

Teoría de la Potencia Instantánea

Referencia. “Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning” by Akagi, Watanabe and Aredes



Diapositivas Parcialmente Realizadas por el Profesor Mauricio Espinoza, Universidad de Costa Rica.

ex alumno de doctorado U de Chile



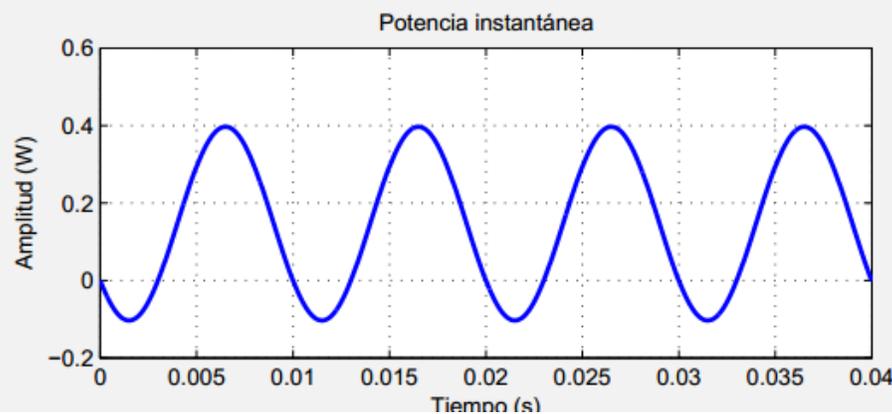
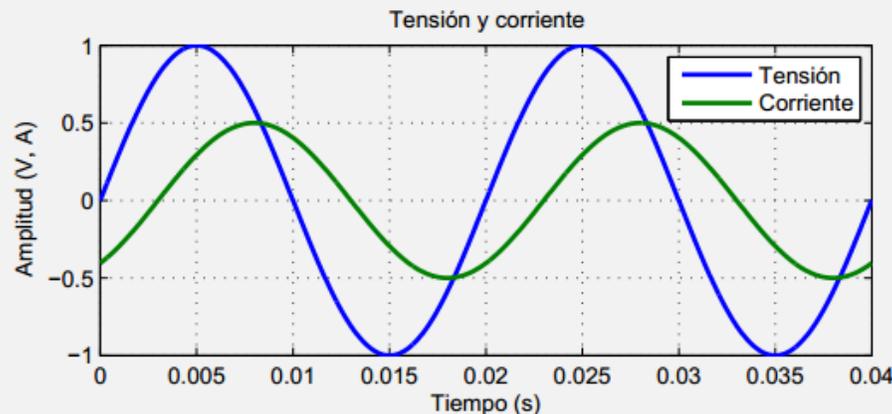
Teoría de la Potencia Instantánea

- Las teorías clásicas de potencia eléctrica , desarrollada desde los años 1920s, se orientaban a calcular la potencias medias y utilizando en general valores efectivos de corriente y tensión.
- Al utilizar potencias medias no se representa adecuadamente lo que sucede durante transientes.
- La teoría de la potencia instantánea asume que las corrientes y voltajes pueden tener cualquier forma, como ocurre en sistemas con distorsión armónica, y es válida tanto en estado estacionario como en transientes.



Cálculo Clásico de Potencia

- Asumiendo dos señales sinusoidales puras se tiene:



Doble frecuencia +
Valor medio

$$\begin{aligned} v(t) &= \sqrt{2}V \sin(\omega t) \\ i(t) &= \sqrt{2}I \sin(\omega t + \phi) \\ &\downarrow \\ p(t) &= v(t)i(t) \\ &= 2VI \sin(\omega t) \sin(\omega t + \phi) \end{aligned}$$



Cálculo Clásico de Potencia

el cálculo de potencia entrega lo siguiente:

$$\begin{aligned} p(t) &= v(t)i(t) \\ &= 2VI \sin(\omega t) \sin(\omega t + \phi) \\ &= VI \cos(\phi) - VI \cos(2\omega t - \phi) \\ &= \underbrace{VI \cos(\phi) [1 - \cos(2\omega t)]}_{\text{Mayor o igual cero}} - \underbrace{VI \sin(\phi) \sin(2\omega t)}_{\text{Media cero}} \end{aligned}$$

Valor instantáneo de la potencia



$$= P [1 - \cos(2\omega t)] - Q \sin(2\omega t)$$

Valor medio de la potencia activa



$$P = VI \cos(\phi) \rightarrow \text{Potencia Activa}$$

$$Q = VI \sin(\phi) \rightarrow \text{Potencia Reactiva}$$

$$S \equiv \sqrt{P^2 + Q^2} \rightarrow \text{Potencia Aparente}$$

potencia reactiva

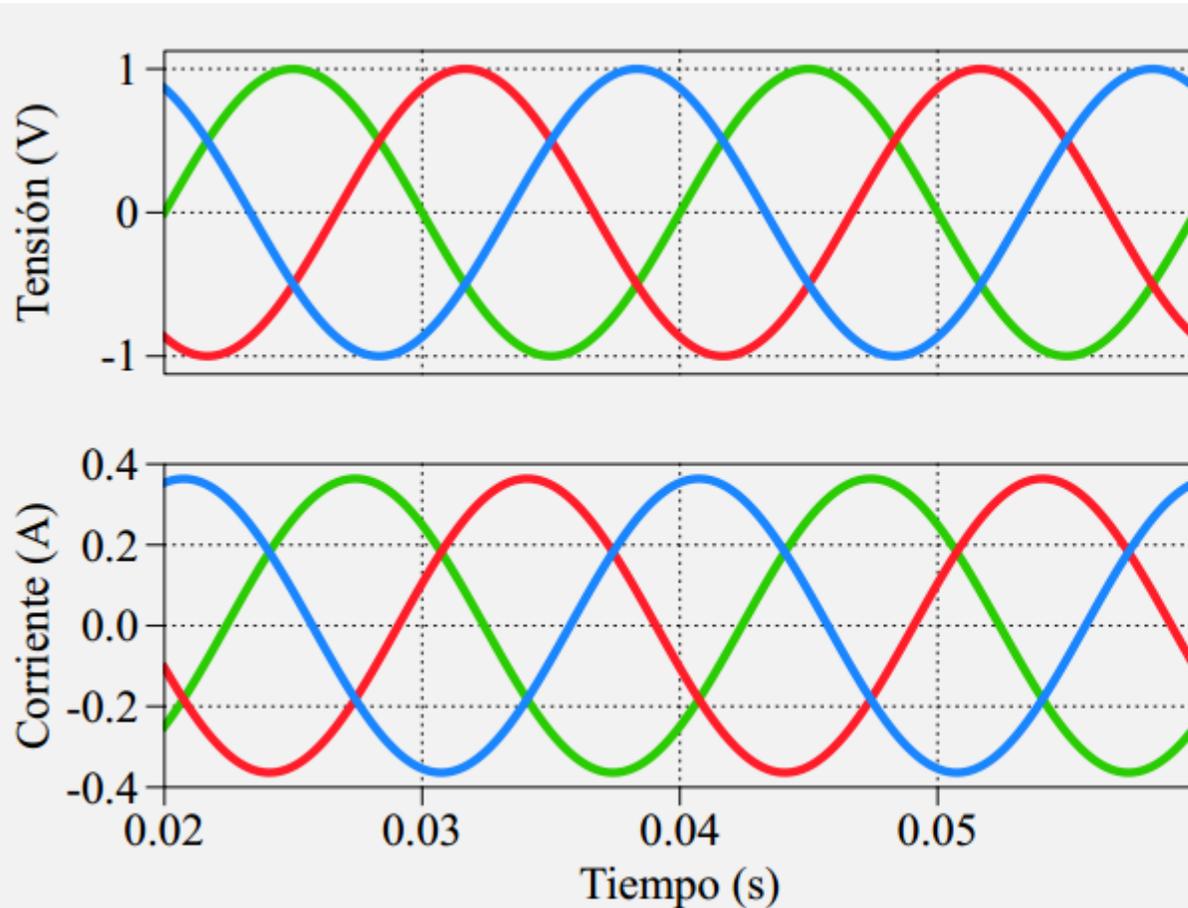




Calculo Clásico de Potencia

- La teoría clásica de potencia entrega el valor medio de potencia.
- El valor medio de potencia tiene el mismo valor tanto en la teoría clásica como en la teoría de potencia instantánea.
- La potencia reactiva es una definición que depende de la teoría de potencia utilizada. Por ejemplo, no existe potencia reactiva asociada a circuitos monofásicos en la teoría de la potencia instantánea. Solo activa.
- La potencia instantánea es la que se conserva al pasar de un sistema a otro. No la reactiva.

Teoría clásica de Potencia en Sistemas Trifásicos



$$v_a(t) = \sqrt{2}V \sin(\omega t)$$

$$v_b(t) = \sqrt{2}V \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$v_c(t) = \sqrt{2}V \sin(\omega t + 120^\circ)$$

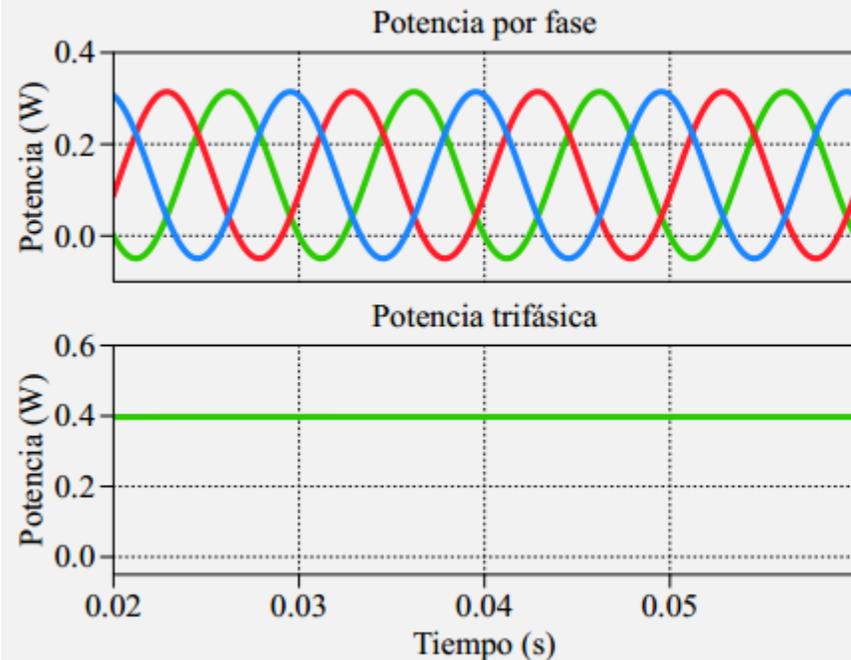
$$i_a(t) = \sqrt{2}I \sin(\omega t + \phi)$$

$$i_b(t) = \sqrt{2}I \sin(\omega t + \phi - 120^\circ)$$

$$i_c(t) = \sqrt{2}I \sin(\omega t + \phi + 120^\circ)$$

Sistema Balanceado

Teoría clásica de Potencia en Sistemas Trifásicos



$$p_a(t) = v_a(t)i_a(t)$$

$$= VI [\cos(\phi) - \cos(2\omega t + \phi)]$$

$$p_b(t) = v_b(t)i_b(t)$$

$$= VI [\cos(\phi) - \cos(2\omega t + \phi - 120^\circ)]$$

$$p_c(t) = v_c(t)i_c(t)$$

$$= VI [\cos(\phi) - \cos(2\omega t + \phi + 120^\circ)]$$

$$p_{3\phi}(t) = p_a(t) + p_b(t) + p_c(t)$$

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

$$S_{3\phi} = 3S = 3VI \Rightarrow$$

$$Q_{3\phi} = 3Q = 3VI \sin(\phi)$$

Se anulan entre ellos



Potencia en un Sistema Trifásico

- En sistema trifásico balanceado la potencia instantánea es plana. Es decir en estado estacionario la potencia media es igual a la instantánea.
- Es decir, si se alimenta un motor con señales trifásicas balanceadas, se obtendrá un torque sin oscilaciones.
- Si se alimenta un motor con señales desbalanceadas probablemente se generara un torque medio y un torque oscilatorio.

Teoría de la Potencia Instantánea.



Teoría de la Potencia Instantánea

- La potencia instantánea se puede expresar como:

$$S = P + jQ = k \underline{v} \underline{i}^c$$

- Donde el superíndice c representa el operador complejo conjugado, \underline{v} es el vector de voltaje e \underline{i} es el vector de corriente. El valor de $k=1$ si es que se utiliza la siguiente transformada conservativa en potencia:

Transformada α - β

$$\begin{bmatrix} f_{\alpha}(t) \\ f_{\beta}(t) \\ f_0(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a(t) \\ f_b(t) \\ f_c(t) \end{bmatrix}$$

Transformada inversa

$$\begin{bmatrix} f_a(t) \\ f_b(t) \\ f_c(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{\alpha}(t) \\ f_{\beta}(t) \\ f_0(t) \end{bmatrix}$$



Cálculo de la potencia Instantánea

$$S = P + jQ = k \underline{v} \underline{i}^c = k(v_\alpha + jv_\beta)(i_\alpha - ji_\beta)$$

$$P = k(v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) \text{ Potencia Activa Instantánea}$$

$$Q = k(v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta) \text{ Potencia Reactiva Instantánea.}$$

Nótese que el producto punto entre el vector de voltaje y el vector de corriente es la potencia activa.



Cálculo de la potencia monofásica

- En la teoría de la potencia instantánea, solo se produce potencia activa con señales monofásicas. Es decir:

$$P = v_m \cos(\omega t) \times i_m \cos(\omega t + \theta)$$

Esto puede ser fácilmente demostrado utilizando “pseudo-vectores”. Es decir para el caso monofásico se tiene:

$$P + jQ = v_m \frac{1}{2} [e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}] \times i_m \frac{1}{2} [e^{j(\omega t + \theta)} + e^{-j(\omega t + \theta)}]^c$$



Nuevamente es posible trabajar utilizando variable compleja o matrices.

(Se asume $k=1$)

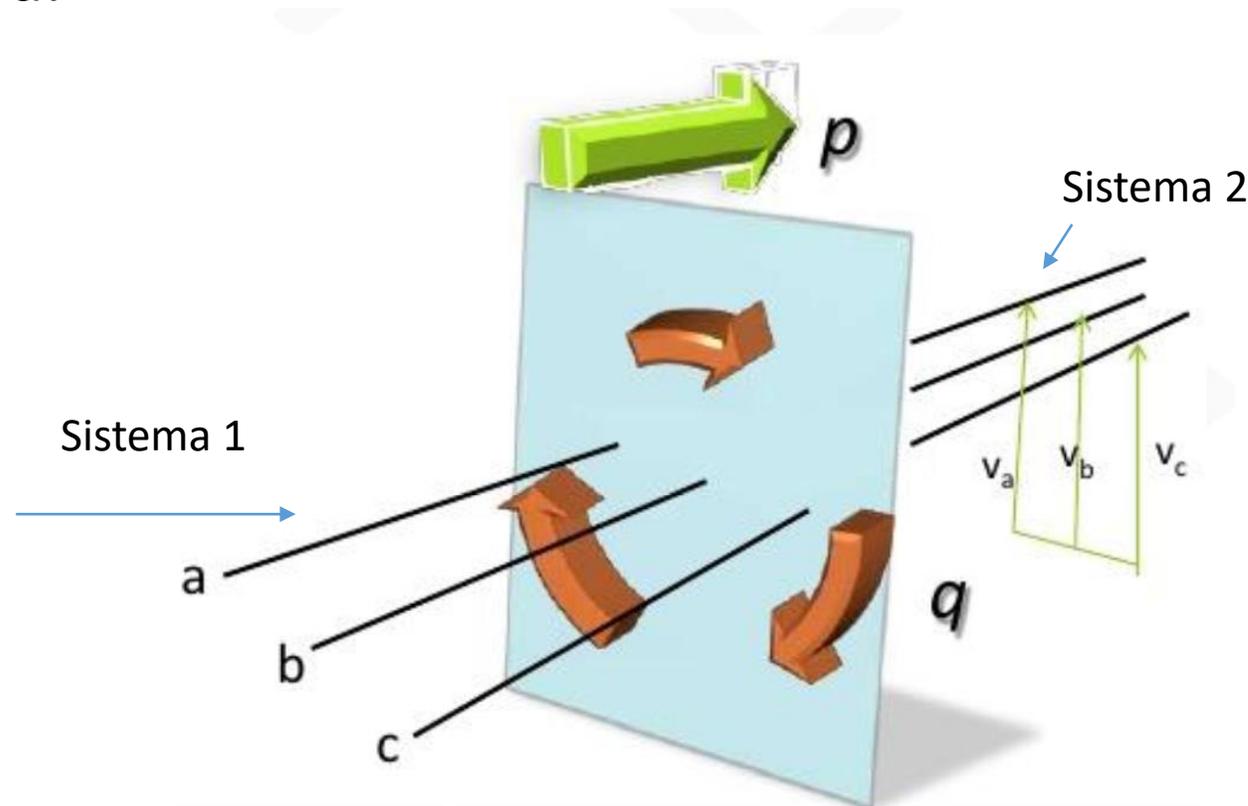
$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$

P y P_0 son potencias activa y q es reactiva. ¿Cual es la diferencia entre p y q ?



Teoría de la Potencia Instantánea

- Solo la potencia activa instantánea se conserva de un sistema a otro.
- La potencia reactiva instantánea circula entre las fases no se conserva.

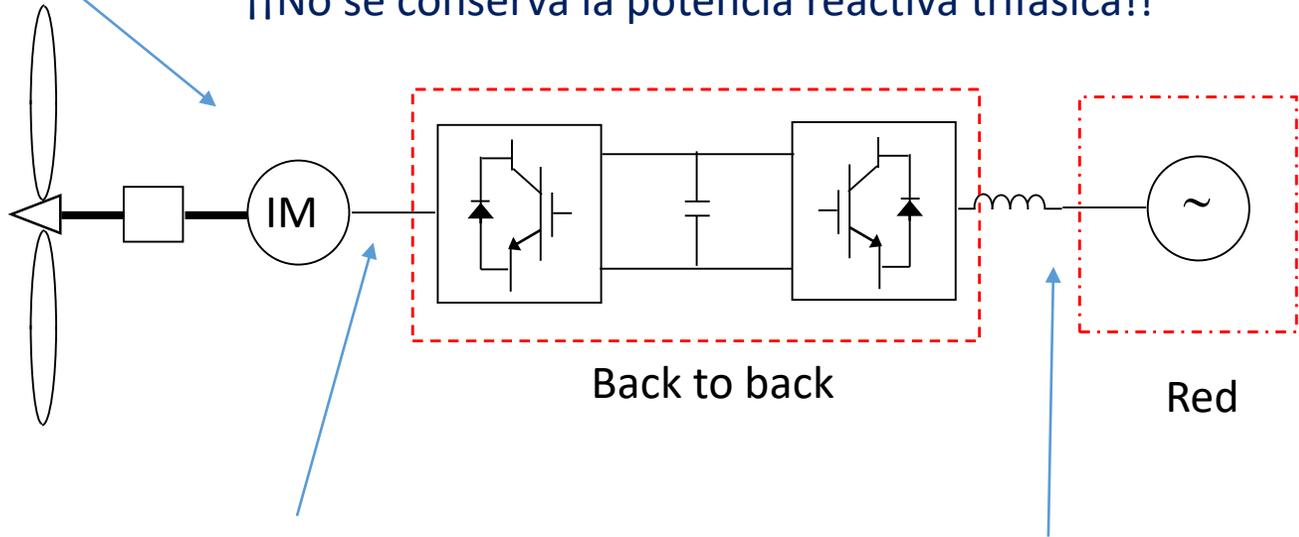




Por ejemplo

La potencia reactiva en la máquina de inducción está recirculando entre las fases

¡¡No se conserva la potencia reactiva trifásica!!



Máquina de inducción operando con $FP=0.85$

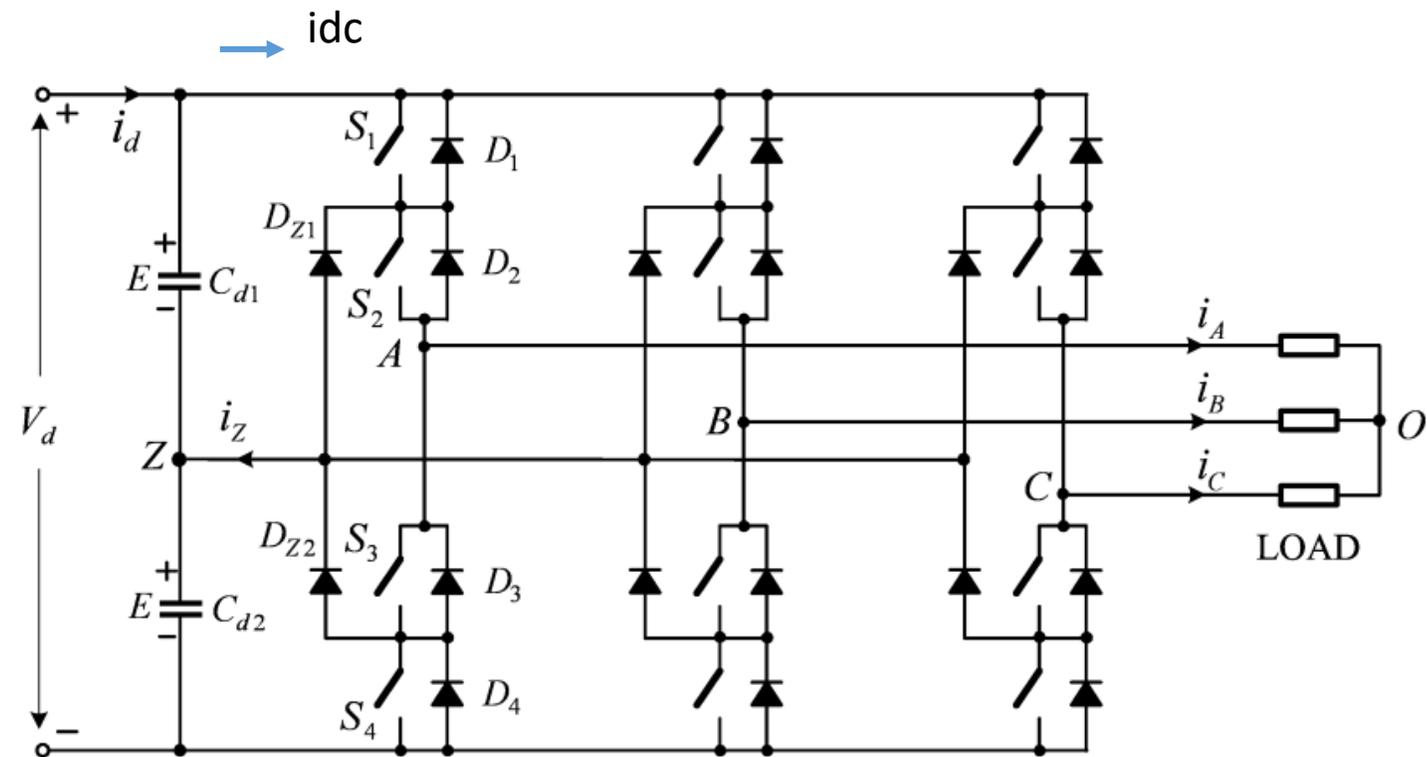
Red operando con $FP=1$

Ejemplo

- Si la carga es balanceada la corriente que entrega el dc-link no tiene armónicos de baja frecuencia. Además la potencia reactiva no afecta el voltaje o la corriente del dc-link.

Válido para inversores trifásicos alimentando sistemas balanceados.

No se cumple en sistemas monofásicos o de cuatro hilos (el cuarto hilo es el neutro). En estos se encuentran armónicos de doble frecuencia en el dc-link.



Se utiliza un NPC como ejemplo pero lo expresado es valido para cualquier topología trifásica de inversor

¿Que sucede si un sistema es desbalanceado?

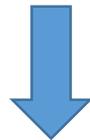
- Al existir un sistema desbalanceado se produce una componente de secuencia negativa en la corriente y o tensión. Por ejemplo:

$$S = P + jQ = v_m e^{j\omega t} (i_m e^{j(\omega t + \theta)} + i_2 e^{-j(\omega t + \varphi)})^c$$

(Se asume k=1)

↑
Corriente de
secuencia positiva

↑
Corriente de
secuencia negativa



$$S = P + jQ = v_m i_m e^{j\theta} + v_m i_2 e^{j(2\omega t + \varphi)}$$





¿Qué sucede si un sistema es desbalanceado?

$$S = P + jQ = v_m i_m e^{j\theta} + v_m i_2 e^{j(2\omega t + \varphi)}$$

Potencia activa y reactiva “plana”
propia de sistemas balanceados
trifásicos

Potencia activa y reactiva de doble
frecuencia

¿Cuál es la potencia que llega al dc-link del conversor? = $v_m i_m \cos(\theta) + v_m i_2 \cos(2\omega t + \varphi)$

¿Cuál es la potencia que queda circulando entre fases ? = $v_m i_2 \sin(2\omega t + \varphi) + v_m i_m \sin(\theta)$



¿Qué sucede en presencia de distorsión armónica?

- Por ejemplo un 5to armónico (que es de sec. negativa) en el voltaje

$$S = P + jQ = (v_m e^{j\omega t} + v_5 e^{-j5\omega t}) (i_m e^{j(\omega t + \theta)})^c$$

Sec. positiva

5to armónico (sec negativa)

Sec. positiva

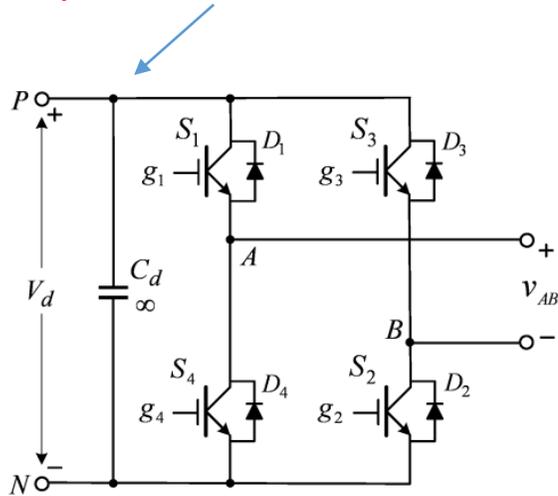
$$S = P + jQ = v_m i_m e^{j\theta} + v_5 i_m e^{-j(6\omega t + \varphi)}$$

Existe un 6to armónico en la potencia activa que alcanza el dc-link. Un sexto armónico de potencia también se produce en la presencia de un 7mo armónico en la tensión

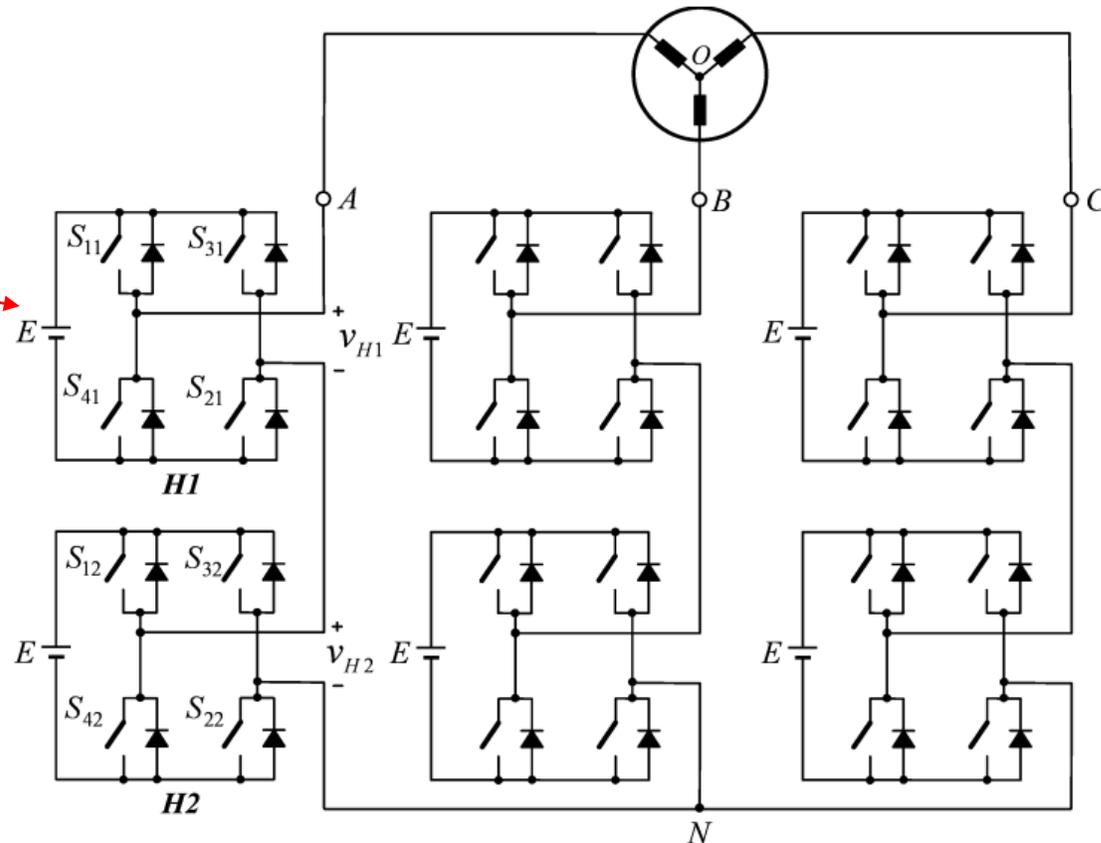


¿Que sucede en un sistema multinivel basado en CHB?

Componente de doble frecuencia



Potencia plana (asumiendo sistema balanceado)



Cada celda puede tener señales con componentes de doble frecuencia, y mas altas aún, en el dc-link.

Esto significa que existe una corriente armónica de doble frecuencia circulando a través de los condensadores. Los condensadores deben tolerar esta componente.

Aplicación Típica Filtro Activo

Cálculo del Vector de Corriente para Obtener una Determinada Potencia

- Suponiendo que se conoce la potencia que deseamos a la salida.
¿Cuál debería ser la corriente a regular por el conversor de potencia?

$$P + jQ = k(v_\alpha + jv_\beta)(i_\alpha - ji_\beta)$$

$$k(i_\alpha - ji_\beta) = \frac{P + jQ}{v_\alpha + jv_\beta} = \frac{P + jQ}{v_\alpha + jv_\beta} \frac{(v_\alpha - jv_\beta)}{(v_\alpha - jv_\beta)}$$

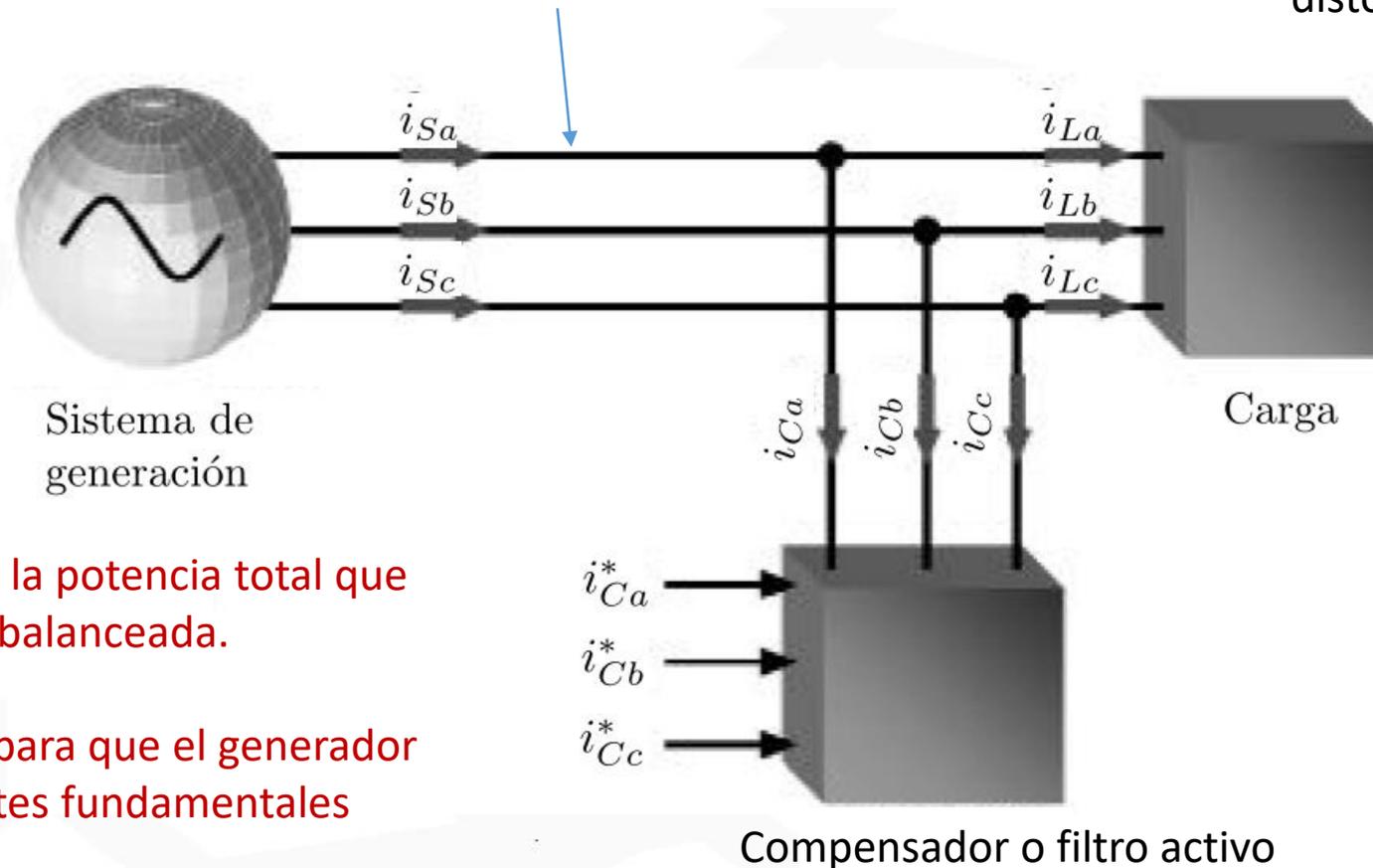
$$i_\alpha = \frac{Pv_\alpha + Qv_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \quad i_\beta = \frac{Qv_\alpha + Pv_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2}$$



Aplicación Típica Filtro Activo

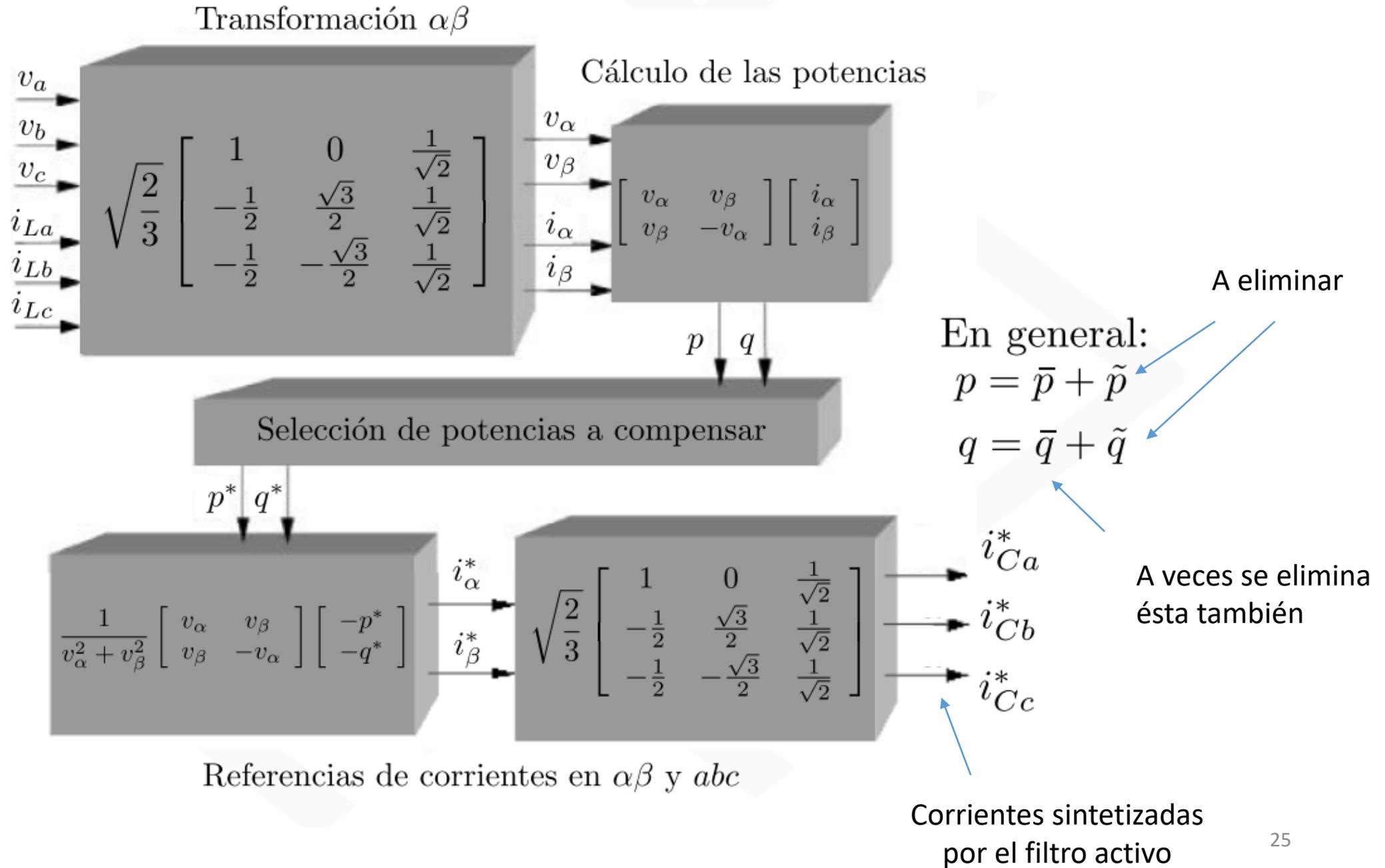
Se desea un sistema balanceado en este punto

Carga desbalanceada y con distorsión armónica



¿Cómo Funciona?. Se calcula la potencia total que utiliza la carga no-lineal desbalanceada.

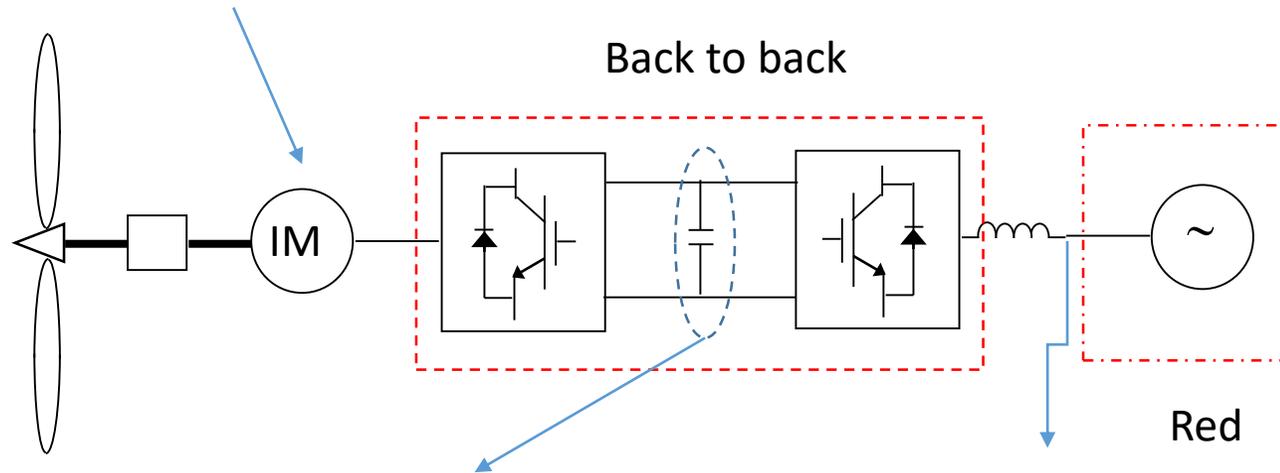
Se controla al compensador para que el generador entregue solo los componentes fundamentales (potencia plana)



Regulación de corrientes en caso de fallas asimétricas

Por ejemplo

Se puede utilizar con paneles solares



Se quiere evitar una alta corriente de ripple en el condensador.

Falla bifásica

Cuando se produce una falla asimétrica, la tensión a la salida del conversor front-end tiene componentes de secuencia positiva y de secuencia negativa. Es decir $\underline{v}_g = v_1 e^{j(\omega t + \theta)} + v_2 e^{-j(\omega t + \gamma)}$.

Si se regula un corriente balanceada $\underline{i}_g = i_m e^{j\omega t}$ se produce una alta componente de doble frecuencia en la potencia activa y eso a su vez puede producir problemas en el condensador.

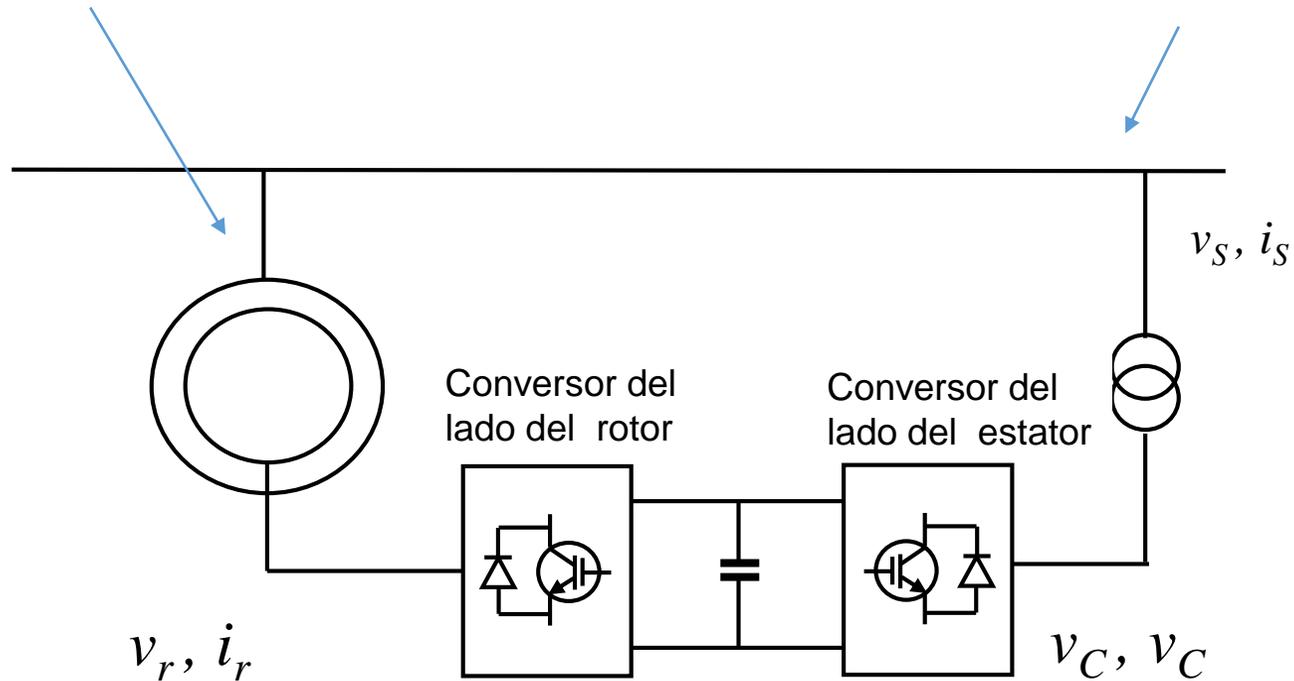
Es posible, utilizando la teoría de la potencia instantánea, $\underline{i}_g = i_1 e^{j(\omega t + \theta)} + i_2 e^{-j(\omega t + \varphi)}$ calcular las corriente de secuencia positiva y negativa para que la potencia activa sea plana.

Se utiliza también cuando existen baterías en el dc link. Las corrientes de ripple pueden acortar la vida útil.

Control de la Máquina DFIG

Flujo desbalanceado

Red desbalanceada



Se puede controlar la corriente del rotor para evitar las oscilaciones de torque. Eso significa desbalancear i_r