

Inversores para Centrales Fotovoltaicas

Energía Solar Fotovoltaica

Oscar Perpiñán Lamigueiro

Universidad Politécnica de Madrid

① Conceptos Generales

② Características básicas

③ Composición

④ Funcionamiento

⑤ Islanding

Acoplamiento a la red

La potencia suministrada por un generador fotovoltaico iluminado es de tensión continua, que debe ser adecuadamente acondicionada para permitir el funcionamiento correcto de las cargas conectadas en un sistema autónomo o el acoplamiento a la red eléctrica en el caso de sistemas de conexión a red.

Definición

- ▶ El equipo de acondicionamiento de potencia, denominado inversor DC/AC, realiza la **conversión de continua a alterna cumpliendo con determinados requisitos** de tensión eficaz, frecuencia, distorsión armónica de las ondas de tensión y corriente, rendimiento instantáneo y medio, seguridad eléctrica, etc.
- ▶ Funciona como fuente de corriente autoconmutada y sincronizada con la red.

Tipos de Inversores

A grandes rasgos, los inversores pueden agruparse en tres categorías:

- ▶ **Inversor central**: un único inversor dedicado a todo el generador (o a un conjunto de ramas)
- ▶ **Inversor orientado a rama** (*string-inverter*): un inversor dedicado a una rama del generador.
- ▶ **Módulo-AC**: un inversor dedicado a un módulo del generador.

Inversores Centrales

- ▶ Los **inversores centrales** son recomendables para instalaciones de medio o gran tamaño. Permiten reducir costes (de adquisición, instalación y mantenimiento) y aumentar fiabilidad y eficiencia.
- ▶ **La potencia del inversor debe estar en consonancia con la potencia del generador** (una planta de 1 MWp debiera contar con 10 inversores de 100 kW o 4 de 250 kW, pero no con 200 de 5 kW).

① Conceptos Generales

② Características básicas

③ Composición

④ Funcionamiento

⑤ Islanding

Potencia y ventana MPP

- ▶ **Potencia nominal y máxima**, siendo ésta un porcentaje de sobrecarga que el equipo es capaz de soportar durante un determinado período de tiempo (indicado por el fabricante).
- ▶ **Ventana de búsqueda del Punto de Máxima Potencia** (MPP en siglas inglesas): es el rango de tensiones en las que el inversor aplica un algoritmo de búsqueda del MPP del generador fotovoltaico.

Tensiones

- ▶ **Tensión máxima de entrada:** es la máxima tensión que el inversor puede aguantar sin sufrir una avería.
- ▶ **Tensión nominal de salida:** es la tensión de red a la que se puede conectar el inversor (habitualmente 230 Vac para equipos monofásicos y 400 Vac para equipos trifásicos).
- ▶ **Umbral de arranque:** según las unidades en las que se expresa, puede indicar la radiación solar incidente en el generador (W m^{-2}) o la potencia de entrada (W) necesaria para que el inversor comience el proceso de conversión.

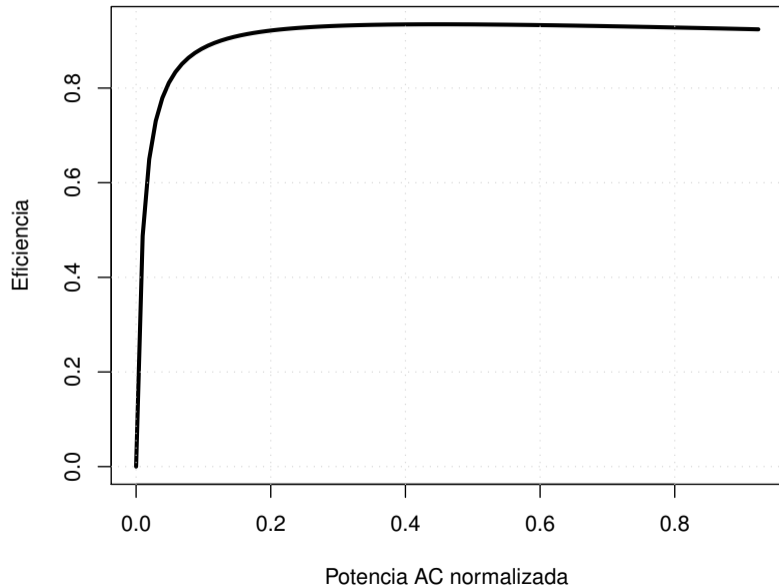
Eficiencia

- ▶ **Eficiencia del inversor**, $\eta_{inv} = P_{ac}/P_{dc}$
- ▶ Esta relación puede describirse con una función basada en tres coeficientes y la normalización de la potencia de salida, $p_o = P_{ac}/P_{inv}$:

$$\eta_{inv} = \frac{p_o}{p_o + k_0^o + k_1^o p_o + k_2^o p_o^2}$$

- ▶ **Eficiencia máxima**: máximo valor que toma la relación entre potencia de salida y potencia de entrada. En inversores de calidad la eficiencia es estable en un amplio rango de funcionamiento del equipo y de un valor cercano a la eficiencia máxima.

Ejemplo de curva de eficiencia



$$k_0^o = 0.01$$
$$k_1^o = 0.025$$
$$k_2^o = 0.05$$

Rendimiento

- ▶ **Rendimiento:** es la relación entre la energía entregada por un inversor que recibe una energía producida por un generador fotovoltaico funcionando en unas determinadas condiciones de radiación.
- ▶ **Rendimiento europeo:** condiciones de radiación características del clima de la zona centroeuropea.

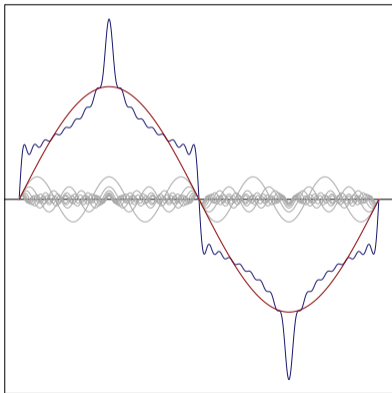
$$\eta_{euro} = 0.03 \cdot \eta_{5\%} + 0.06 \cdot \eta_{10\%} + 0.13 \cdot \eta_{20\%} + 0.1 \cdot \eta_{30\%} + 0.48 \cdot \eta_{50\%} + 0.2 \cdot \eta_{100\%}$$

- ▶ **Rendimiento CEC:** condiciones de radiación características del clima de California.

$$\eta_{CEC} = 0.04 \cdot \eta_{10\%} + 0.05 \cdot \eta_{20\%} + 0.12 \cdot \eta_{30\%} + 0.21 \cdot \eta_{50\%} + 0.53 \cdot \eta_{75\%} + 0.05 \cdot \eta_{100\%}$$

Distorsión armónica

Cuando una señal sinusoidal atraviesa un circuito no lineal (diodos, transistores) aparecen señales (armónicos) de frecuencias múltiplo de la original (fundamental).



Distorsión armónica

La distorsión armónica total (THD) es la relación entre la potencia de los armónicos superiores al fundamental ($n > 2$) y la potencia del fundamental.

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \cdot \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}$$

Los inversores de conexión a red suministran una señal de calidad, con $THD < 3\%$ o inferiores.

① Conceptos Generales

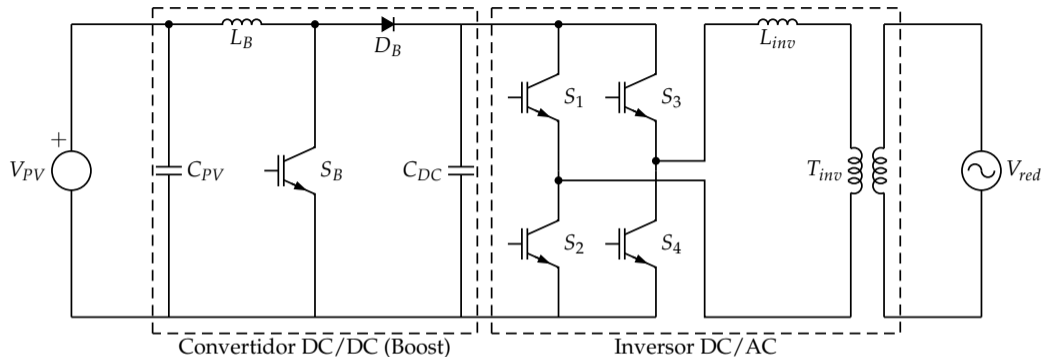
② Características básicas

③ Composición

④ Funcionamiento

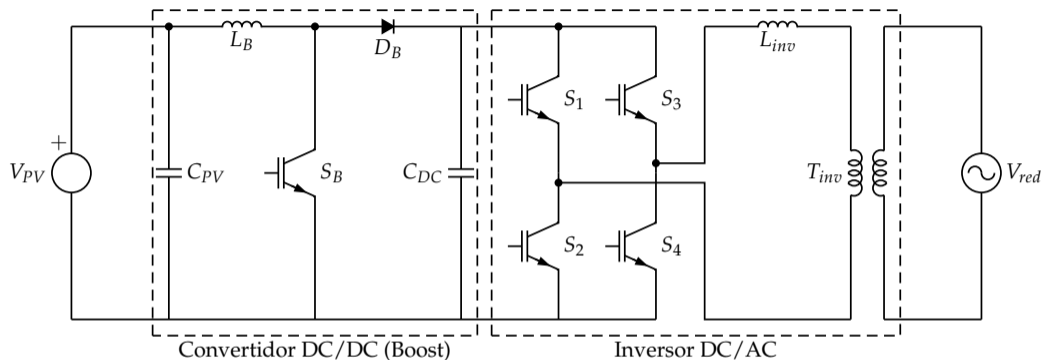
⑤ Islanding

Entrada



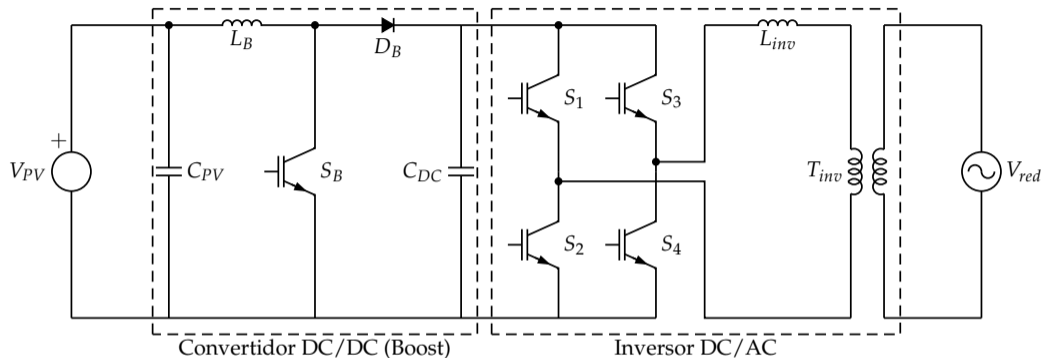
- ▶ **Filtro de entrada:** atenúa el rizado que produce la conmutación en la corriente de entrada
- ▶ **Convertidor DC/DC:** adecúa (eleva o reduce) la tensión de salida del generador a la tensión necesaria para el puente de conmutación. Puede realizar las funciones de búsqueda del punto de máxima potencia.

Puente y salida



- ▶ **Puente inversor:** realiza el troceado de la señal continua para convertirla en alterna
- ▶ **Filtro de salida:** elimina o atenúa los armónicos no deseados
- ▶ **Transformador:** adecua el valor de tensión de salida del puente al de la red y proporciona aislamiento galvánico entre la parte DC y AC.

Control



- **Control:** realiza la supervisión de la entrada y salida del convertidor DC/DC y del puente inversor y entrega las consignas correspondientes para localizar y seguir el MPP del generador, y para obtener una señal sinusoidal con bajo contenido en armónicos en la salida del inversor.

① Conceptos Generales

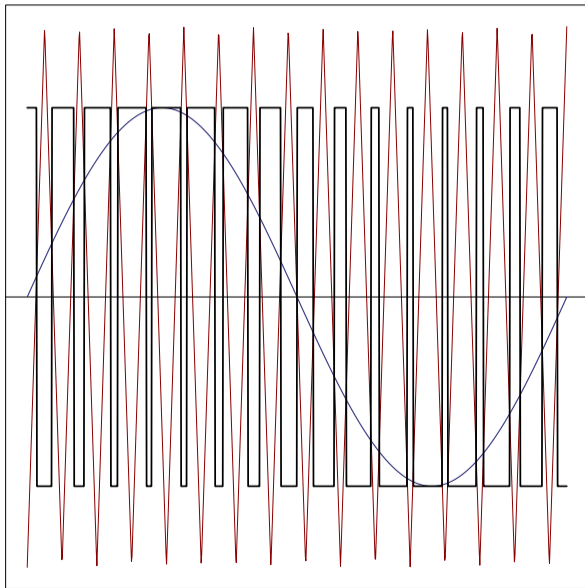
② Características básicas

③ Composición

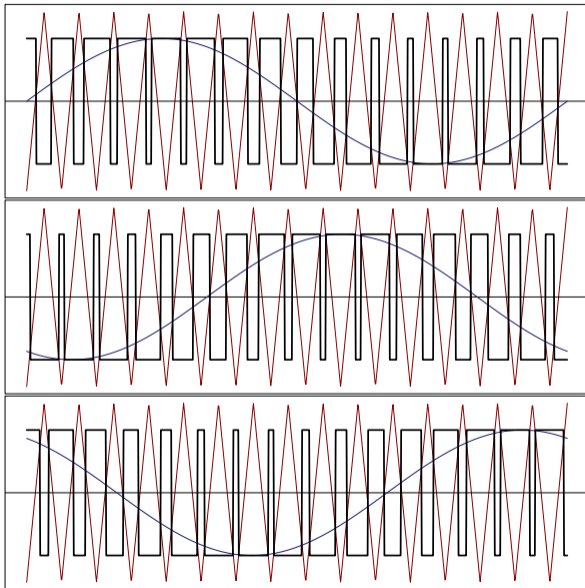
④ **Funcionamiento**

⑤ Islanding

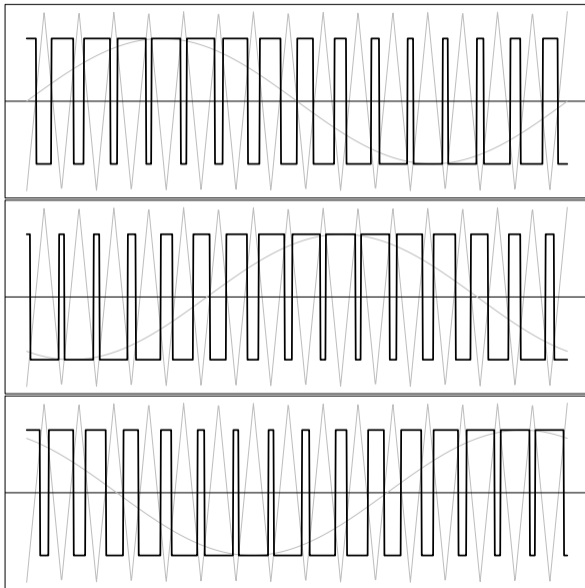
Modulación SPWM (monofásico)



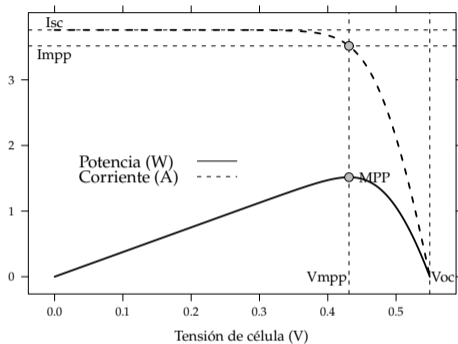
Modulación SPWM (trifásico)



Modulación SPWM (trifásico)

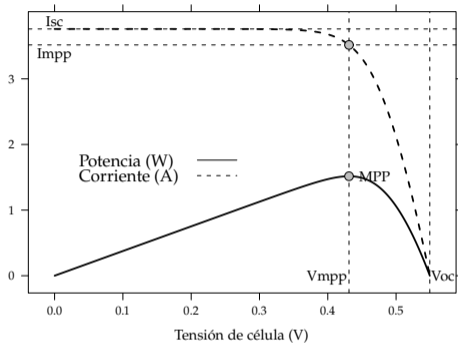


Busqueda del Punto de Máxima Potencia



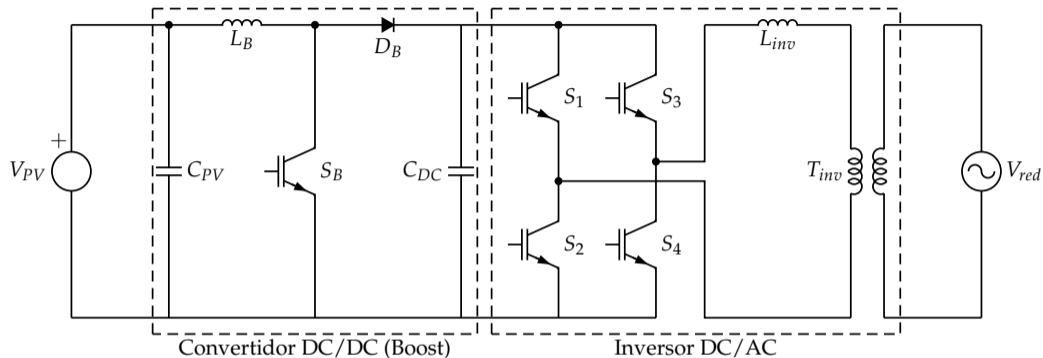
$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} > 0 & 0 < V < V_{mpp} \\ \frac{dP}{dV} = 0 & V = V_{mpp} \\ \frac{dP}{dV} < 0 & V_{mpp} < V < V_{oc} \end{cases}$$

Busqueda del Punto de Máxima Potencia



$$\begin{cases} \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} & 0 < V < V_{mpp} \\ \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} & V = V_{mpp} \\ \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} & V_{mpp} < V < V_{oc} \end{cases}$$

Transformador de salida



- ▶ El transformador permite adecuar el nivel de tensión de salida del puente de conmutación a la tensión de red.
- ▶ La componente inductiva del transformador es parte del filtro de salida y sirve como acoplamiento entre la red eléctrica y la salida del inversor.
- ▶ Establece el aislamiento galvánico entre la entrada del inversor (DC) y la salida (AC).

Opciones comerciales

Existen tres opciones en el mercado de inversores de conexión a red:

- ▶ Inversores con transformador de salida en baja frecuencia
- ▶ Inversores sin transformador
- ▶ Inversores con transformador de alta frecuencia

Normativa relativa al transformador

La normativa vigente en España obliga al uso de un transformador de aislamiento o elemento equivalente para cumplir tres objetivos:

- 1 Aislar la instalación generadora para evitar la transferencia de defectos entre la red y la instalación
- 2 Proporcionar seguridad personal
- 3 Evitar la inyección de corriente continua en la red.

Normativa: Nota de Interpretación Técnica

- ▶ Objetivos 1 y 2 se consiguen mediante la adecuada conexión de masas y tierras en el sistema.
- ▶ Objetivo 3: «**la corriente continua inyectada en la red de distribución por una instalación generadora no será superior al 0,5% de la corriente nominal de la misma**», cumplido «**cuando se disponga en la instalación de un transformador separador entre el inversor y el punto de conexión de la red de distribución**». *Los inversores con transformador de alta frecuencia o sin transformador deben demostrar el cumplimiento de este requisito mediante un ensayo descrito en esta nota.*

① Conceptos Generales

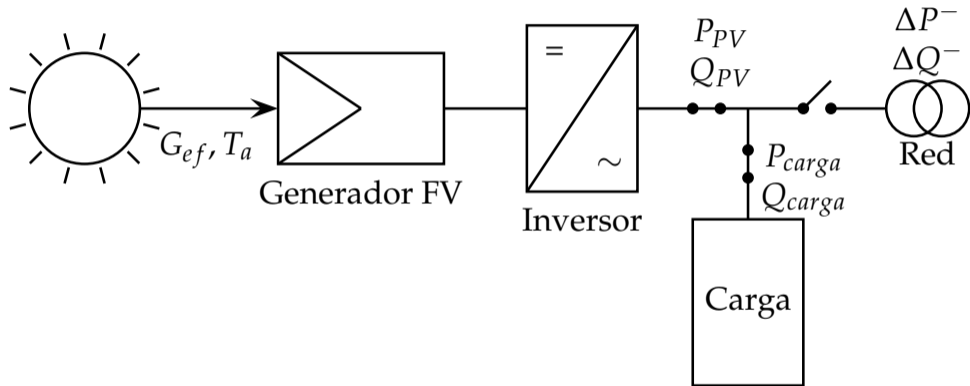
② Características básicas

③ Composición

④ Funcionamiento

⑤ **Islanding**

Definición del problema



Ecuaciones básicas

Antes de la desconexión:

$$\Delta P^- = P_{carga} - P_{PV}$$

$$\Delta Q^- = Q_{carga} - Q_{PV} \simeq Q_{carga}$$

Después de la desconexión:

$$\Delta P^+ = 0 \rightarrow P_{carga} = P_{PV}$$

$$\Delta Q^+ = 0 \rightarrow Q_{carga} = 0$$

siendo:

$$P_{carga} = \frac{V^2}{R_{carga}}$$

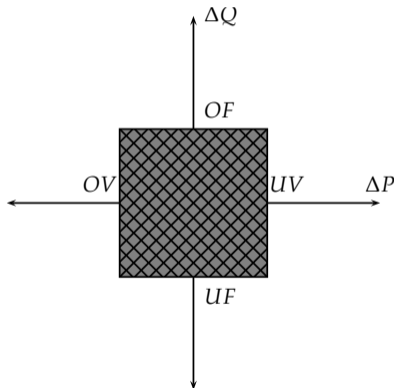
$$Q_{carga} = \frac{V^2}{\omega L} - V^2 \omega C$$

Casos posibles

- ▶ $\Delta P^- > 0 \rightarrow P_{carga} > P_{PV}$. Al producirse la desconexión, dado que P_{PV} no cambia, disminuye la potencia entregada a la carga, y por tanto baja la tensión.
- ▶ $\Delta P^- < 0 \rightarrow P_{carga} < P_{PV}$. Al producirse la desconexión, aumenta la potencia entregada a la carga, y por tanto sube la tensión.
- ▶ $\Delta Q^- > 0 \rightarrow Q_{carga} > 0$. La carga es inductiva. Al producirse la desconexión, dado que el generador FV no entrega reactiva, la reactiva debe tender a 0, y por tanto aumenta la frecuencia.
- ▶ $\Delta Q^- < 0 \rightarrow Q_{carga} < 0$. La carga es capacitiva. La reactiva debe tender a cero, y por tanto disminuye la frecuencia.

Ventana de no-detección

Cuando las condiciones de trabajo del generador y el consumo antes de la desconexión son muy cercanas, existe una ventana de no-detección.



Estudio experimental IEA-PVPS

- ▶ La probabilidad de que se de una situación de balance entre consumo y generación en una red de Baja Tensión está entre 1×10^{-5} y 1×10^{-6} .
- ▶ Para que se de una situación de isla, este balance debe coincidir con una desconexión de la red: la probabilidad de ocurrencia simultánea de estos dos sucesos es virtualmente nula.

Estudio experimental IEA-PVPS

- ▶ El riesgo eléctrico existente en cualquier red eléctrica es del orden de 1×10^{-6} .
- ▶ Este estudio mostró que el riesgo de accidente eléctrico asociado a un sistema fotovoltaico funcionando en isla bajo los escenarios de mayor penetración fotovoltaica era inferior a 1×10^{-9} .
- ▶ Este resultado indica que el riesgo asociado al accidente eléctrico por isla FV no incrementa el riesgo que ya existe en las instalaciones eléctricas.