

## DEFINITION OF POWER FACTOR

Inductive electrical loads demand more power than they convert to useful energy. Induction motors, for example, convert at most 80-90% of the delivered power into useful work or electrical losses.

The remaining power is used to establish an electromagnetic field in the motor. The field is alternately expanding and collapsing, thus the power drawn into the field in one instant is returned to the electric supply system in the next instant. The average power drawn by the field is zero.

The electrical current drawn by induction loads consists of two elements. The first of these is in-phase with the supply voltage. The second, and greater, element is out-of-phase with the supply voltage and lags the supply voltage by 90 electrically. The lagging current is primarily consumed to by the field windings of an induction motor. The total current drawn by a induction load is the vectorial sum of the in and out-of-phase elements.

The out-of-phase current has the effect of increasing the current demand of a motor. This, in turn, increases heating in cables and transformers supplying the motor. The additional current also increases voltage drop across these components. It is necessary to oversize transformers, cables and other elements in the supply circuit to such induction loads. Such oversizing results in an increase in the cost of the installation.

Demand power, calculated by multiplying the total (vectorially summed) current drawn by a induction load and the rms value of the supply voltage, is termed "apparent power". Apparent power is measured in kilo-volt amperes (kVA). The supply kVA is a measure of the capacity for which a system must be built.

Power consumed, calculated by multiplying the in-phase element of the current drawn by the rms value of the supply voltage, is termed "active power". Active power, is measured in kilowatts (kW). Power factor is the ratio of active power to apparent power:

$$\text{Cos } \varphi = \frac{\text{kW}}{\text{kVA}}$$

The highest possible power factor is 1.0, which means that 100% of the power delivered to the load is active power converted into useful energy.

Anything less than 1.0 indicates that the supply system must be built larger in order to serve the load.

Traditionally, concern for power factor has been almost exclusively linked with use of induction motors.

Now, facility engineers are also confronted with other non-linear loads.

Power electronic equipment, for example variable speed motor drives, uninterruptible power supplies, and induction furnaces, are the common types of non-linear loads. Arcing loads, for example arc-furnaces and arc-welders are also non linear.

Figure 1: Distorted current can be regarded as a sum of sinusoidal currents of various frequencies.

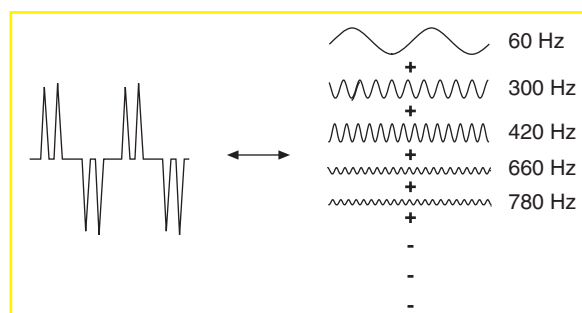


Figure 1: Les courants de distorsion peuvent être considérés comme la somme des courants sinusoïdaux de l'ensemble de fréquences.

## DÉFINITION DU FACTEUR DE PUISSANCE

*Les charges électriques demandent plus de puissance qu'elles n'en consomment. Les moteurs à inductions, par exemple, convertissent tout au plus 80-90 % de la puissance fournie en travail utile ou pertes électriques.*

*La puissance restante est utilisée comme moyen d'établir un champ électromagnétique dans le moteur.*

*Cependant l'action du champ magnétique augmente la demande de courant dans le moteur, qui augmente l'échauffement des câbles et des transformateurs alimentant le moteur. Le courant supplémentaire augmente également la chute de tension à travers ces composants.*

*Les sections de câble et le transformateur doivent être surdimensionnés pour tenir l'échauffement et la chute de tension dans les limites permises, ayant pour résultat des surcoûts.*

*La puissance requise ou puissance apparente, est plus importante que la puissance réelle nécessaire pour alimenter la charge.*

*La puissance apparente se calcule en multipliant les valeurs efficaces de tensions par les courants, et se mesure en (kVA). La puissance consommée ou puissance active, est mesurée en (kW).*

*Le facteur de puissance est simplement le rapport de la puissance active et de la puissance apparente:*

*Le facteur de puissance le plus élevé est 1 : cela signifie que 100 % de la puissance consommée est convertit en puissance utile. Une valeur inférieure à 1 indique que le système d'alimentation doit fournir une puissance (en kVA) supérieure à celle transformée pour le fonctionnement de la charge.*

*Traditionnellement, le facteur de puissance a toujours été associé aux moteurs à induction.*

*Maintenant, les ingénieurs sont également confrontés à ce problème avec des charges non linéaires.*

*Les dispositifs électroniques de puissance (commandes de moteurs variables, onduleurs, four à induction... etc.) sont des type commun des charges non linéaires. D'autres exemples également : les fours à arc et les machines à souder.*

Like inductive loads, non-linear loads degrade power factor by “borrowing” and returning power to the power supply system. The power system delivers current to a non linear load at the fundamental frequency (for example 50 Hz), and the load returns some of the current at higher, harmonic, frequencies (see figure 1). The current wave-form contains multiple frequencies and, therefore, is not sinusoidal. Where harmonic distortion of the supply waveform is present it is important to note that the harmonic current elements will contribute to the power factor.

As such the traditional methods for analyzing power factor are not appropriate when dealing with non-linear loads.

The definition of power factor as the ratio of active power to apparent power, on the other hand, is always correct, providing that the harmonic contribution to kVA and kW is accounted for.

## THE POWER TRIANGLE

The power triangle is commonly used to describe power factor for motors and others linear loads. Although it is not as applicable to non-linear loads such as adjustable-speed drives, it is still a useful concept to understand.

The power triangle can be illustrated using the R-X branch as shown below. If the branch voltage is perfectly sinusoidal, the current must also be sinusoidal, and will lag the voltage by some angle,  $\theta$ , called the “displacement angle”, or the power factor angle.

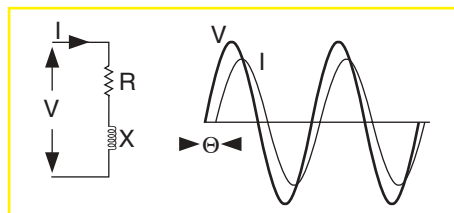


Figure 2: Displacement angle

The formulas for apparent power S, and active power P, yield the well known definition of power factor:

$$\begin{aligned} P &= R \cdot I^2 \\ S &= V \cdot I^2 \end{aligned} \Rightarrow \frac{P}{S} = \cos\theta = \text{DPF}$$

The term displacement power factor (DPF) is used to emphasize that the power factor has been calculated using the displacement angle, as opposed to true power factor (TPF), which is the ratio of P to S. This distinction is not normally made because when no harmonic sources are present DPF = TPF.

It is the DPF that most utilities currently measure, but there is a movement among some to measure TPF, which would include the effects of harmonic distortion. There are now electronic meters available which are capable of recording TPF accurately.

The formula  $P = S \cdot \cos \theta$  indicates that a right triangle relationship exists between the vectors for P and S as shown in Figure 3. The third side of the triangle, designated as Q, is called the “reactive power” and is measured in kVAr (kilovolt amperes reactive).

*La distorsion en courant peut être considérée comme la somme des courants sinusoïdaux de l'ensemble des fréquences. Comme les charges inductives, les charges non linéaires dégradent le facteur de puissance et renvoient la puissance au le système d'alimentation. Les réseaux de distribution envoient un courant à la charge non linéaire avec une fréquence fondamentale (exemple 60 Hz) et la charge retourne une partie de ce courant à une fréquence supérieure (cf figure 1).*

*Etant donné que la forme d'onde contient des fréquences multiples, une distorsion apparaît lors de la visualisation à l'oscilloscope. Le plus important est de noter que les méthodes traditionnelles pour décrire le facteur de puissance, ne sont pas appropriées aux charges non linéaires. Par contre, la définition du facteur de puissance, rapport entre la puissance apparente et la puissance active, est toujours correcte.*

## TRIANGLE DES PUISSANCES

*Le triangle des puissances est généralement utilisé pour décrire le facteur de puissance pour des moteurs et charges non linéaires. Bien qu'il ne soit pas applicable aux commandes de moteurs variables, c'est toujours un concept utile à comprendre.*

*Le triangle des puissances peut être illustré en utilisant le branchement R-X comme décrit ci-dessous. Si la tension est parfaitement sinusoïdale, le courant sera également sinusoïdal et déphasé d'un angle appelé “ angle de charge ” ou angle de phase.*

Figure 2: Déphasage d'angle

*La formule de puissance apparente (S) et la puissance active (P) comme la définition du facteur de puissance:*

*Ici, le facteur de puissance (DPF) est employé pour souligner que le facteur de puissance a été calculé en utilisant l'angle de phase, par opposition au vrai facteur de puissance (TPF) qui est le rapport de P et de S.*

*Dans ce cas précis, la distinction n'est pas faite parce qu'aucune distorsion harmonique n'est présente (DPF = TPF).*

*La formule  $P = S \cdot \cos \theta$  suggère une relation correcte entre P & S, comme défini sur la figure 3.*

*Le troisième côté du triangle, défini Q, est appelé puissance réactive et est mesuré en kvar (kilovoltampères réactif).*

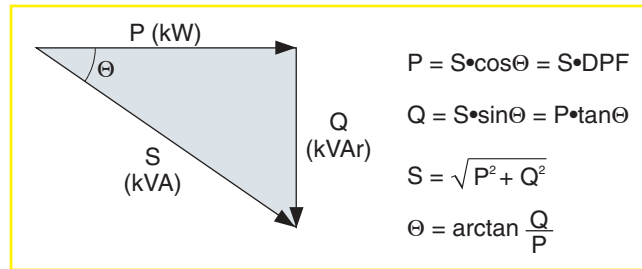


Figure 3 - Power Triangle

Figure 3 - Triangle de puissance

Q is actually a convenient mathematical contrivance, but is very useful because, if there is no distortion, it is conserved, just as active power is conserved. That is, the reactive power (vars) appears to flow around the system just like the active power (watts). In this concept, motor absorb vars while capacitors produce vars.

*Q est réellement une adaptation mathématique, mais il est utilisé pour décrire les phénomènes électriques. La puissance réactive apparaît comme une puissance qui découle du système comme une puissance active. Dans ce concept, on doit se rappeler que les moteurs absorbent des voltampères réactifs alors que les convertisseurs produisent des voltampères réactifs.*

## WHY SHOULD POWER FACTOR BE IMPROVED?

Raising system power factor provides the following benefits:

- lower utility charges
- increased system capacity
- less voltage drop
- reduced losses

### Reduced Electric Utility Charges

Thermal capacity considerations, discussed below, force the electric utility to overbuild its distribution system in order to serve a facility with low power factor. The utility may or may not charge the customer for the increased expense of larger system components. If it does, then adding capacitors is usually justifiable.

### Increasing System Capacity

The thermal capacity of generators, transformer, and cables limit the kVA that can be supplied from the system. Reducing the net kvar demand from existing loads allows additional load to be added to the system.

### Improving Voltage

High load kvar demand increases the voltage drops across transformers, cables, and other system components, resulting in decreased equipment utilization voltage.

In a weak system, capacity can be limited by excessive voltage drop, rather than by component thermal ratings.

### Reducing Circuit Losses

Since circuit current is reduced in direct proportion to the increase in power factor, the I<sup>2</sup>R loss, or resistive loss, in the circuit is inversely proportional to the square of the power factor.

By itself, loss reduction doesn't justify the cost of installing capacitors, but the added benefit can be substantial.

## POURQUOI LE FACTEUR DE PUISSANCE DEVRAIT-IL ÊTRE AMÉLIORÉ ?

Les avantages sont :

- Moins de charges utiles
- Augmentation de la puissance du système
- Moins de chute de tensions
- Réduction des pertes

### Réduction des charges électriques

*La considération sur la différence entre la puissance active et la puissance apparente force la compagnie d'électricité (EDF...) à surdimensionner les systèmes de distribution afin de fournir une puissance avec un cosφ bas. Des pénalités sont faites pour forcer le client à investir dans des condensateurs afin de supprimer cette énergie réactive.*

### Augmentation de la puissance du système

*La puissance thermique des générateurs, transformateurs et des câbles limitent les kVA qui peuvent être fournis par le système. En réduisant la demande en kvar du côté de la charge et en installant des condensateurs, cela permet de rajouter de la puissance sur le système.*

### Amélioration de la tension

*Une forte demande de puissance réactive, donc un cosφ très bas, détermine une augmentation de chute de tension sur le transformateur, sur les câbles et sur d'autres composants du système provoquant une réduction de la tension d'alimentation de la charge: la chute de tension peut être réduite en mode directement proportionnellement à l'augmentation du facteur de puissance.*

### Réduction des pertes

*Etant donné que le courant circulant se réduit proportionnellement à l'augmentation du facteur de puissance, les pertes résistives dans le circuit sont inversement proportionnelles au rephasage du facteur de puissance. L'augmentation du facteur de puissance détermine une réduction des pertes qui pourtant ne justifie pas le coût pour l'installation de condensateurs mais les avantages peuvent être importants.*

## METHODS OF REACTIVE COMPENSATION

### Capacitors

By nature of its electrostatic field, the capacitor stores energy when ever the voltage applied across the capacitors is moving away from zero; it gives up energy after the voltage as crested. This sequence is opposite to that of the magnetic field, so the capacitor can be used to supply magnetizing current that would otherwise be drawn from the utility source.

Capacitors are generally the most economical source of reactive compensation. Other advantages include:

- low losses (less than 1/4 Watt / kvar)
- essentially no maintenance
- light, compact units which can be combined as needed, make capacitors relatively easy to install and modify as reactive compensation needs change.

### Static Var System

Loads such as arc furnaces and welders exhibit a rapidly changing current demand which may result in an unacceptable fluctuation of bus voltage, called flicker.

One way to eliminate the flicker problem is to use a controller that can match the load's instantaneous reactive current demand. Only static var controllers employing semiconductor switches provide the speed required to accomplish this.

## COMPENSATION SYSTEM

### Individual correction

This type of compensation is reasonable for consumer are turned with high capacities, constant load and long operating times.

- The capacitor is installed close to the operating equipment. The lower current flows already in the line from the bus bar to the consumer.
- The capacitor and the consumer are turned on and off together; an additional switch is not required.

When selecting the type of capacitors note that in the case of induction motors, the reactive power supplied by the capacitor must not exceed approx. 90% of the motor reactive power in idle operation. Otherwise, disconnection might cause self-excitation by the resonance frequency, since the motor and the capacitor form a resonant circuit. This effect may lead to high over voltages at the terminals and affect the insulation of the operating equipment.

### Group Correction

A group of consumers, e.g. motors of fluorescent lamps, operated by one common switch, can be compensated with one single capacitor.

### Centralized Correction

The solution for correcting the power factor for a great number of small consumers with varying power consumption is a centralized compensation principle using switched capacitor modules and a controller. The low losses of the capacitors allows them to be integrated directly in the switchboards or distributors.

A programmable controller is used to monitor the power factor and to switch the capacitors according to the reactive-power flow.

## METHODES POUR LA COMPENSATION REACTIVE

### Condensateurs

*Par la nature du champ électrostatique, les condensateurs emmagasinent de l'énergie lorsque l'on applique sur ceux-ci une tension.*

*L'énergie est restituée quand la tension est à zéro.*

*Les condensateurs sont généralement le système le plus économique pour la compensation de la puissance réactive.*

*D'autres avantages important sont :*

- pertes basses (moins de 1/4 W par kvar)
- aucun entretien
- produits compact et léger qui facilite leur montage et leurs modifications suivant les exigences.

### Système statique

*Les charges comme les fours à arc et les appareils à souder présentent des courants rapidement variables dans le temps. Cela peut avoir comme effet, une variation non acceptable de la tension, appelée aussi effet "flicker". La solution pour éliminer cet effet indésirable consiste à utiliser un système de contrôle capable du suivre instantanément la demande de puissance réactive. Seuls les systèmes qui utilisent des contacteurs à semi-conducteurs, nommés également "contacteurs statiques" ont des temps d'intervalle compatible pour palier au problème.*

## SYSTÈME DE REPHASAGE (compensation)

### Rephasage individuel

*Ces systèmes sont utilisés pour des charges de grosses puissances avec une absorption constante et un temps de fonctionnement très long.*

- Les condensateurs sont installés à proximité de la charge. La réduction du courant est visible en amont du raccordement ou sur la ligne d'alimentation générale.
- Quand on sélectionne le type de condensateurs, il faut se rappeler qu'avec des moteurs à induction, la puissance réactive fournie par les condensateurs ne doit pas excéder 90 % de la puissance réactive du moteur à vide, sinon un phénomène d'auto-excitation peut se produire (résonance entre moteurs et condensateurs).

### Rephasage par groupe de charge

*Si un groupe de charge constitue la part la plus importante de la puissance installée, il est possible d'effectuer une compensation avec un seul compensateur afin d'améliorer le cosφ directement sur l'alimentation générale du groupe de charge.*

### Rephasage centralisé

*Afin d'améliorer le facteur de puissance sur une installation avec beaucoup de petites charges et avec des variations importantes de puissance, nous conseillons d'installer une batterie de condensateurs automatique avec régulateur électronique. Ce dernier permettra d'activer et de désactiver les racks de condensateurs automatiquement selon les besoins réels sur l'installation.*

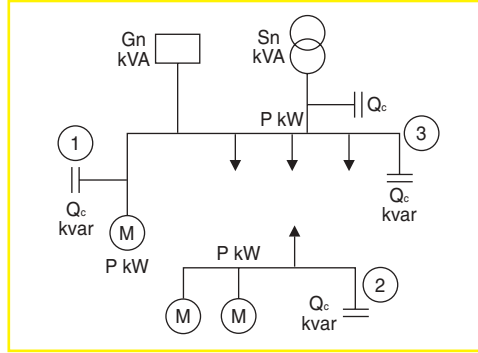


Figure 4 - Installation examples

Figure 4 - Exemples d'installations possibles

## CAPACITORS SIZING

The loads connected in a 3-phase system present an inductive characteristic which causes the absorption of active and reactive power. This reactive power is an undesired load for the supply line and it leads to higher expenses on the energy bill. Reactive power can be balanced by the presence of power factor correction capacitors.

The power triangle calculations of Figure 3 simplify to:

$$\text{kvar}_{\text{Cap}} = \text{kW}_{\text{Load}} \cdot (\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) = \text{kW}_{\text{Load}} \cdot M$$

where M is calculated as show in the following table

## CHOIX DES CONDENSATEURS DE REPHASAGE

Les charges triphasées présentent des caractéristiques inductives qui provoquent l'absorption des puissances actives et réactives. La partie de la puissance réactive représente une charge supplémentaire pour la ligne d'alimentation et provoque des coûts élevés au niveau de la facture électrique et des relevés d'énergie. Cette puissance réactive peut être compensée en installant des condensateurs de rephasage. Du triangle des puissances (cf figure 3) on obtient :

(M est calculé suivant le tableau ci-dessous)

Table for the determinator of M factor - Tableau pour la détermination du facteur M

	$\tan\varphi_2$	0,62	0,59	0,57	0,54	0,51	0,48	0,46	0,43	0,40	0,36	0,33	0,29	0,25	0,20	0,14	0,00
	$\cos\varphi_2$	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	1,00
$\tan\varphi_1$	$\cos\varphi_1$																
4,90	0,20	4,28	4,31	4,33	4,36	4,39	4,41	4,44	4,47	4,50	4,54	4,57	4,61	4,65	4,70	4,76	4,90
3,87	0,25	3,25	3,28	3,31	3,33	3,36	3,39	3,42	3,45	3,48	3,51	3,54	3,58	3,62	3,67	3,73	3,87
3,18	0,30	2,56	2,59	2,61	2,64	2,67	2,70	2,72	2,75	2,78	2,82	2,85	2,89	2,93	2,98	3,04	3,18
2,68	0,35	2,06	2,08	2,11	2,14	2,16	2,19	2,22	2,25	2,28	2,31	2,35	2,38	2,43	2,47	2,53	2,68
2,29	0,40	1,67	1,70	1,72	1,75	1,78	1,81	1,84	1,87	1,90	1,93	1,96	2,00	2,04	2,09	2,15	2,29
1,98	0,45	1,36	1,39	1,42	1,44	1,47	1,50	1,53	1,56	1,59	1,62	1,66	1,69	1,73	1,78	1,84	1,98
1,73	0,50	1,11	1,14	1,17	1,19	1,22	1,25	1,28	1,31	1,34	1,37	1,40	1,44	1,48	1,53	1,59	1,73
1,52	0,55	0,90	0,93	0,95	0,98	1,01	1,03	1,06	1,09	1,12	1,16	1,19	1,23	1,27	1,32	1,38	1,52
1,33	0,60	0,71	0,74	0,77	0,79	0,82	0,85	0,88	0,91	0,94	0,97	1,00	1,04	1,08	1,13	1,19	1,33
1,17	0,65	0,55	0,58	0,60	0,63	0,66	0,68	0,71	0,74	0,77	0,81	0,84	0,88	0,92	0,97	1,03	1,17
1,02	0,70	0,40	0,43	0,45	0,48	0,51	0,54	0,56	0,59	0,62	0,66	0,69	0,73	0,77	0,82	0,88	1,02
0,99	0,71	0,37	0,40	0,43	0,45	0,48	0,51	0,54	0,57	0,60	0,63	0,66	0,70	0,74	0,79	0,85	0,99
0,96	0,72	0,34	0,37	0,40	0,42	0,45	0,48	0,51	0,54	0,57	0,60	0,64	0,67	0,71	0,76	0,82	0,96
0,94	0,73	0,32	0,34	0,37	0,40	0,42	0,45	0,48	0,51	0,54	0,57	0,61	0,64	0,69	0,73	0,79	0,94
0,91	0,74	0,29	0,32	0,34	0,37	0,40	0,42	0,45	0,48	0,51	0,55	0,58	0,62	0,66	0,71	0,77	0,91
0,88	0,75	0,26	0,29	0,32	0,34	0,37	0,40	0,43	0,46	0,49	0,52	0,55	0,59	0,63	0,68	0,74	0,88
0,86	0,76	0,24	0,26	0,29	0,32	0,34	0,37	0,40	0,43	0,46	0,49	0,53	0,56	0,60	0,65	0,71	0,86
0,83	0,77	0,21	0,24	0,26	0,29	0,32	0,34	0,37	0,40	0,43	0,47	0,50	0,54	0,58	0,63	0,69	0,83
0,80	0,78	0,18	0,21	0,24	0,26	0,29	0,32	0,35	0,38	0,41	0,44	0,47	0,51	0,55	0,60	0,66	0,80
0,78	0,79	0,16	0,18	0,21	0,24	0,26	0,29	0,32	0,35	0,38	0,41	0,45	0,48	0,53	0,57	0,63	0,78
0,75	0,80	0,13	0,16	0,18	0,21	0,24	0,27	0,29	0,32	0,35	0,39	0,42	0,46	0,50	0,55	0,61	0,75
0,72	0,81	0,10	0,13	0,16	0,18	0,21	0,24	0,27	0,30	0,33	0,36	0,40	0,43	0,47	0,52	0,58	0,72
0,70	0,82	0,08	0,10	0,13	0,16	0,19	0,21	0,24	0,27	0,30	0,34	0,37	0,41	0,45	0,49	0,56	0,70
0,67	0,83	0,05	0,08	0,11	0,13	0,16	0,19	0,22	0,25	0,28	0,31	0,34	0,38	0,42	0,47	0,53	0,67
0,65	0,84	0,03	0,05	0,08	0,11	0,13	0,16	0,19	0,22	0,25	0,28	0,32	0,35	0,40	0,44	0,50	0,65
0,62	0,85		0,03	0,05	0,08	0,11	0,14	0,16	0,19	0,22	0,26	0,29	0,33	0,37	0,42	0,48	0,62
0,59	0,86			0,03	0,05	0,08	0,11	0,14	0,17	0,20	0,23	0,26	0,30	0,34	0,39	0,45	0,59
0,57	0,87				0,03	0,05	0,08	0,11	0,14	0,17	0,20	0,24	0,28	0,32	0,36	0,42	0,57
0,54	0,88					0,03	0,06	0,08	0,11	0,14	0,18	0,21	0,25	0,29	0,34	0,40	0,54
0,51	0,89						0,03	0,06	0,09	0,12	0,15	0,18	0,22	0,26	0,31	0,37	0,51
0,48	0,90							0,03	0,06	0,09	0,12	0,16	0,19	0,23	0,28	0,34	0,48
0,46	0,91								0,03	0,06	0,09	0,13	0,16	0,20	0,25	0,31	0,46
0,43	0,92									0,03	0,06	0,10	0,13	0,18	0,22	0,28	0,43
0,40	0,93										0,03	0,07	0,10	0,14	0,19	0,25	0,40
0,36	0,94											0,03	0,07	0,11	0,16	0,22	0,36

$\cos\varphi_1$  = original power factor before correction -  $\cos\varphi_2$  = new power factor

$\cos\varphi_1$  = facteur de puissance avant compensation -  $\cos\varphi_2$  = nouveau facteur de puissance