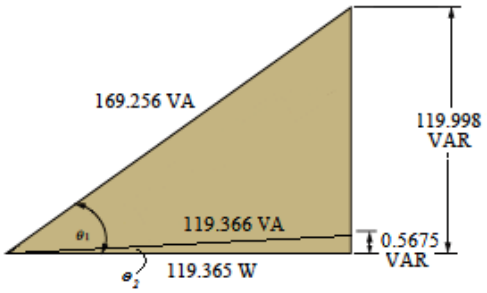
$$Q = \frac{E^2}{X} \quad \text{. . . solving for } X \text{ . . .}$$

$$X = \frac{E^2}{Q} = \frac{(120 \text{ V})^2}{119.998 \text{ VAR}} = 120.002 \ \Omega$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad \text{. . . solving for } C \text{ . . .}$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2\pi(60 \text{ Hz})(120.002 \ \Omega)} = 22.105 \ \mu\text{F}$$




$Z_{total} = Z_C \,//\, (Z_L + Z_R)$

$Z_{total} = (120.57 \ \Omega \angle -90°) \,//\, (60.319 \ \Omega \angle 90° + 60 \ \Omega \angle 0°)$

$Z_{total} = 120.64 - j573.58\text{m} \ \Omega$ *or* $120.64 \ \Omega \angle 0.2724°$

P = true power = $I^2R$ = 119.365 W

Q = reactive power = $I^2X$ = 0.5675 VAR

S = apparent power = $I^2Z$ = 119.366 VA

$$I_{total} = \frac{V_{total}}{Z_{total}} = \frac{120 \angle 0°}{120.64 \ \Omega \angle 0.2724°} = 994.7 \angle -0.2724° \text{ A}$$

$$\text{Power factor} = \frac{\text{True power}}{\text{Apparent power}} = \frac{119.365 \text{ W}}{119.366 \text{ VA}} = 0.9999887$$

Impedance (polar) angle = 0.272°

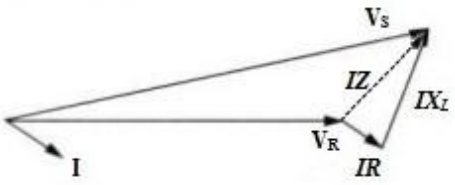
$\cos 0.272° = 0.9999887$

عملياً لايمكن وضع متسعة بهذه القيمة ليصبح عامل القدرة =١ لأن ذلك يؤدي إلى ارتفاع قيمة الفولتية عند الإطفاء والتشغيل وهذا ضار بالأجهزة الكهربائية ولكن يصحح عامل القدرة لقيمة ٠,٩ –٠,٩٥

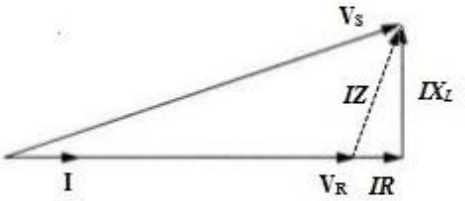
## تأثير معامل القدرة المرتفع

في حالة وجود المتسعات على الشبكة وعند الحمل الواطئ (light load) سواء بالنسبة للمغذيات ذات الحمل غير العالي أو في بعض الأوقات التي يكون الإستهلاك قليل جداً كما يحدث في فصلي الربيع والخريف وفي أوقات متأخرة من الليل، فإن القدرة الظاهرية (KVA) ستنخفض ومعها القدرة غير الحقيقية (KVAR) التي ستنخفض أيضاً، ويتغلب التأثير السعوي على التأثير الحثي وسيرتفع معامل القدرة ويتجاوز قيمة (١) وحينها سيتحول الى متقدم (leading). وهذا يحمل مخاطر إرتفاع الفولتية الواصلة نهاية الخط، وبالتالي تضرر العوازل أو عطب مكونات الشبكة والأجهزة. وكما موضح في المخطط الطوري التالي :-

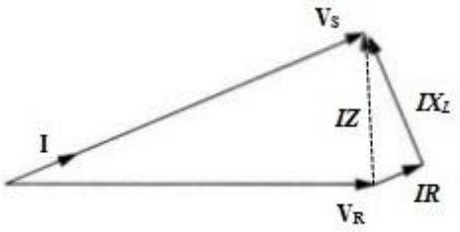
***lagging power factor***




***power factor = 1***




***leading power factor***




$V_S$ : Sending end voltage

$V_R$ : Reciving end voltage

R : Resistance of the line

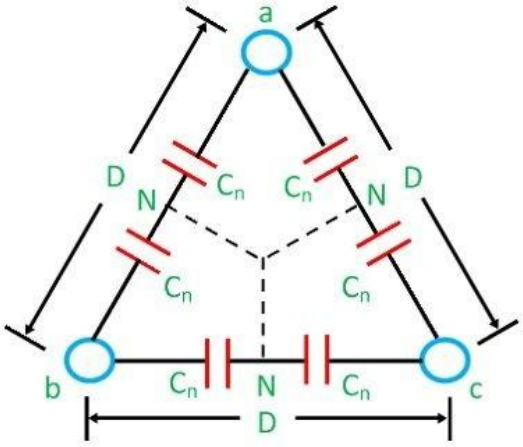
$X_L$ : Inductive reactance of the line

Z : Impedance of the line

وتزداد الحالة خطورة عند الحالة العابرة (Transient) أي عند الإطفاء والتشغيل. وللوقاية من هذه الحالة الضارة ينبغي الحذر عند وضع متسعات ثابتة على الشبكة لتحسين معامل القدرة، وحساب قيمة الحمل الواطئ ( light load) لكي لايتجاوز معامل القدرة قيمة (١) ويتحول الى متقدم (leading) وهذا يعني تخفيض قيمة المتسعة وبالتالي تأثيرها في حمل الذروة لتحسين معامل القدرة يكون قليل نسبياً. أو بدلاً من المتسعات الثابتة، إستخدام متسعات متغيرة القيمة حسب الحمل ومعامل القدرة من خلال جهاز سيطرة (controller) مرتبط مع مجموعة المتسعات وكما سيأتي الحديث عنه.

## معامل القدرة في القابلوات وخطوط النقل

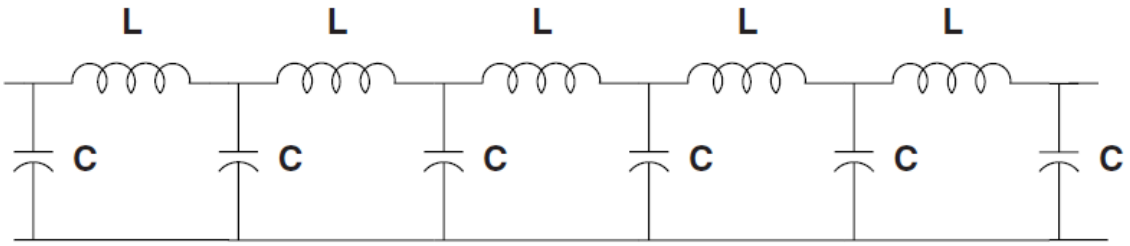
المتسعة كما هو معلوم هي عبارة عن موصلين بينهما عازل وعند تسليط جهد معين على الموصلين يحدث مجال كهربائي بينهما. لذا وبسبب المجالات الكهربائية بين الأطوار وبينها وبين الأرض يظهر التأثير السعوي كمتسعات وهمية ومربوطة على شكل (shunt capacitors) كما موضحة في الشكل أدناه.




Three-phase line with equilateral spacing

تكون قيمة السعة (Capacitance) قليلة جداً في خطوط التوزيع الهوائية فتهمل، وتكون أعلى في القابلوات حيث يكون تأثيرها قليلاً على معامل القدرة (يرفع من قيمة معامل القدرة المتأخر (lagging) بسبب الأحمال

الحثية). وتزداد مع طول الموصل (الخط الهوائي والقابلو) فيظهر التأثير على الخط الهوائي عندما يكون طوله أكثر من ٨٠ كيلومتر أي في خطوط نقل الطاقة)، يوجد تأثير حثي أيضاً بسبب المجالات المغناطيسية لذا يتم تمثيله بمحاثة (Inductance)، بينما المقاومة تكون قليلة جداً يمكن إهمالها وكما في الشكل.




وفي الحالات التي يكون فيها الخط طويل أو الحمل قليل فإن معامل القدرة سيتحول الى متقدم (leading) والفولتية نهاية الخط سترتفع لتكون أعلى من بداية الخط وهذه الظاهرة تسمى ظاهرة فيرانتي (Ferranti effect)، وكما أوضحنا سابقاً خطورة هذه الحالة على معدات الشبكة والمستهلك. ولعلاج هذه المشكلة يتم وضع ملفات أو محاثات تسمى (shunt reactors) على خطوط النقل لتنتج قدرة حثية غير فعالة والتي هي عكس القدرة السعوية الغير فعالة تماماً. بالاختيار الدقيق لسعة المحاثة المطلوبة وموقعها على الشبكة من الممكن أن نلغي أو نقلل تأثير القدرة الغير فعالة للمتسعة الوهمية في الخط وتأثيراتها السلبية على الشبكة. ويكون عملها معاكس لعمل المتسعات (capacitors) على الشبكة لأن الحالة السلبية هنا هي معامل قدرة متقدم (leading) بسبب الحمل السعوي (capacitive load) ويعالج بوضع محاثات، عكس الحالة السلبية السابقة حيث كان معامل قدرة متأخر (lagging) بسبب الحمل الحثي (inductive load) يعالج بوضع متسعات.

ولو كان طول الخط آلاف الكيلومترات فإن التيار المجهز أكثره سيذهب الى المتسعات الوهمية بين الأطوار وسيجد رادة حثية عالية في طريقه وبالتالي سوف لن يصل منه نهاية الخط إلا تيار قليل بينما الفولتية سترتفع بسبب معامل القدرة المتقدم (leading)، ولذا يتم نقل الطاقة الكهربائية للمسافات الهائلة التي تبلغ آلاف الكيلومترات من خلال خطوط نقل للتيار المستمر (DC) للتخلص من الرادة الحثية والسعوية.

# الفصل الثالث : إستخدام المتسعات في الشبكة الكهربائية

بعد أن ذكرنا سابقاً إن المتسعة أو المكثف هو الجهاز الأفضل عملياً واقتصادياً لتحسين معامل القدرة، وشرحنا كيفية حساب قيمة المتسعة المطلوبة لتحسين معامل القدرة، نوضح الآن المتسعات الموجودة على الشبكة ونوعيها وطبقة التحكم بها.

## قيم المتسعات وفق (IEEE Standard. 18-2002)

قيم متسعات الجهد الواطئ ٠,٤ كي.في

2.5 KVAR, 5 KVAR, 7.5 KVAR, 10 KVAR, 15 KVAR, 20 KVAR, 25 KVAR, 50 KVAR

قيم متسعات الجهد المتوسط ١١ كي.في

50 KVAR, 100 KVAR, 150 KVAR, 200 KVAR, 300 KVAR, 400 KVAR, 500 KVAR, 600 KVAR, 700 KVAR, 800 KVAR,

## تصنيفات مجموعات المتسعات (capacitor banks)

توجد المتسعات على الشبكة في مواضع مختلفة فيمكن أن تكون في المحطة أو في الكيوسك أو على الشبكة، ويمكن تصنيف مجموعات المتسعات من حيث كونها ثلاثية الطور أو أحادية الطور (بالنسبة لشبكات التوزيع غير متوازنة أي التي تحوي تفرعات أحادية الطور وثنائية الطور). ويمكن تصنيفها من حيث الجهد أي متسعات الجهد الواطئ ومتسعات الجهد المتوسط ومتسعات الجهد العالي. وأيضاً يمكن تصنيفها من حيث موقعها فأما تكون معلقة على الأعمدة (pole mounted) أو أرضية (pad mounted).

pole mounted

pad mounted

وأيضاً يمكن تصنيفها من حيث الإستخدام فقد تكون بقيم ثابتة أي إنه لايطرأ تغيير على قيمتها مع الوقت وتغير الحمل، وقد تكون قيمة المتسعات قابلة للتغيير، بحيث تكون قيمتها الداخلة في الخدمة تتغير بتغير الحمل.

**١- المتسعات الثابتة القيمة**

كما ذكرنا فعند وضع متسعات ثابتة على الشبكة لتحسين معامل القدرة، ينبغي حساب قيمة الحمل الواطئ (light load) لكي لايتجاوز معامل القدرة قيمة (١) ويتحول الى متقدم (leading) وهذا يعني تخفيض قيمة المتسعة. وأيضاً تستخدم في الحالات التي يكون فيها تغير الحمل (KVAR) فصلياً. فمثلاً عندما يكون المتوقع ان

تكون قيمة (KVAR) في فصل الصيف عالية بسبب إستخدام مكيفات الهواء (وهي أحمال حثية)، ويقابل ذلك (KVAR) ذات قيمة واطئة في فصل الشتاء، عند ذلك تكون قيمة المتسعة المطلوبة في فصل الشتاء أقل منها في فصل الصيف، والتغيير المطلوب يكون موسمياً لذلك وفي هذه الحالة يكون أكثر أماناً وأقتصادياً إستخدام المتسعات الثابتة وإخراج المتسعات وإدخالها للخدمة أو تغيير قيمتها فصلياً بطريقة يدوية حيث تكون أقل كلفة بالمقارنة مع بقية الطرق الأخرى .

## ٢- المتسعات المتغيرة القيمة (switched capacitors)

وأيضاً تسمى الطريقة الأوتوماتيكية (automatic) لتغيير قيمة المتسعات وحسب التيار، القدرة غير الفعالة، الجهد، درجة الحرارة، الوقت (صباحاً ، مساءاً ، عصراً ..... ) والأكثر شيوعاً في الإستخدام هو معيار التيار لأن ذلك يعكس قيمة الحمل بصورة مباشرةً كما سيأتي مفصلاً.

إن العديد من العاملين في هذا المجال قد يفضل إستخدام الطريقة اليدوية لوجود عدد من السلبيات في الطريقة الأوتوماتيكية منها مثلاً عدم دخول متسعة طور معين الى الخدمة (بسبب حصول عطل فيها) مما يؤدي الى حالة عدم التوازن وهذا إن حصل فسيكون أسوء من حالة عدم وجود متسعة. وهناك إحتمال عدم إجراء التغيير في المتسعة بتغيير الحمل بسبب عطل فني في منظومات السيطرة (controller) وذلك أيضاً يمثل سلبية كبيرة، فيتطلب فحص دوري لمنظومات السيطرة (controller).

منظومات السيطرة والتحكم بالمتسعات المتغيرة (controller)

تتضمن هذه المنظومات محولة صغيرة وأجهزة إلكترونية ومتحسسات ووحدة معالجة مركزية ووحدة ذاكرة وبرنامج خاص (وبعضها تتضمن معدات إتصال بمركز سيطرة في الشبكات المؤتمتة والذكية). وهناك طرق مختلفة تستخدم في السيطرة والتحكم بالمتسعات المتغيرة لإدخالها وإخراجها من الشبكة وحسب الحاجة. وكما يأتي :-

١- التوقيت الزمني : طريقة تعتمد إدخال المتسعات للعمل وإخراجها وفق توقيت زمني. أي في الساعة التي تكون القدرة غير الحقيقية المسحوبة عالية ومعامل القدرة منخفض يتم إدخال المتسعات وفي الساعة التي تكون القدرة غير الحقيقية المسحوبة منخفضة ومعامل القدرة عالي يتم إخراجها من العمل. مع مراعاة أيام العطل والتغيرات الفصلية خلال السنة. ويعتبر هذا النوع من أرخص أنواع منظومات التحكم لكنه بالوقت نفسه قليل الدقة بسبب إحتمالية الخطأ إثناء برمجة التوقيت أو عدم دقة الساعة أو حصول بعض التغيرات غير المتوقعة في توقيت الأحمال إنخفاضاً أو إرتفاعاً.

٢- درجة الحرارة : طريقة سهلة تعتمد على درجة الحرارة في إدخال المتسعات للعمل وإخراجها. فعندما ترتفع درجة الحرارة يتم إدخال المتسعات للعمل ويتم إخراجها عندما تنخفض درجة الحرارة لأن إرتفاع درجة الحرارة يعني إرتفاع الحمل والقدرة غير الحقيقية المسحوبة.

٣- مستوى الجهد : طريقة تعتمد إدخال المتسعات للعمل وإخراجها وفق مستوى الجهد. فعندما ينخفض الجهد الى قيمة معينة تسمى (threshold minimum voltage) يتم إدخال المتسعات للعمل ومن ثم إخراجها عندما يرتفع الجهد الى قيمة معينة أخرى تسمى (threshold maximum voltage). تعتبر هذه الطريقة مناسبة جداً طالما ان أحد أهداف وضع المتسعات هو التقليل من هبوط الجهد. وأهم أهداف إستخدام المتسعات المتغيرة هو السيطرة على الجهد ضمن الحدود المسموح بها وعدم الإرتفاع تجاوزاً لتلك الحدود.

٤- مستوى القدرة غير الحقيقية (KVAR) : طريقة تعتمد إدخال المتسعات للعمل وإخراجها حسب قياس مستوى القدرة غير الحقيقية (KVAR). فعندما ترتفع القدرة غير الحقيقية (KVAR) المسحوبة الى قيمة معينة يتم إدخال المتسعات للعمل ويتم إخراجها عندما تنخفض القدرة غير الحقيقية (KVAR)

المسحوبة الى قيمة معينة أخرى. تعتبر هذه الطريقة الأكثر دقة لتخفيض تيار القدرة غير الحقيقية المسحوب.

وعند ضبط منظومة تحكم وفق مستوى (KVAR) المسحوبة لمجموعة متسعات على خط واحد ينبغي ضبط المتسعة الأبعد أي الأخيرة على الخط لتكون ذات أقل مدة إنتظار (delay) وتزداد هذه المدة تدريجياً بالإقتراب من بداية الخط أي المحطة الثانوية يعني ستكون أقرب متسعة إلى المحطة الثانوية هي ذات أكثر مدة إنتظار (delay). أي إن المتسعة الأخيرة ستدخل الى العمل أولاً بينما المتسعة الأقرب الى المحطة سيكون دخولها الى العمل آخراً.

٥- مستوى معامل القدرة : طريقة تعتمد إدخال المتسعات للعمل وإخراجها بقياس مستوى معامل القدرة. وهي مشابهة للطريقة السابقة ولكن جهاز القياس يعتمد على مستوى معامل القدرة بدلاً من مستوى القدرة غير الحقيقية (KVAR). وهي نادرة الإستعمال من قبل شركات ودوائر التوزيع.

٦- مستوى التيار :طريقة تعتمد إدخال المتسعات للعمل وإخراجها بقياس مستوى التيار الخارج من المتسعة اي مستوى الحمل. فعندما يرتفع الحمل الى قيمة معينة يتم إدخال المتسعات للعمل ويتم إخراجها عندما ينخفض الحمل الى قيمة معينة أخرى. هذه الطريقة تعتبر أقل دقة من طريقة مستوى القدرة غير الحقيقية (KVAR) لأن هذه الطريقة تعتمد على الحمل الذي يعطي القدرة الظاهرية (KVA) ولكن إعتيادياً الحمل العالي يسحب قدرة غير حقيقية (KVAR) عالية.

أكثر أنواع المتسعات لديها منظومة تحكم تعتمد أكثر من طريقة واحدة بل ربما جميع الأنواع أعلاه، ويمكن ضبطها بأكثر من طريقة وخيار في الوقت نفسه. فمثلاً يمكن ضبط المتسعة على إنخفاض الجهد وإرتفاع درجة الحرارة أو إرتفاع الحمل ... وهكذا. وبعض الشركات تقدم متسعات لها منظومة تحكم تعتمد أكثر من طريقة واحدة

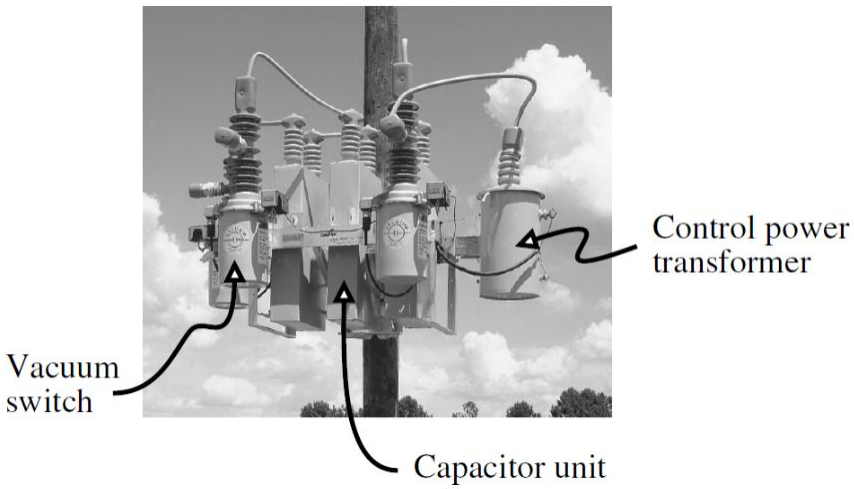
للتحكم ولكن جعل التحكم وفق مستوى الجهد هو المهيمن على باقي طرق التحكم نظراً لأهمية المحافظة على مستوى الجهد ضمن الحد المسموح به.

لتقليل حجم منظومة السيطرة والتحكم وتقليل الكلفة تكون المتحسسات وأجهزة القياس مثبتة على طور واحد فقط حتى لوكانت مجموعة المتسعات (capacitor bank) ثلاثية الأطوار، مما يتطلب أن تكون الأحمال متوازنة على الأطوار الثلاثة في الخط.

## تركيب مجموعات المتسعات (capacitor banks)

مجموعات المتسعات (capacitor banks) تتضمن إضافة الى المتسعات أجهزة حماية مثل مانعة الصواعق (arresters) تحمي المتسعات من الشرارة الكهربائية عند حصول إرتفاع الجهد وفواصم (fuses) لفصل المتسعات من الشبكة في حال حصول عطل الدائرة القصيرة (short circuit) لحمايتها من التيار العالي جداً أو فصل المتسعة المعطوبة فقط لحماية الشبكة. أما في المناطق ذات تيار عطل عالي (high fault-current) فتستخدم أنواع من الفواصم (current-limiting fuses).

بالنسبة للمتسعات المتغيرة فهي إعتيادياً تحتوي على فواصل زيتية أو مفرغة من الهواء (vacuum) إضافة الى منظومة السيطرة والتحكم.



## الموقع الأمثل لمجموعة المتسعات على الشبكة

إن الموقع الأفضل للمتسعة هو قرب الحمل كما هو معلوم لأن المتسعة تؤثر عما قبلها، ولكن لأسباب تقنية واقتصادية فقد يصعب نشر المتسعات عند المستهلكين لذا كان لزاماً البحث عن الموقع الانسب والافضل لأن موقع المتسعة اذا لم يكن مناسباً قد يكون غير مفيد أو ذو تأثير سلبي. وتشير بعض الدراسات الى إن من المناسب إعتماد إستخدام متسعة ذات قدرة غير حقيقية (KVAR) يساوي 2/3 من القدرة غير الحقيقية (KVAR) الكلية للمغذي، وأن يكون مكان المتسعة على بعد 2/3 من طول المغذي من بداية المغذي (المحطة الثانوية) وتسمى هذه الطريقة بقاعدة الـ 2/3 (الثلثين). وهناك برامج حاسوبية تقوم بدراسة وحساب حالة الشبكة وإقتراح مواقع للمتسعات.

## محاذير ربط المتسعات على الشبكة

فإضافة الى الخطورة التي ذكرناها من إحتمال إرتفاع معامل القدرة الى قيمة (١) وتحوله الى متقدم (leading) والى إمكانية عطب متسعة طور واحد فقط مما يؤدي الى عدم التوازن بين الأطوار، فقضية الحالة العابرة (Transient) عند تشغيل واطفاء المتسعات التي تؤدي الى شحن وتفريغ المتسعات وتغير قيمة الرادة السعوية بسبب التذبذب في الحالة العابرة (Transient)، وهناك محذور آخر بسبب التوافقيات (Harmonics) حيث يمكن أن يؤدي ربط المتسعات مع وجود المحولات الى حالة رنين خطيرة عند دخول المتسعات في العمل ففي هذه الحالة التوافقيات التي تنتج بسبب الأجهزه اللاخطية سوف تتضاعف. إن إشكالية التضخم او التضاعف للتوافقيات تصبح اكبر من مسألة اضافة قدرة غير حقيقية (KVAR) الى المنظومة التي تتضمن مقدار مهم من الحمل اللاخطي. هذه المحاذير تتطلب دراسة علمية مفصلة عند وضع المتسعات على الشبكة.

# المصادر

١- معامل القدرة POWER FACTOR/ المهندس محمد الحريرى

2- A Guide for the Plant Engineer – Power Factor Correction\ Eaton Corporation\ 2004

3- 3phase circuits – circuit theory\ Huseyin Bilgekul

4- THE INDUSTRIAL WIKI\ BASIC AC POWER

5- Electrical Power Systems\ D. Das\ New Age In.Ltd., Publishers\ 2006

٦- البحث السنوي للمديرية العامة لتوزيع كهرباء الكرخ/ قسم التخطيط والدراسات/إستخدام المكثفات من النوع المتغير في محولات التوزيع الهوائية/٢٠١٢

٧- خصائص وإستخدامات الأسلاك/ م.مثنى محمد كاظم/ ٢٠٠٩

٨- مجموعة مقالات في مواقع إنترنيت باللغتين العربية والإنكليزية