

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.

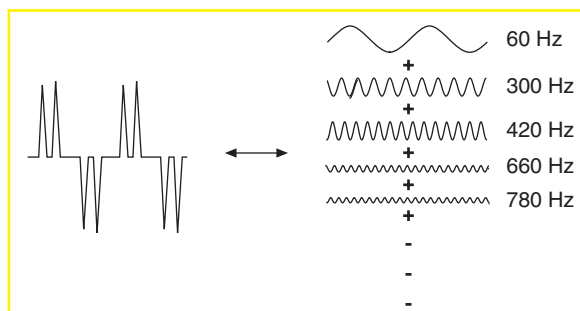


Figura 1: Las corrientes de distorsión puede ser considerado como la suma de corrientes sinusoidales de varias frecuencias.

DEFINICIÓN DE FACTOR DE POTENCIA

Las cargas eléctricas inductivas requieren más potencia que la que convierten en energía útil. Los motores de inducción, por ejemplo, a lo sumo el 80 o 90% de la potencia en trabajo útil o en pérdidas eléctricas. La potencia restante es utilizada para establecer un campo electromagnético en el interior del motor. El campo es alternativo extendiéndose y contrayéndose, de este modo, la potencia dibujada en el campo en un instante es devuelta al subministro eléctrico en el siguiente instante. La potencia media dibujada por el campo es cero. La corriente eléctrica dibujada por corrientes inductivas consiste en dos elementos. El primero de estos es en fase con el subministro de voltaje. El segundo, y mayor elemento esta desfasado con el suministro de voltaje y retrasado con el suministro de voltaje en 90°. La corriente retrasada es primeramente consumida por el campo bobinado de un motor de inducción. La corriente total por una carga de inducción es la suma vectorial de los elementos en fase y desfase. La corriente desfasada tiene el efecto de incrementar la corriente demandada por el motor. Este, a su vez, incrementa el calentamiento en los cables y en los transformadores que suministran al motor. La corriente adicional también incrementa la caída de voltaje a través de estos componentes. Es necesario sobredimensionar los transformadores, cables y otros elementos en el circuito de suministro para semejantes cargas inductivas. Tales sobredimensionamiento resulta en un incremento en el coste de la instalación.

La potencia aparente se calcula multiplicando los valores eficaces de tensión por las corrientes y se mide en KVA.

El suministro kVA es una medida de la capacidad para la que un sistema debe ser construido. La potencia consumida, calculada multiplicando la corriente por los valores RMS de tensión del subministro, es denominado "potencia activa". La potencia activa, es medida en kilowatios (kW). El factor de potencia es el cociente entre la potencia activa y la potencia aparente:

El máximo factor posible es 1.0, lo que significa que el 100% de la potencia suministrada a la carga es potencia activa convertida en energía útil. Cualquier valor menor que 1, indica que el sistema de alimentación debe ser construido más grande en orden de servir a las cargas. Tradicionalmente, el establecimiento del factor de potencia ha estado casi exclusivamente vinculado con el uso de motores inductivos. Ahora, los ingenieros están también enfrentados con otras cargas no lineales. Equipos de electrónica de potencia, por ejemplo motores de elementos de velocidad variable, suministro no interrumpido de potencia UPS, y altos hornos de inducción, son los tipos más corrientes de cargas no lineales. Cargas de formación de un arco eléctrico, por ejemplo altos hornos por arco, y soldadura por arco son también cargas no lineales.

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 60 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.

La distorsión en corriente puede ser considerada como la suma de corrientes sinusoidales de varias frecuencias. Como las cargas inductivas, las cargas no lineales degradan el factor de potencia y devuelven potencia al sistema suministrador. El sistema de potencia envía corriente a cargas no lineales a la frecuencia fundamental (por ejemplo 60 Hz), y la carga devuelve algo de esta corriente a una mayor frecuencia armónica (ver figura 1). La forma de la onda de la corriente contiene múltiples frecuencias, y por lo tanto, no es sinusoidal. Los métodos tradicionales para analizar factores de potencia no son apropiados cuando tratamos con cargas no lineales. La definición de factor de potencia es el ratio de potencia activa entre potencia aparente, es siempre correcta.

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, θ , called the “displacement angle”, or the power factor angle.

TRIANGULO DE POTENCIA

El triángulo de potencia ha sido generalmente utilizado para describir el factor de potencia para motores y otras cargas lineales. Aunque no es aplicable a cargas no lineales tales como dispositivos ajustables en velocidad, este es aun un concepto útil para entender. El triángulo de potencia puede ser ilustrado usando el ramal R-X como está mostrado abajo. Si en el ramal el voltaje es perfectamente sinusoidal, la corriente debe ser igualmente sinusoidal, y será desfasada al voltaje por un ángulo, θ , llamado “ángulo de desfase”, o ángulo de factor de potencia.

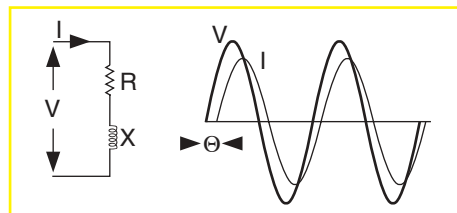


Figure 2: Displacement angle

Figura 2: ángulo de desfase

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

Las fórmulas para potencia aparente S, y potencia activa P, producen la bien sabida fórmula de factor de potencia:

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

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.

El término de desplazamiento del factor de potencia (DPF) es utilizado para recalcar que el factor de potencia ha sido calculado usando el ángulo de desplazamiento, como opuesto del verdadero factor de potencia (TPF), que es el coeficiente entre P y S. Esta distinción normalmente no se hace porque cuando fuentes de no armónicos son presentes DPF = TPF. Este es el DPF que más corrientemente se utiliza como medida, pero este es un movimiento entre algo para medir TPF, que incluiría los efectos de una distorsión armónica. Hay ahora contadores eléctricos disponibles, que son aptos para registrar TPF con precisión.

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 fórmula $P = S \cdot \cos \theta$ indica que existe una relación en triángulo recto entre los vectores para P y S mostrado en la figura 3. El tercer lado del triángulo, designado como Q, es llamado “potencia reactiva” y es medido en kvar (kilovoltio amperio reactivo).

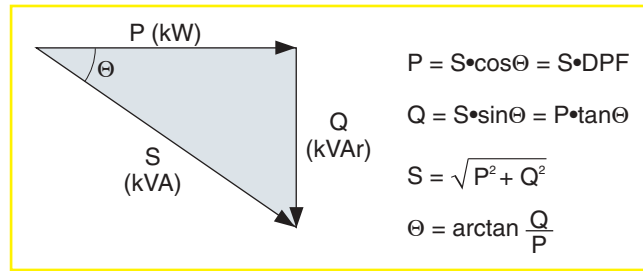


Figure 3: Power Triangle

Figura 3: triangulo de potencias

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 es actualmente un convenio matemático diseñado, pero es muy útil porque, si no hay distorsión, se conserva, justamente como la potencia activa conservada. Esto es, la potencia reactiva (voltio amperio reactivo) aparece para circular alrededor del sistema justo como la potencia activa (wattios). En este concepto, el motor absorbe voltio amperios reactivos mientras los condensadores eléctricos producen voltio amperios reactivos.

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

¿PORQUÉ DEBE EL FACTOR DE POTENCIA SER PERFECCIONADO?

Elevación de sistema de factor de potencia proporciona los siguientes beneficios:

- *Inferior coste de tarificación*
- *Incremento de la capacidad del sistema*
- *Menos caída de voltaje*
- *Reducción de pérdidas*

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.

Reducción en la tarifa eléctrica

Consideraciones sobre capacidades térmicas, discutidos más abajo, fuerzan a la compañía de electricidad a sobredimensionar su sistema de distribución en orden para servir a una utilización con menor factor de potencia. La penalización son realizadas para forzar al cliente a instalar condensadores a fin de suprimir esta energía reactiva. Si es así, entonces el instalar de condensadores eléctricos es usualmente justificable.

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.

Incremento de la capacidad del sistema

La capacidad térmica de los generadores, transformadores y cables limita el kVA que pueden ser suministrados por el sistema. Reduciendo la demanda para cargas existentes pueden ser añadidas al sistema.

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.

Mejoramiento del voltaje

Altas cargas reactivas (kvar) con un coseno de fi bajo determina el aumento de la caída de voltaje a través de los transformadores, cables, y otros componentes del sistema, provocando una reducción de la tensión de alimentación de la carga, la caída de tensión puede ser reducida en modo directamente proporcional al aumento de factor de potencia.

Reducing Circuit Losses

Since circuit current is reduced in direct proportion to the increase in power factor, the I²R 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.

Reducción de pérdidas del circuito

Dado que la corriente del circuito es reducida en proporción directa con el incremento en factor de potencia, el I²R pérdida, o resistencia específica a pérdidas, en el circuito es inversamente proporcional con el cuadrado, del factor de potencia. Por si mismo, la reducción de pérdidas no justifica el costede la instalación de condensadores, pero el beneficio añadido puede ser sustancial.

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.

MÉTODOS DE COMPENSACIÓN REACTIVA

Condensadores

Por la naturaleza de este campo electroestático, el condensador almacena energía cuando el voltaje suministrado al condensador está alejándose de cero, este entrega energía cuando el voltaje esta a cero. Esta secuencia es la opuesta del campo magnético, ya que el condensador puede ser usado para suministrar corriente magnetizada que de otra manera seria dado por la fuente de la compañía.

Los condensadores son generalmente la más barata fuente de compensación reactiva. Otras ventajas incluyen:

- *bajas pérdidas (inferiores a 1/4 Watt/kvar)*
- *esencialmente bajo mantenimiento*
- *unidades compactas que pueden ser combinadas cuando sea necesario, haciendo equipos de condensadores más grandes*

Sistema estático voltio amperio reactivo

Cargas como altos hornos-arco y soldadura por arco presentan corrientes rápidamente variables en el tiempo. Esta puede tener como efecto una variación no aceptable de la tensión, llamado efecto flicker. Una manera de eliminar el problema del flicker es usar un sistema controlador que puede igualar, las cargas instantáneamente según la demanda de corriente reactiva. Solo los controladores estáticos empleando un conmutador semiconductor pueden proveer la velocidad requerida para cumplir esto.

SISTEMA DE COMPENSACIÓN

Corrección individual

Este tipo de compensación es razonable para consumidores que necesitan mayores capacidades, tienen cargas constantes y largos tiempos de operación.

- *El condensador es instalado cercano al equipo a compensar. Una menor corriente fluye ya en la línea desde la unión hasta la compañía.*

El condensador y el consumidor son puestos en marcha y desconectados a la vez y un contactor adicional no es necesario. Cuando escojamos el tipo de condensadores, vigilar hay que en el caso de los motores de inducción, la potencia reactiva proveída por el condensador no debe exceder aproximadamente el 90% de la potencia reactiva del motor en operación libre (en vacío). De lo contrario, se puede producir una auto excitación por la frecuencia de resonancia, dado que el motor y el condensador forman un circuito resonante. Este efecto puede producir sobrevoltaje en los terminales y afectar el aislamiento del equipo operativo.

Corrección grupo

Un grupo de consumidores, por ejemplo motores o lámparas fluorescentes, operados por un mismo contactor o interruptor pueden ser compensados por un único condensador.

Corrección centralizada

La solución para corregir el factor de potencia para un gran numero de pequeños consumidores con consumo de potencia variable es una compensación centralizada principal usando equipo automático y regulador. Esta permitirá de activar y desactivar los escalones automáticos según las necesidades de la instalación. Un controlador programable es usado para monitorizar el factor de potencia y para conmutar los contactores de acuerdo con la potencia reactiva circulante.

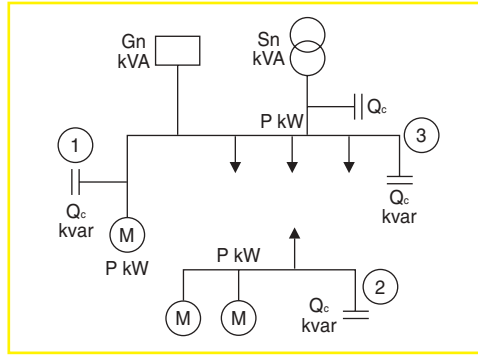


Figure 4 - Installation examples

Figura 4: Ejemplos de instalaciones posibles

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

ELECCIÓN DE LOS CONDENSADORES

Las cargas conectadas a un sistema trifásico presentan una característica inductiva que causa la absorción de potencia activa y reactiva. Esta potencia reactiva es una indeseada carga para la línea de alimentación y lleva a unos mayores gastos en la factura de la energía. La potencia reactiva puede ser compensada por la presencia de condensadores correctores del factor de potencia.

El triángulo de potencia calculado en la figura tres se simplifica:

Donde M es calculada como se muestra en la siguiente tabla:

Table for the determinator of M factor - Tabla para la determinación del factor 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

$\cos\varphi_1$ = factor de potencia antes de compensar - $\cos\varphi_2$ = factor de potencia a conseguir

HARMONICS CONSIDERATION

What are harmonic?

Non-linear loads draw current which is distorted resulting in the presence of multiple frequencies. A non-linear load can be visualized as a current source, drawing current from the system at the fundamental frequency, and injecting current back into the system at higher frequencies.

The current waveform, though distorted, is usually identical from one cycle to the next. This means that all frequencies in the waveform are harmonics (integer multiples) of the fundamental. For example, the harmonics contained in the waveform of Figure 1 are 1, 5, 7, 11 ... Why only these harmonics? The current waveforms with identically shaped positive and negative half cycles do not have any even harmonics (2, 4, ...).

Triplen harmonics (odd multiples of 3, 9, 15, ...) are usually negligible for the type of three-phase non-linear loads that we generally encounter for industrial power factor correction. However, they can be quite significant for single-phase loads. Figure 5 shows the reason why. If the harmonic sources in each phase are balanced, any third harmonic components in the phase current must be in phase.

Therefore, they add directly into the neutral, if it exists. Summing currents at the neutral node, N, shows that if the circuit has a neutral wire and is serving single-phase loads, the third harmonic in the neutral current is three times the third harmonic in the phase current.

On the other hand, if there is no neutral wire, as in the case for the larger 3-phase non linear loads industrial plants, there will generally be no third harmonic current in the phase wires because there is no place for it to flow.

Therefore, we commonly ignore these components for design of power factor capacitor installations unless we have special reasons to believe they exist.

The most common location for triplen harmonic problems in an industrial plant is on 120V / 208V circuits where it is not common to place capacitors for power factor correction. They also appear commonly on utility 4-wire wye distribution feeders because there are several 3-phase loads.

LOS ARMÓNICOS

¿Qué son los armónicos?

Las cargas no lineales absorben una corriente que es deformable resultante de la presencia de múltiples frecuencias. Una carga no lineal puede ser visualizada como una fuente de corriente del sistema a la frecuencia fundamental, y inyectando corriente atrás en el sistema a más altas frecuencias.

La forma de la onda de la corriente, aunque distorsionada, es usualmente identificada desde un ciclo hasta el siguiente. Esto significa que todas las frecuencias en la forma de onda son armónicas (numero entero múltiples) del fundamental. Por ejemplo, los armónicos descrito en la forma de onda de la figura 1 son 1,5,7,11... ¿Porqué solo estos armónicos? La onda de corriente con medio periodo positivo idéntico al medio periodo negativo nunca tienen armónicos pares (2,4,6...). Los armónicos impares múltiplos de 3 (3,9,15...) son habitualmente perjudiciales por las cargas trifásicas no lineales que generalmente encontramos en el sector industrial. Estas pueden ser muy significativas en el caso de carga monofásica. La figura 5 muestra las razones de este efecto, si las fuentes armónicas dentro de cada fase son equilibradas no hay armónico tercero en los conductor de fase, por contra estos componentes se suma automáticamente en el neutro si este existe. La suma de las intensidades en el modo neutro demuestra que si el circuito tiene un conductor neutro y alimentado por las cargas monofásicas, la componente de armónico 3 de intensidad sobre la neutra es 3 veces más grande que la componente de armónico 3 sobre los conductores de fase. Por otro lado si no existe el conductor neutro, como en el caso de cargas no lineales de tipo industrial, estas no producen armónico 3 sobre los cables ya que no existe ningún soporte circular. En este caso nosotros ignoramos estos componentes para diseñar el condensador de factor de potencia, aunque tenemos razones para creer que existe.

El problema de armónico 3 se manifiesta mas a menudo en una planta industrial de 120 V/208 V circuito donde no es común poner condensadores para corregir el factor de potencia. Estos armónicos también aparecen comúnmente dentro de las redes con 4 conductores donde las cargas trifásicas pueden estar presentes.

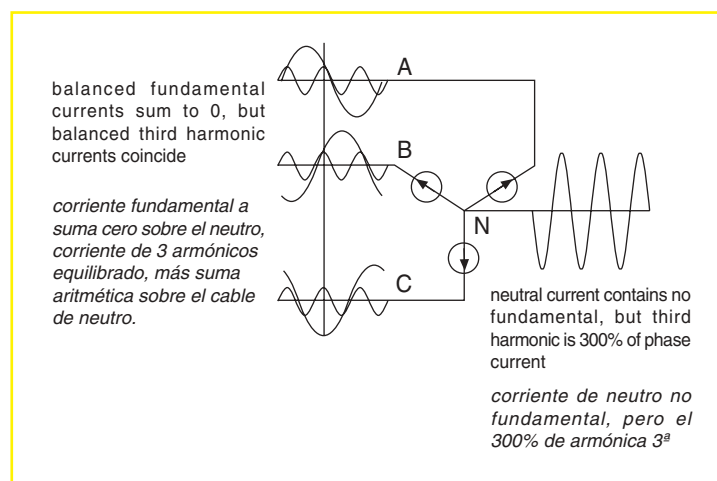


Figure 5: flow of triple harmonic currents

Figura 5: circulación de corriente armónica múltiplo de 3

Why the Concern for Harmonics?

Distorted currents and the distorted voltages they create as they flow through system impedances, can reduce equipment operating reliability and service life. Potential problems include the following.

Failure of power factor correction capacitors

The presence of power factor correction capacitors in the building greatly increases the potential for harmonic problems. A capacitor can cause the system to resonate near harmonic frequency, producing high voltage and/or current distortion that can destroy the capacitor or cause nuisance capacitor fuse/breaker operation.

Equipment misoperation

Circuit breakers, adjustable speed drives (ASDs), programmable logic controllers, and other equipment employ control circuits that may not operate correctly in a distorted environment. Distortion of the equipment supply voltage may cause inaccurate measurement of control input signals. It can produce multiple zero crossing per cycle of the input signal waveform, causing crossing detector to malfunction. Typical problems include clocks running fast hunting and oscillation in motor speed control system, and circuit breaker failure to trip or nuisance trips. Voltage distortion can also reduce the ability of electronic equipment to withstand momentary voltage sags and interruptions.

Overheating of transformer

Winding eddy current losses and other stray losses vary roughly with the square of the frequency of the load current. Therefore, harmonic load currents significantly increase transformer heating. This problem is most severe in drive-type transformers.

Overloading of neutral conductor

In three-phase 4-wire circuits serving single-phase electronic power supply loads. As with transformers, harmonic current increase conductor heating. However, the neutral conductor is a special concern due to the phenomenon illustrated in Figure 5. Triplen harmonic currents from each phase add in the neutral. Though balancing loads among the phases will eliminate fundamental current in the neutral, this is not true for the triplen. Neutral current can be approximately 70% higher than phase conductor current for circuits serving balanced computer loads.

Efecto de los armónicos:

La presencia de intensidad y de tensión armónica puede reducir la eficacia de funcionamiento de los equipamientos y manifestar los problemas siguientes.

Fallo de los condensadores de corrección del factor de potencia:

La presencia de condensadores de corrección del factor de potencia aumentan fuertemente los problemas provocados por armónicos los condensadores pueden causar fenómenos de resonancia en correspondencia con unas frecuencias de componentes armónicas. Esta puede provocar una distorsión de tensión y/o de corriente que puede destruir los condensadores o provocar disyunciones intempestivas.

Desperfectos sobre los equipos

Los interruptores automáticos variables en velocidad, controladores lógicos programables, así como cualquier otro aparato electrónico pueden ser perturbados sobre una red con presencia de armónicos. Los problemas más frecuentes son las oscilaciones dentro de los sistemas de control de los motores, anomalías o desperfectos sobre los disyuntores. La distorsión armónica en tensión puede provocar las interrupciones mas o menos prolongadas de la tensión de alimentación.

Sobrealimentación de los transformadores

Las pérdidas de corriente de "FOUCAULT" dentro de los arrollamientos y corrientes dispersas varían con la frecuencia de intensidad en la carga. La intensidad de carga por tanto con la presencia de armónicos aumenta significativamente el calentamiento de los transformadores.

Sobrecarga del conductor de neutro

Se constata una sobrecarga del conductor neutro dentro de los sistemas trifásicos a 4 conductores que alimentan las cargas de potencia monofásicas con los componentes electrónicos. Como por los transformadores, los armónicos de corriente aumentan el calentamiento del conductor (fenómeno ilustrado en la figura 5). Las corrientes de armónicos múltiples de 3 sobre cada fase se adicionan sobre el neutro. Sin embargo el equilibrado de cargas elimina la componente de corriente fundamental pero no el armónico 3. La corriente sobre el neutro puede ser en algunos casos superior al 70% de la intensidad sobre los conductores de fase dentro de las redes que alimentan los ordenadores.

MEASURE OF HARMONIC DISTORTION

There are several measures used for indicating the harmonic content of a waveform with a single number. One of the most common is Total Harmonic Distortion (THD), which can be calculated for voltage or current:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (M_h)^2}}{M_1}$$

where M_h is the rms magnitude of harmonic component h and M_1 is the magnitude of the fundamental value.

TDH is related to the rms, or root mean square, value of the waveform as follows:

$$rms = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (M_h)^2} = M_1 \cdot \sqrt{1 + THD^2}$$

HARMONIC MITIGATION

Capacitor sizing to control resonance

In many cases, harmonic problem can be eliminated by selecting capacitor size to avoid problem resonance. For an automatically switched bank, step sizes must be selected to skip over resonance, and the controllers programmed accordingly.

Unfortunately, this technique will not always work. First, the resonant peaks may be so high and broad that any capacitor size within the desired range of compensation is unacceptable. Second, if capacitors are automatically controlled or switched with motors, high diversity in plant load may make it impossible to avoid all resonant configurations.

Harmonic filters

The most common type of filter is the band pass ("notch") filter illustrated in Figure 6. The notch refers to the dip in the characteristic at the tuned frequency.

Notch filters provide reactive compensation like a capacitor bank, but the inductors introduce a series resonance which diverts harmonic current into the filter. Part (c) of the figure shown that the filter does not eliminate parallel resonance - it merely shifts the resonance to some frequency below the notch frequency. In order to prevent a second resonance problem, filters must be added starting with the lowest problem harmonic. For example, a fifth harmonic filter must be in service before a seventh harmonic filter can be energized.

Notch filters are generally tuned below the harmonic to be suppressed. Slightly detuning the filter in this way causes the impedance of the filter at the target harmonic to be not quite zero. This actually reduces capacitor and reactor current duty. The tuning is always below the target harmonic in order to insure that parallel resonance is well below harmonic. (Tolerance in the capacitor and reactor ratings may result in the notch and peak frequencies being higher than calculated.)

MEDIDA DE LA DISTORSION ARMONICA:

Existen muchos modos para indicar el contenido de armónicos de una forma de onda. La mas utilizada es la tasa de distorsión armónica total (THD) que puede ser calculada para voltaje o corriente:

M_n Donde M_h es la amplitud de la componente armónica de orden h y M_1 es la amplitud de la componente fundamental.

La THD así como el verdadero valor eficaz de una forma de onda y son ligados por la siguiente relación:

REDUCCIÓN DE HARMÓNICOS

Elección de condensadores y verificación del fenómeno de resonancia

En muchos casos, los fenómenos de armónicos pueden ser eliminados o al menos evitados eligiendo los condensadores adecuados para no causar problemas de resonancia.

En el caso de una batería automática la potencia de cada escalón debe ser seleccionada para evitar la resonancia. Esta técnica no funciona en todos los casos. En un primer tiempo los picos de resonancia pueden ser tan elevados que un condensador no los soportaría. Por otro lado si los condensadores son controlados automáticamente, la diversidad de condiciones del funcionamiento puede hacer imposible eliminar el fenómeno.

Filtro pasivos

La solución mas utilizada para la reducción de armónicos es el filtro pasivo paso-banda (figura 6) el filtro provisto de la potencia reactiva como una batería de condensadores mas las reactancias instaladas determinan una resonancia serie que, desvía la corriente armónica dentro del filtro.

La parte C de la línea muestra que el filtro no elimina la resonancia paralela, pero la desplaza a una frecuencia inferior a la frecuencia de acuerdo.

A fin de impedir un mal funcionamiento, los filtros deben calcularse ajustarse en principio para los armónicos inferiores. Los filtros pasivos son generalmente estudiados al considerar una frecuencia de acuerdo ligeramente diferente del armónico a filtrar. En este caso, la impedancia del filtro no es igual a cero, y es reducido a la intensidad nominal de los condensadores y de sus inductancias.

La frecuencia de acuerdo es normalmente desplazada hacia el bajo con el fin de asegurar que la resonancia paralela esta bien por debajo de los armónicos presentes (la tolerancia sobre los condensadores y sobre las reactancias puede tener como consecuencia que la frecuencia de la resonancia paralela sea superior a esta calculada.)

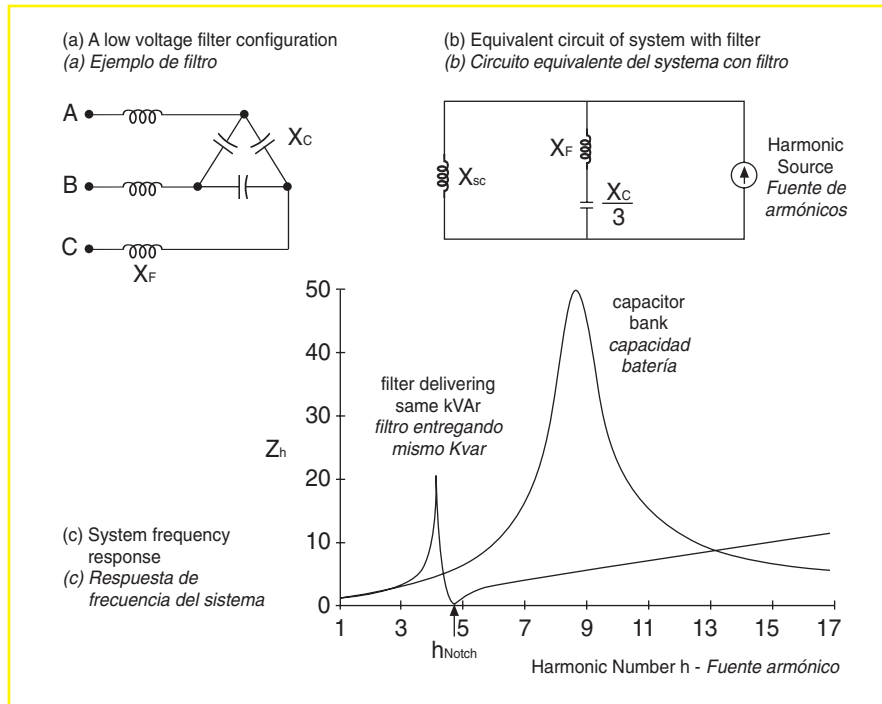


Figure 6: effect of notch filter on system response

Figura 6: efecto de la frecuencia de acuerdo sobre la reacción del sistema

Modular filter

Designing a filter for individual load, without regard for the system that is the applied on, is asking for trouble. Over load is the most common problem, since the filter will attract harmonic currents from all non-linear loads or the system.

Using equipment with modular filters can create problems if capacitors are added to the system.

Other forms of mitigation

AC line chokes are series reactors used to reduce the harmonic injection from some types of adjustable speed drives (ASD). They are placed in series with the ASD. They are most effective when the capacity of the ASD is small relative to the transformer supplying it. They are also effective in reducing nuisance tripping of ASDs due to capacitor switching transients.

Active Filter has been used in low power applications for some time. Units capable of delivering the high levels of harmonic compensation for industrial applications are becoming available.

Filtros modulares

Concebir un filtro para una carga simple sin considerar que esta carga está inmersa en un sistema con presencia de cargas no lineales sería un error.

La sobrecarga es un problema a menudo encontrado después de la instalación de un filtro. En efecto, los filtros absorben todas las corrientes armónicas de todas las cargas no lineales.

Al utilizar aparatos como los filtros modulares, se puede estar preparando para futuros problemas de amplitud de aplicaciones y de cargas funcionando a un régimen variable.

Filtros activos: *por contra, los filtros activos, representan una nueva tipología de equipos para la reducción de los armónicos producidos por las cargas no lineales.*

Estos productos re-inyectan una corriente correspondiente a la componente armónica total, ya que a la suma del puente de conexión del filtro, la red es recorrida por un corriente igual a su componente fundamental.

HOW TO SELECT P.F.C. EQUIPMENT COMAR ACCORDING TO HARMONIC DISTORTION

Use the following chart to choose the right P.F.C. equipment

Sn = Rated power of the transformer (kVA)
 Qn = Rated power of the P.F.C. equipment (kvar)
 Gh = Rated power of the distorting loads (kW)

CRITERIOS DE SELECCION DE UNA BATERIA AUTOMATICA COMAR SEGUN LA DISTORSION ARMONICA PRESENTE EN LA RED

Seleccionar el equipo de compensacion correcto indicado en la siguiente tabla:

Sn = Potencia aparente del transformador (kVA)
 Qn = Potencia del cuadro de compensación (kvar)
 Gh = Potencia de las cargas que producen distorsión (kW)

