

Transformación y Uso Eficiente de la Energía

BLOQUE II. ELECTRICIDAD

3. Compensación de energía reactiva



Juan Carcedo Haya

Departamento de Ingeniería
Eléctrica y Energética

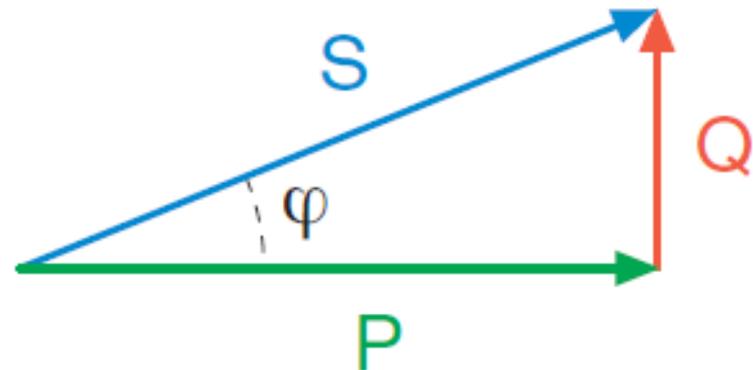
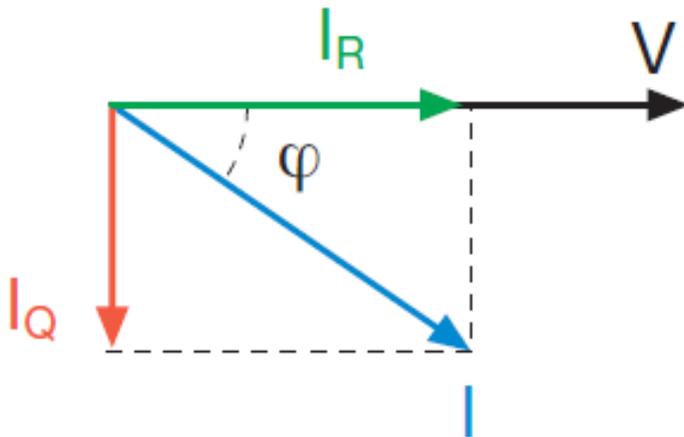
Este material se publica con licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



POTENCIA ACTIVA, REACTIVA Y APARENTE

- Potencia activa => Potencia útil desarrollada. Corriente en fase con la tensión.
- Potencia reactiva => Generación de campo electromagnético. Corriente perpendicular a la tensión.
- Potencia aparente => Suma de las dos anteriores. ¡¡Suma vectorial!!



POTENCIA ACTIVA, REACTIVA Y APARENTE

- Factor de potencia => Relación entre la potencia activa y la potencia aparente.

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

- $\cos \varphi$: Relación entre las componentes fundamentales de la potencia activa y la potencia aparente.

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1}$$

ALGUNOS VALORES ORIENTATIVOS

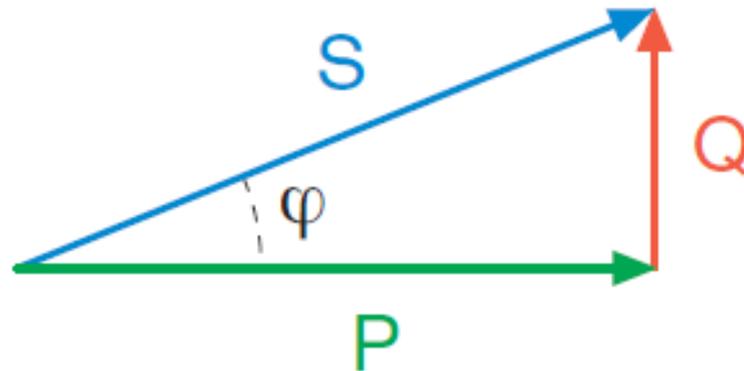
| | <i>Carga</i> | <i>cos φ</i> |
|---|--------------|--------------|
| Motor asíncrono | 0% | 0,17 |
| | 25% | 0,55 |
| | 50% | 0,73 |
| | 75% | 0,80 |
| | 100% | 0,85 |
| Lámparas incandescentes | | 1 |
| Lámparas fluorescentes | | 0,5 |
| Lámparas de descarga | | 0,4 – 0,6 |
| Hornos de resistencia | | 1 |
| Hornos de inducción | | 0,85 |
| Máquinas de soldar por resistencia | | 0,8 – 0,9 |
| Soldadora de arco monofásica | | 0,5 |
| Soldadora de arco en transformador - rectificador | | 0,7 – 0,9 |
| Hornos de arco | | 0,8 |

EFFECTOS DE LA POTENCIA REACTIVA EN LAS REDES ELÉCTRICAS

$$S = V \cdot I$$

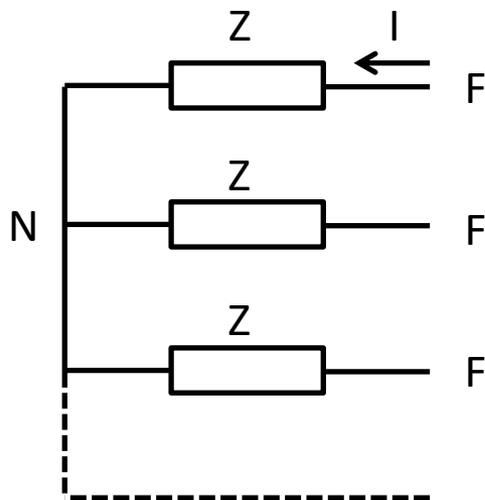
$$P = S \cdot \cos \varphi = V \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$Q = S \cdot \sin \varphi = V \cdot I \cdot \sin \varphi$$



EFFECTOS DE LA POTENCIA REACTIVA EN LAS REDES ELÉCTRICAS

En un sistema trifásico equilibrado:



$$P = 3 \cdot V_F \cdot I \cdot \cos \varphi = 3 \cdot \frac{V_{FF}}{\sqrt{3}} \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$P = \sqrt{3} \cdot V_{FF} \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$S = \sqrt{3} \cdot V_{FF} \cdot I$$

EFFECTOS DE LA POTENCIA REACTIVA EN LAS REDES ELÉCTRICAS

Ejemplo: Consideremos una carga, por ejemplo un motor, con una potencia nominal de 170 kW en suministro trifásico 230/400 V.

- Intensidad de corriente en cada fase:
$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_{FF} \cdot \cos \varphi}$$
- Potencia aparente:
$$S = \sqrt{3} \cdot V_{FF} \cdot I$$
- Pérdidas por efecto Joule en la línea de alimentación:

$$P_{pérd} = 3 \cdot I^2 \cdot R = 3 \cdot \frac{S^2}{3 \cdot V_{FF}^2} \cdot R = \frac{P^2 + Q^2}{V_{FF}^2} \cdot R$$

EFFECTOS DE LA POTENCIA REACTIVA EN LAS REDES ELÉCTRICAS

Ejemplo: Consideremos una carga, por ejemplo un motor, con una potencia nominal de 170 kW en suministro trifásico 230/400 V.

| Cos φ | | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1 |
|---------------|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| I | (A) | 491 | 409 | 351 | 307 | 273 | 245 |
| S | (kVA) | 340 | 283 | 243 | 213 | 189 | 170 |
| Q | (kVAr) | 294 | 227 | 173 | 128 | 82 | 0 |
| P pérd | (kW) | 7 | 5 | 4 | 3 | 2 | 2 |

(Por ejemplo, $R = 10 \Omega$)

EFFECTOS DE LA POTENCIA REACTIVA EN LAS REDES ELÉCTRICAS

Ejemplo: Consideremos una carga, por ejemplo un motor, con una potencia nominal de 170 kW en suministro trifásico 230/400 V.

Consecuencia: Transformadores

| | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1 |
|-----|-------|------|-------|------|-------|-----|
| 63 | 31,5 | 37,8 | 44,1 | 50,4 | 56,7 | 63 |
| 100 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| 125 | 62,5 | 75 | 87,5 | 100 | 112,5 | 125 |
| 160 | 80 | 96 | 112 | 128 | 144 | 160 |
| 200 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 |
| 250 | 125 | 150 | 175 | 200 | 225 | 250 |
| 315 | 157,5 | 189 | 220,5 | 252 | 283,5 | 315 |
| 400 | 200 | 240 | 280 | 320 | 360 | 400 |
| 630 | 315 | 378 | 441 | 504 | 567 | 630 |

EFFECTOS DE LA POTENCIA REACTIVA EN LAS REDES ELÉCTRICAS

Ejemplo: Consideremos una carga, por ejemplo un motor, con una potencia nominal de 170 kW en suministro trifásico 230/400 V.

Consecuencia: Líneas eléctricas

| mm ² | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-----------------|----|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1,5 | 11 | 11,5 | 13 | 13,5 | 15 | 16 | - | 18 | 21 | 24 | - |
| 2,5 | 15 | 16 | 17,5 | 18,5 | 21 | 22 | - | 25 | 29 | 33 | - |
| 4 | 20 | 21 | 23 | 24 | 27 | 30 | - | 34 | 38 | 45 | - |
| 6 | 25 | 27 | 30 | 32 | 36 | 37 | - | 44 | 49 | 57 | - |
| 10 | 34 | 37 | 40 | 44 | 50 | 52 | - | 60 | 68 | 76 | - |
| 16 | 45 | 49 | 54 | 59 | 66 | 70 | - | 80 | 91 | 105 | - |
| 25 | 59 | 64 | 70 | 77 | 84 | 88 | 96 | 106 | 116 | 123 | 166 |
| 35 | | 77 | 86 | 96 | 104 | 110 | 119 | 131 | 144 | 154 | 206 |
| 50 | | 94 | 103 | 117 | 125 | 133 | 145 | 159 | 175 | 188 | 250 |
| 70 | | | | 149 | 160 | 171 | 188 | 202 | 224 | 244 | 321 |
| 95 | | | | 180 | 194 | 207 | 230 | 245 | 271 | 296 | 391 |
| 120 | | | | 208 | 225 | 240 | 267 | 284 | 314 | 348 | 455 |
| 150 | | | | 236 | 260 | 278 | 310 | 338 | 363 | 404 | 525 |
| 185 | | | | 268 | 297 | 317 | 354 | 386 | 415 | 464 | 601 |
| 240 | | | | 315 | 350 | 374 | 419 | 455 | 490 | 552 | 711 |
| 300 | | | | 360 | 404 | 423 | 484 | 524 | 565 | 640 | 821 |

EFFECTOS DE LA POTENCIA REACTIVA EN LAS REDES ELÉCTRICAS

Consecuencia ECONÓMICA para el usuario.

Real Decreto 1164/2001, de 26 de octubre, por el que se establecen tarifas de acceso a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica.

Artículo 9.3 ...siempre que el consumo de energía reactiva exceda el 33 por 100 del consumo de activa durante el período de facturación considerado...

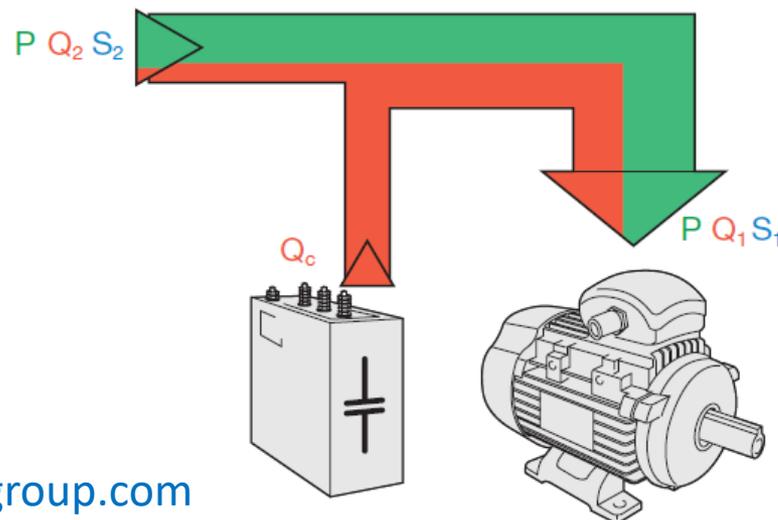
| Cos Φ | Euro/kVArh |
|---|-------------------|
| Cos Φ < 0,95 y hasta cos Φ = 0,90 | 0,000013 |
| Cos Φ < 0,90 y hasta cos Φ = 0,85 | 0,017018 |
| Cos Φ < 0,85 y hasta cos Φ = 0,80 | 0,034037 |
| Cos Φ < 0,80 | 0,051056 |

GENERACIÓN DE POTENCIA REACTIVA

Existen diversos métodos de generación de potencia reactiva, como la utilización de máquinas síncronas (alternadores y motores) o condensadores.

En el caso de las máquinas síncronas, el flujo de potencia reactiva se controla actuando sobre la excitación del rotor. Así, podría suministrarse potencia reactiva mediante un motor síncrono con rotor sobreexcitado.

Un método más económico es la utilización de condensadores conectados en paralelo con las cargas que demandan potencia reactiva.

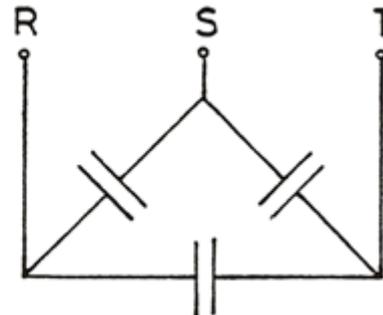
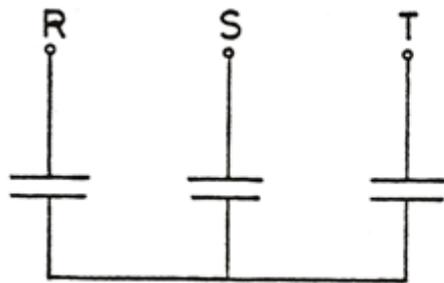


GENERACIÓN DE POTENCIA REACTIVA

Salvo excepciones, la compensación de potencia reactiva «en el lado del usuario» suele llevarse a cabo mediante la utilización de condensadores.

La disposición de los condensadores puede ser de tipo distribuido, centralizado, por grupos... La solución no es única. En cuanto a su forma de entrada en servicio, ésta puede ser automática o no.

En sistemas trifásicos, la conexión de los condensadores puede realizarse en estrella o en triángulo.



GENERACIÓN DE POTENCIA REACTIVA

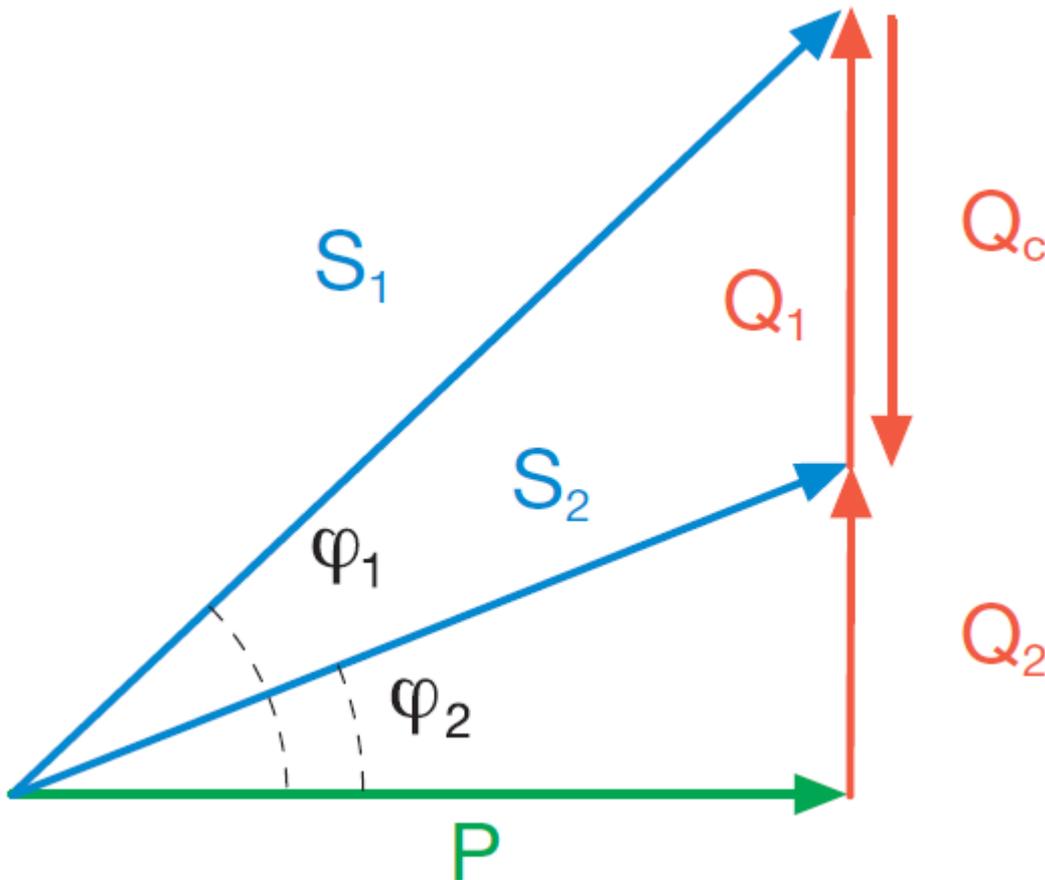
El dimensionado de una batería de condensadores consiste en determinar:

- a) La potencia reactiva a compensar
- b) La capacidad de los condensadores



GENERACIÓN DE POTENCIA REACTIVA

a) La potencia reactiva a compensar



$$\tan \varphi = \frac{Q}{P}$$

$$Q = P \cdot \tan \varphi$$

$$Q_c = P \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

GENERACIÓN DE POTENCIA REACTIVA

b) La capacidad de los condensadores

En un sistema trifásico la conexión puede realizarse en estrella o en triángulo.

En estrella cada condensador soporta la tensión simple (de fase) mientras que en triángulo soporta la tensión compuesta (de línea). En alta tensión este aspecto puede ser decisivo.

En baja tensión el aislamiento no es problemático, por lo que la tensión que soportan los condensadores no es determinante. Entonces, ¿estrella o triángulo?

Lo que está claro es que en ambos casos la potencia reactiva a compensar es la misma.

GENERACIÓN DE POTENCIA REACTIVA

b) La capacidad de los condensadores

Recordemos que por una carga Z sometida a una tensión V circula una corriente I de acuerdo a:

$$I = \frac{V}{Z}$$

La potencia disipada será: $P = I^2 \cdot Z = \left(\frac{V}{Z}\right)^2 \cdot Z = \frac{V^2}{Z}$

En el caso de un condensador (puro):

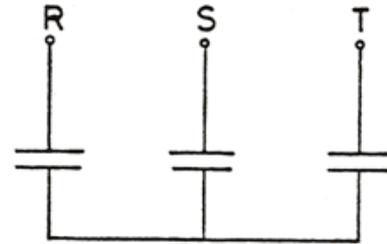
$$Q = I^2 \cdot X_C = \frac{V^2}{X_C}$$

GENERACIÓN DE POTENCIA REACTIVA

b) La capacidad de los condensadores

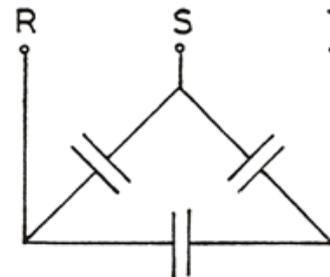
Si se conectan los condensadores en **estrella**, cada uno de ellos estará sometido a la tensión simple (de fase) y su potencia reactiva será:

$$Q_{\lambda} = \frac{V_{FN}^2}{X_{C\lambda}}$$



Si se conectan los condensadores en **triángulo**, cada uno de ellos estará sometido a la tensión compuesta (de línea) y su potencia reactiva será:

$$Q_{\Delta} = \frac{V_{FF}^2}{X_{C\Delta}} = \frac{(\sqrt{3} V_{FN})^2}{X_{C\Delta}}$$



GENERACIÓN DE POTENCIA REACTIVA

b) La capacidad de los condensadores

Puesto que, como se ha dicho, la potencia reactiva a compensar es la misma en cualquiera de los casos:

$$\frac{V_{FN}^2}{X_{C\lambda}} = \frac{(\sqrt{3} V_{FN})^2}{X_{C\Delta}} = \frac{3 \cdot V_{FN}^2}{X_{C\Delta}} \quad \Rightarrow \quad X_{C\Delta} = 3 \cdot X_{C\lambda}$$

La reactancia (impedancia) de un condensador se calcula según:

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

GENERACIÓN DE POTENCIA REACTIVA

b) La capacidad de los condensadores

Por lo tanto:

$$\frac{1}{\omega C_{\Delta}} = 3 \cdot \frac{1}{\omega C_{\lambda}}$$

Es decir: $C_{\lambda} = 3 \cdot C_{\Delta}$

Por ello en baja tensión se prefiere la conexión de los condensadores en triángulo, ya que así éstos pueden ser de menor capacidad.

$$Q_{C,i} = \frac{Q_C}{3} = \frac{V_{FF}^2}{X_{C\Delta}} = \omega \cdot C \cdot V_{FF}^2 \quad \Rightarrow \quad C_{\Delta} = \frac{Q_C}{6 \cdot \pi \cdot f \cdot V_{FF}^2}$$

EFFECTO DE LOS ARMÓNICOS EN LAS BATERÍAS DE CONDENSADORES

La reactancia de los condensadores es inversamente proporcional a la frecuencia, con lo que pueden crear caminos de baja impedancia para las altas frecuencias.

La consecuencia es que instalaciones con cargas lineales pueden verse afectadas por armónicos procedentes de la red de alimentación.

Esto **NO** significa que los condensadores generen armónicos.