

Compensación de la Energía Reactiva

-

IIE-FING-UDELAR

-

Temario

Introducción

- Naturaleza de la Energía Reactiva
- Factor de potencia
- Ventajas de la compensación

Compensación, generalidades

- Generadores de Reactiva
- Ubicación de los Condensadores
- Tipos de compensación

Compensación individual

- Motores asíncronos
- Transformadores

Introducción

Naturaleza de la Energía Reactiva

Factor de potencia

Ventajas de la compensación

Compensación, generalidades

Generadores de Reactiva

Ubicación de los Condensadores

Tipos de compensación

Compensación individual

Motores asíncronos

Transformadores

Potencia instantánea de una instalación

La potencia instantánea entregada a un receptor monofásico es por definición:

$$p(t) = v(t) * i(t)$$

Asumiendo que la tensión y la corriente son puramente sinusoidales,

$$v(t) = \sqrt{2}V * \text{sen}(\omega t)$$

$$i(t) = \sqrt{2}I * \text{sen}(\omega t - \phi)$$

utilizando identidades trigonométricas y después de algunas manipulaciones se obtiene:

$$p(t) = VI \cos(\phi) - VI \cos(2\omega t - \phi) \quad (1)$$

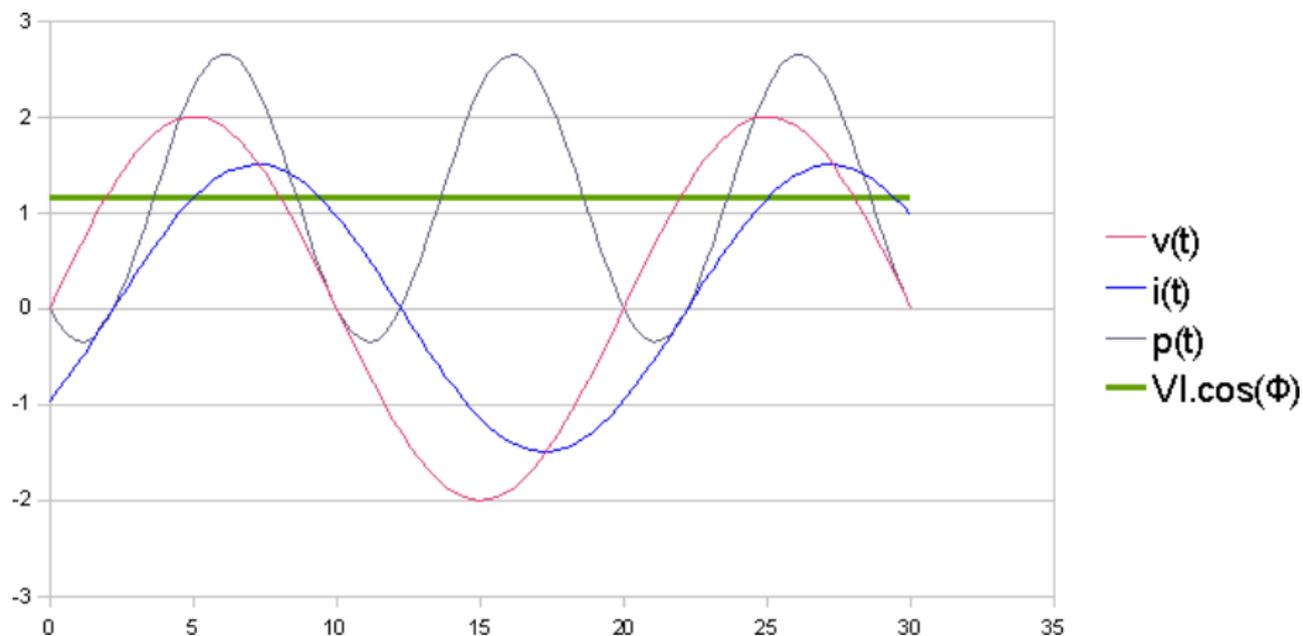
Potencia instantánea de una instalación

La potencia entregada al receptor es por definición el valor medio de la potencia instantánea.

$$\begin{aligned}\langle p(t) \rangle &= \langle v(t) * i(t) \rangle \\ &= \langle VI \cos(\phi) - VI \cos(2\omega t - \phi) \rangle \\ &= VI \cos(\phi)\end{aligned}$$

- ▶ la potencia instantánea oscila, con el doble de frecuencia, en torno al valor de potencia entregada al receptor
- ▶ para valores de ϕ distintos de cero, hay instantes de tiempo en los que la potencia instantánea es negativa, esto indica que la energía retorna a la fuente

Ecuación (1)



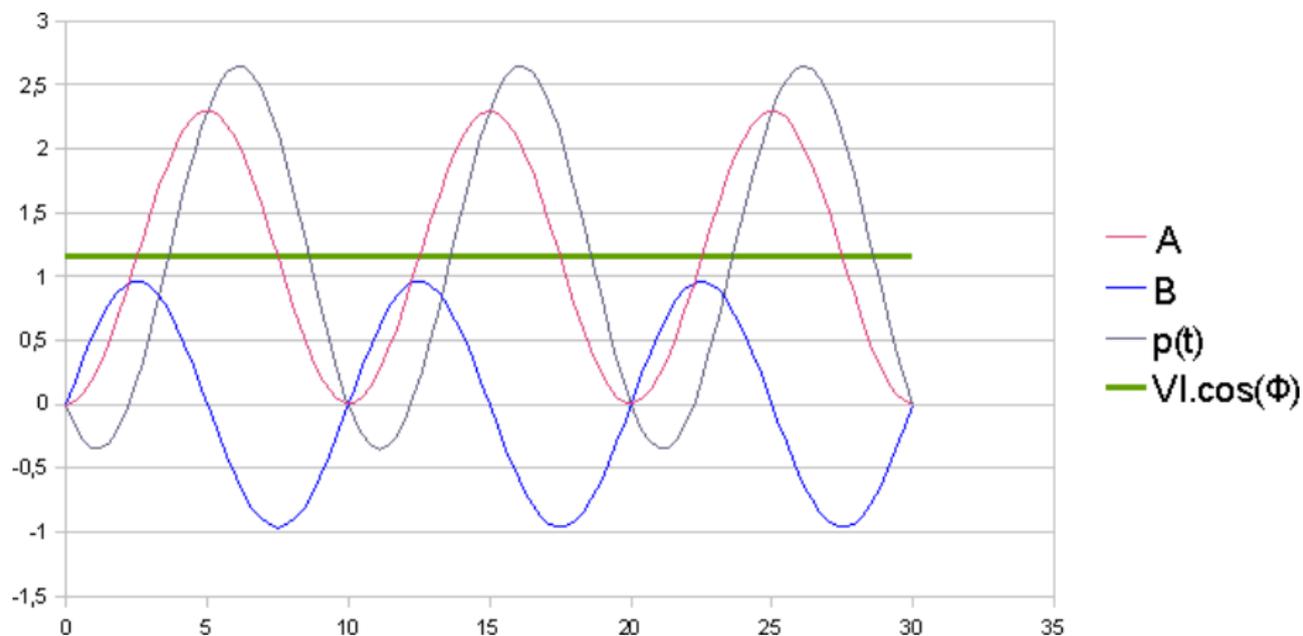
Potencia instantánea de una instalación, otra interpretación

Otra manera de expresar la potencia instantánea, manteniendo las hipótesis de tensión y corriente puramente sinusoidal, es:

$$p(t) = \overbrace{VI \cos(\phi)[1 - \cos(2\omega t)]}^A - \overbrace{VI \sin(\phi) \sin(2\omega t)}^B \quad (2)$$

- ▶ A corresponde a la fracción de la potencia instantánea que siempre entrega energía al receptor (siempre positiva). Su valor medio coincide con la potencia absorbida por el receptor y este valor medio recibe el nombre de Potencia Activa (P)
- ▶ B corresponde a la fracción de la potencia instantánea que intercambia energía entre el receptor y la fuente, y no es deseable desde el punto de vista de las transferencias energéticas. Su valor medio es siempre nulo y su valor máximo recibe el nombre de Potencia Reactiva (Q)

Ecuación (2)



Interpretación física de la energía

- ▶ La potencia activa es la que produce trabajo útil, es convertida en energía mecánica, calor, etc. Se mide en kW.
- ▶ La potencia reactiva no produce trabajo, pero es necesaria para la creación de los campos eléctricos ó magnéticos que los receptores utilizan para su funcionamiento. Se mide en kVAR.
- ▶ La potencia aparente es la potencia que el sistema “parece” estar consumiendo. Se mide en kVA.

Introducción

Naturaleza de la Energía Reactiva

Factor de potencia

Ventajas de la compensación

Compensación, generalidades

Generadores de Reactiva

Ubicación de los Condensadores

Tipos de compensación

Compensación individual

Motores asíncronos

Transformadores

Definición

Por definición, el factor de potencia es igual al cociente entre la potencia activa y la potencia aparente:

$$FP = \frac{P}{S}$$

En las hipótesis de que la tensión y corriente son puramente sinusoidales, el factor de potencia es igual al coseno del desfase entre la tensión y la corriente ($\cos \phi$). En presencia de armónicos esta igualdad **no** es válida.

El FP es inductivo en aquellos casos que la tensión adelanta a la corriente y capacitivo en el caso contrario.

Valores típicos

Receptor	Carga(%)	FP
Motor	0	0,17
	25	0,55
	50	0,73
	75	0,80
	100	0,85
Lámpara incandescente	-	1
Lámpara fluorescente	-	0.5
Lámpara de descarga	-	0.4 a 0.6

Valores típicos

Receptor	Carga(%)	FP
Horno de resistencia	-	1
Horno de inducción	-	0.85
Máquina de soldadura por resistencia	-	0.8 a 0.9
Soldadora de arco monofásica	-	0.5
Soldadora de arco con transformador	-	0.7 a 0.9
Horno de arco		0.8

Triángulo de potencias

En las hipótesis de sistema monofásico, sinusoidal puro:

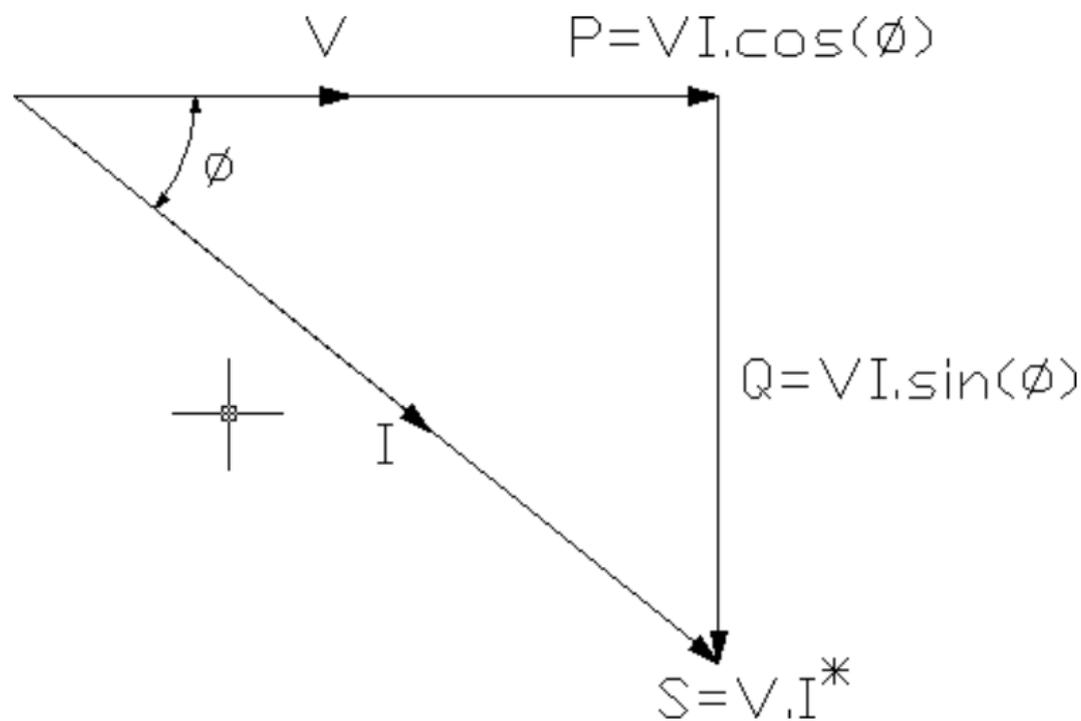
$$P = VI * \cos(\phi)$$

$$Q = VI * \text{sen}(\phi)$$

$$S = VI$$

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

Triángulo de potencias



Triángulo de potencias

En las hipótesis de sistema trifásico, equilibrado, sinusoidal puro:

$$P = 3VI * \cos(\phi)$$

$$Q = 3VI * \text{sen}(\phi)$$

... y utilizando tensiones compuestas:

$$P = \sqrt{3}UI * \cos(\phi)$$

$$Q = \sqrt{3}UI * \text{sen}(\phi)$$

$$S = \sqrt{3}UI$$

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

Introducción

Naturaleza de la Energía Reactiva

Factor de potencia

Ventajas de la compensación

Compensación, generalidades

Generadores de Reactiva

Ubicación de los Condensadores

Tipos de compensación

Compensación individual

Motores asíncronos

Transformadores

Reducción de la tarifa de energía

Las compañías eléctricas penalizan el consumo de energía reactiva para incentivar su corrección.

UTE en el RBT, capítulo 20, establece:

- ▶ Instalará medidores de energía reactiva de todos los suministros con potencia contratada mayor o igual a 10kW.
- ▶ Tiene previsto un valor óptimo de factor de potencia igual a 0.92 inductivo
- ▶ Penaliza, de forma gradual, las instalaciones con factor de potencia menor al óptimo
- ▶ Puede llegar a la supresión del servicio si el factor de potencia es menor a 0.60

Reducción de la tarifa de energía, Pliego tarifario

Existen 2 recargos en función del FP medido

$$K_1(\%) = A \cdot \left(\frac{E_r}{E_a} - 0,426 \right) \quad \text{si} \quad \frac{E_r}{E_a} > 0,426$$

$$K_{1adicional}(\%) = (1 - A) \cdot \left(\frac{E_r}{E_a} - 0,7 \right) \quad \text{si} \quad \frac{E_r}{E_a} > 0,7$$

Los valores de A dependen del tipo de tarifa (residencial simple, residencial doble horario, general simple, etc.) y la tensión del suministro en caso de ser triple horario.

Reducción de la tarifa de energía, Pliego tarifario

Penalización (\$):

- ▶ Para las tarifas simples se aplica sobre el total de la facturación de energía activa
- ▶ Para las multihorario se aplica sobre la facturación de energía activa en el período de punta.

Para las tarifas multihorario se beneficia al consumidor si el factor potencia es mayor a 0,92 mediante el mismo coeficiente K_1 .

Para las tarifas triple horario se aplican adicionalmente otros coeficientes de penalización o beneficio, K_2 y $K_{2adicional}$ (similar formulación), proporcional a la **potencia activa** máxima consumida.

Reducción de la tarifa de energía, Pliego tarifario

Cuando no se registra consumo de energía activa (en ninguno de los períodos horarios para tarifa multihorario), se factura el total de energía reactiva al mayor costo de energía activa de la tarifa correspondiente.

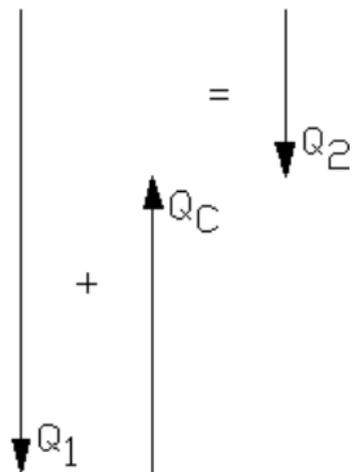
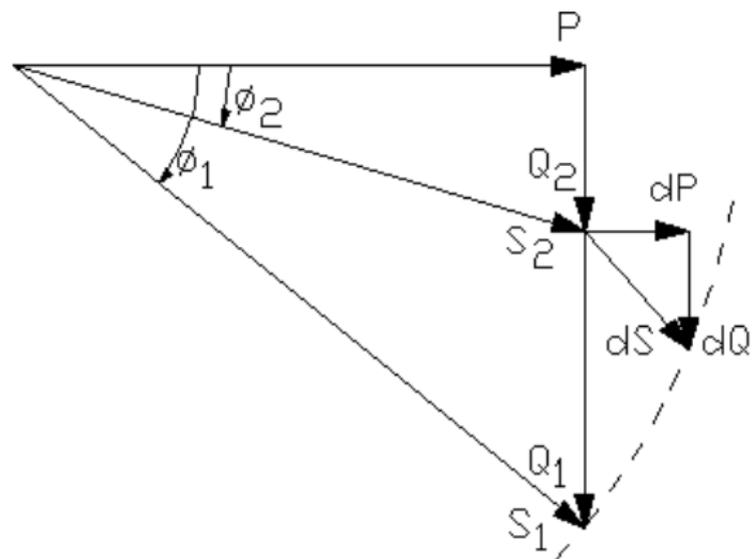
Cuando el cociente entre la energía reactiva y la energía activa sea superior a 1,34 (factor de potencia menor a 0,60), se podrá suspender el servicio previa notificación al cliente, hasta tanto adecue sus instalaciones.

Reducción de la tarifa de energía, Anexos

Recibo UTE, MC 6.3kV

Pliego Tarifario, Febrero 2010

Liberación de capacidad del sistema



Reducción de la sección de los conductores

Permite reducir la sección de los conductores a nivel de proyecto, ya que para una misma potencia activa la intensidad resultante de la instalación compensada es menor.

Reducción de las pérdidas

Permite reducir las pérdidas por efecto Joule, ya que para una misma potencia activa la intensidad resultante de la instalación compensada es menor.

La disminución de las pérdidas se puede estimar como:

$$\frac{Perdidas_{finales}}{Perdidas_{iniciales}} = \left(\frac{\cos \phi_{inicial}}{\cos \phi_{final}} \right)^2$$

Reducción de la caída de tensión

Permite reducir la caída de tensión, ya que para una misma potencia activa la intensidad resultante de la instalación compensada es menor.

Introducción

Naturaleza de la Energía Reactiva

Factor de potencia

Ventajas de la compensación

Compensación, generalidades

Generadores de Reactiva

Ubicación de los Condensadores

Tipos de compensación

Compensación individual

Motores asíncronos

Transformadores

Condensadores

El método consiste en la instalación de condensadores de potencia en paralelo con la carga reactiva a compensar.

Es un método económico y flexible.

Es la técnica de mayor difusión.

Máquina sincrónica

A la manera de “UTE”

El método consiste en la operación “sobre-excitada” de motores sincrónicos.

Se utiliza cuando existen motores sincrónicos de gran potencia que trabajan durante largos períodos.

Cuando el motor opera en vacío se llama “compensador sincrónico”

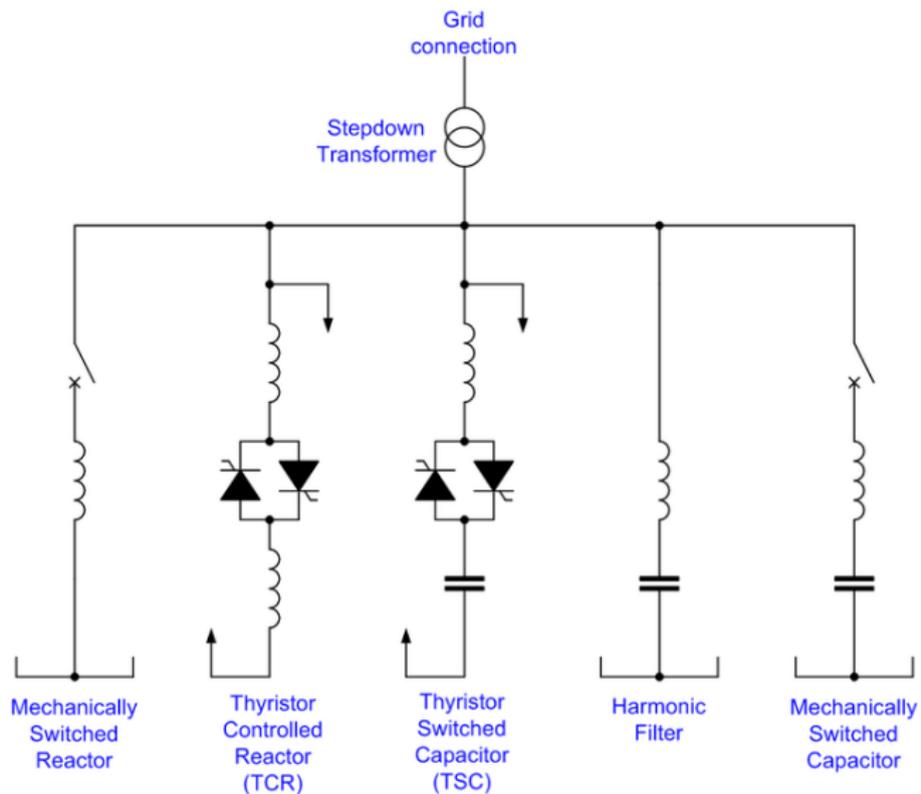
SVC (Static VAR Compensator)

El método se basa en que un puente de tiristores alimentando un inductor es asimilable a una inductancia de valor variable.

Logra un control prácticamente instantáneo de la energía reactiva del sistema.

De aplicación en distribución y/o transmisión

Diagrama SVC



Reglamento Baja Tensión

Según el RBT de UTE, los sistemas de compensación podrán ser de los siguientes tipos:

- ▶ Condensadores fijos
- ▶ Batería de condensadores con regulación automática
- ▶ Motores sincrónicos

Introducción

Naturaleza de la Energía Reactiva

Factor de potencia

Ventajas de la compensación

Compensación, generalidades

Generadores de Reactiva

Ubicación de los Condensadores

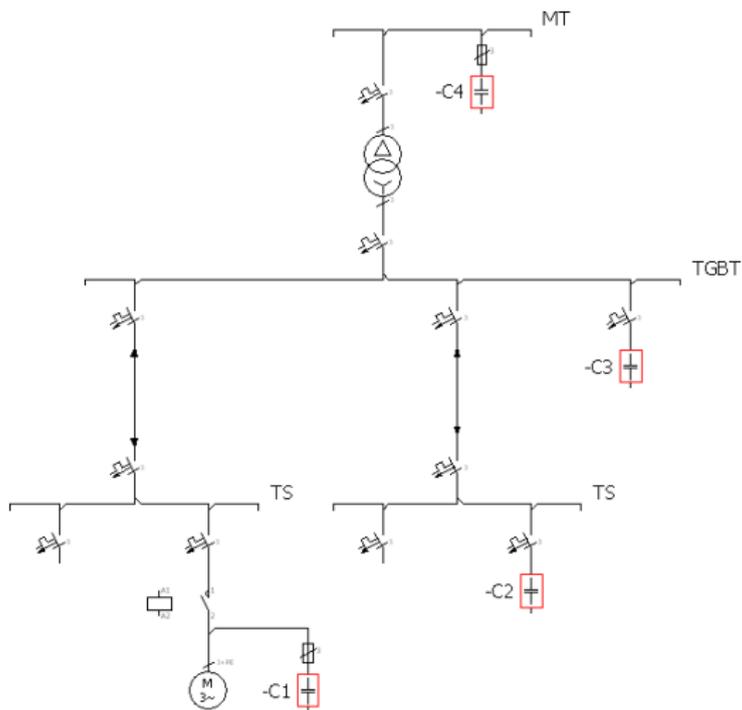
Tipos de compensación

Compensación individual

Motores asíncronos

Transformadores

Condensadores en la instalación



Compensación individual (C1)

Suprime las penalizaciones y optimiza totalmente la instalación. Se obtienen todas las ventajas analizadas.

La corriente reactiva no circula por la instalación, se abastece en el mismo lugar de consumo.

Alto costo de instalación y mantenimiento.

Se utiliza especialmente en cargas que consuman energía reactiva de forma “constante” y de muchas horas de servicio.

Parcial por grupos (C2)

Se optimiza parte de la instalación. Hasta las barras de los tableros secundarios se obtienen todas las ventajas analizadas.

Si las cargas tienen gran variación puede tener que utilizarse compensación automática.

Se utiliza especialmente en tableros que alimentan muchas cargas de pequeña potencia

Global (C3)

No se optimiza la instalación. Solo se suprimen penalizaciones y descarga el transformador.

Casi inevitable el uso de compensación automática.

Instalación simple, de menor mantenimiento.

Global (C4)

No se optimiza la instalación. Solo se suprimen penalizaciones.

Requiere elementos de maniobra y protección en MT.

Solo se usa en instalaciones importantes.

Elección

La elección de la mejor ubicación de los condensadores para cada instalación particular surge de un estudio técnico-económico:

- ▶ Objetivo buscado, supresión de penalidades, descarga de líneas y transformadores, aumento de la tensión al final de la línea
- ▶ Modo de distribución de la energía
- ▶ Régimen de carga
- ▶ La influencia previsible de los condensadores en la red

En general los esquemas óptimos son mixtos.

Introducción

Naturaleza de la Energía Reactiva

Factor de potencia

Ventajas de la compensación

Compensación, generalidades

Generadores de Reactiva

Ubicación de los Condensadores

Tipos de compensación

Compensación individual

Motores asíncronos

Transformadores

Compensación fija

Consta de una o más baterías de condensadores que suministran un valor constante de energía reactiva.

Los condensadores pueden ser comandados o estar directamente conectados a los bornes de la carga a compensar.

Compensación automática

Consta de un banco de varios pasos manejados por un controlador (relé varimétrico).

Cada paso consta de un elemento de protección, uno de comando y una batería de condensadores.

El controlador mide la energía reactiva y conecta las baterías de forma de obtener el mejor factor de potencia de la instalación posible.

Diagrama Regulador Automático, 3F+N

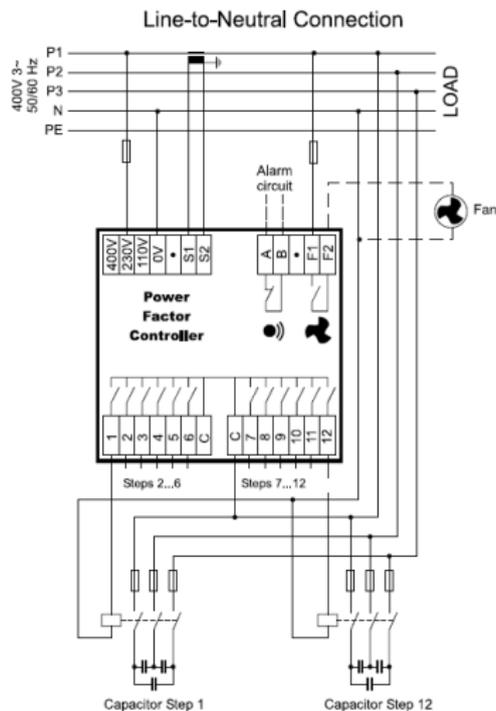
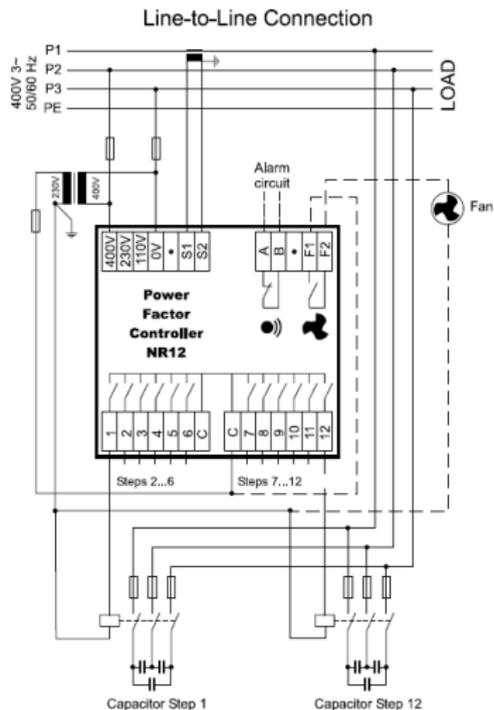


Diagrama Regulador Automático, 3F



Introducción

Naturaleza de la Energía Reactiva

Factor de potencia

Ventajas de la compensación

Compensación, generalidades

Generadores de Reactiva

Ubicación de los Condensadores

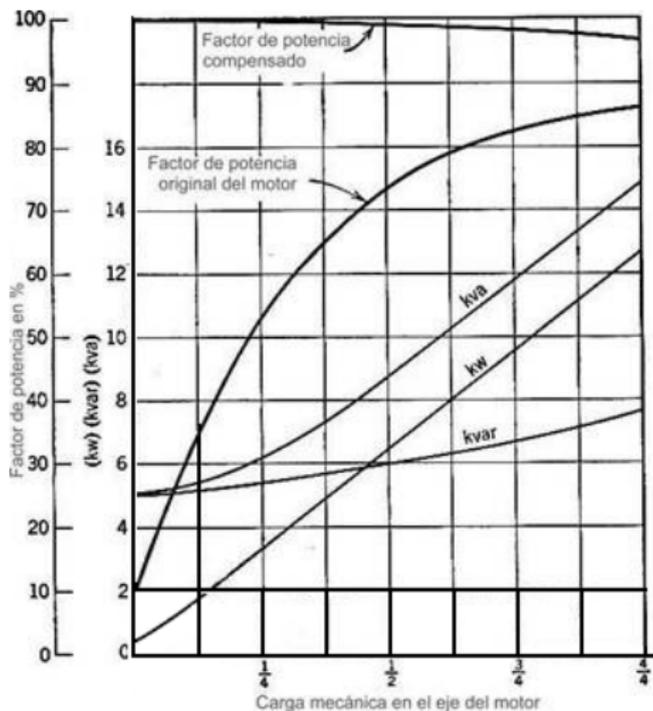
Tipos de compensación

Compensación individual

Motores asíncronos

Transformadores

Curvas consumo motor



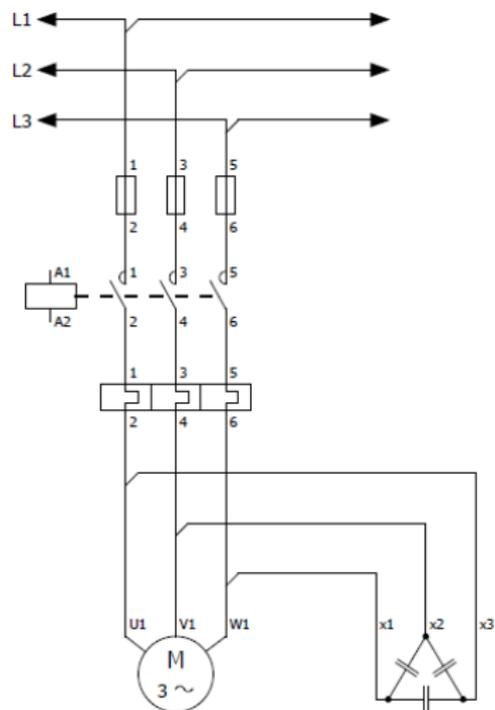
Obsevaciones

La potencia reactiva consumida por el motor es prácticamente constante.

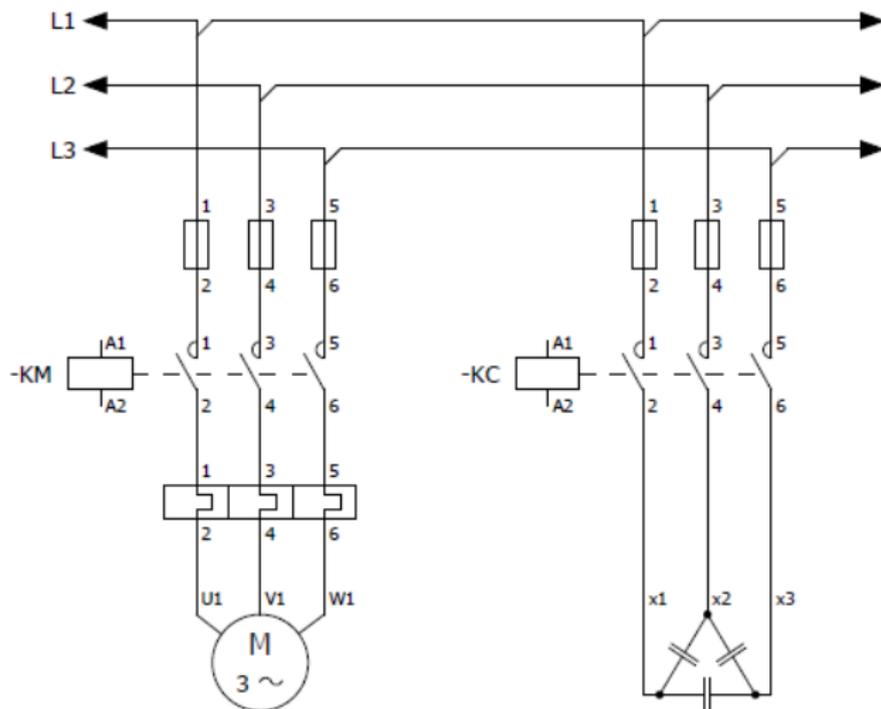
El FP es “bueno” a plena carga, pero como la potencia activa consumida decrece con la carga, el factor de potencia empeora con la disminución de la carga.

Como la potencia reactiva consumida es constante es adecuada una compensación del tipo fija.

Conexión directa



Conexión independiente



Parcial por grupos (C2)

Si la conexión es directa, hay que tener presente que:

- ▶ Es necesario modificar el ajuste del térmico.
- ▶ Evitar la auto-exitación ($Q_c < 0,9\sqrt{3}U_n I_o$)

Si el arranque de motor es con tensión reducida (soft starter, estrella - triángulo, etc.) los condensadores deben conectarse independientes y solo después del arranque y desconectarse antes de la parada.

Introducción

Naturaleza de la Energía Reactiva

Factor de potencia

Ventajas de la compensación

Compensación, generalidades

Generadores de Reactiva

Ubicación de los Condensadores

Tipos de compensación

Compensación individual

Motores asíncronos

Transformadores

Consumo de reactiva de un transformador trifásico

Del modelo del transformador surge que este consumirá energía reactiva por dos vías:

- ▶ reactancia magnetizante, independiente de la carga (1.8 a 2.5 % de la potencia nominal)
- ▶ reactancia serie, proporcional al cuadrado de la corriente carga

O sea:

$$Q_T = 3Q_{X_0} + 3X_{CC}I_C^2 = Q_0 + 3X_{CC}I_C^2$$

Consumo de reactiva de un transformador

Ahora, la corriente de carga se relaciona con la potencia entregada por el transformador, así:

$$I_C = \frac{S}{\sqrt{3}U_n}$$

Por definición se tenemos:

$$X_{CC} = \frac{u_k}{100} \frac{U_n^2}{S_n}$$

Entonces:

$$Q_T = Q_0 + \frac{u_k}{100} \frac{S^2}{S_n}$$

Conexión independiente

Cuando la compañía distribuidora mide la energía en MT el consumo de reactiva del transformador influye en la tarifa, pudiéndose sobre compensar en BT.

Como regla general no se recomienda que la compensación fija sea mayor que el 15% de la potencia nominal del transformador en estos casos.