

## **Lección: Inversores de onda cuadrada**

**\* Introducción**

**\* Inversor en medio puente**

**\* Inversor “push-pull”**

**\* Inversor en puente completo**

◆ *Sin deslizamiento de fase*

◆ *Con deslizamiento de fase*

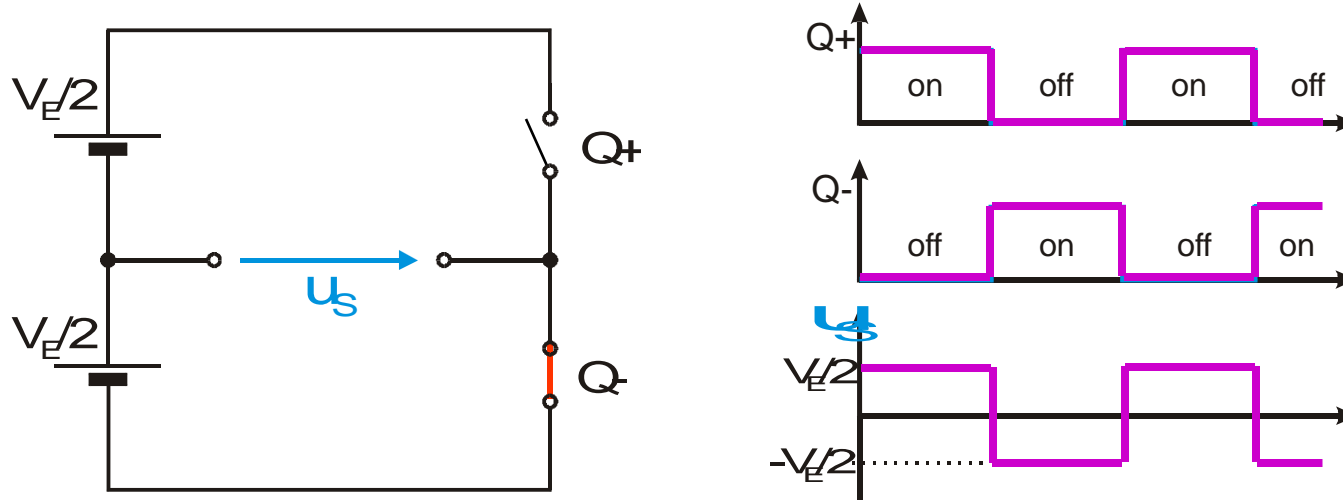
**\* Análisis del contenido armónico**

**\* Control de inversores de onda cuadrada**

**\* Conclusiones**

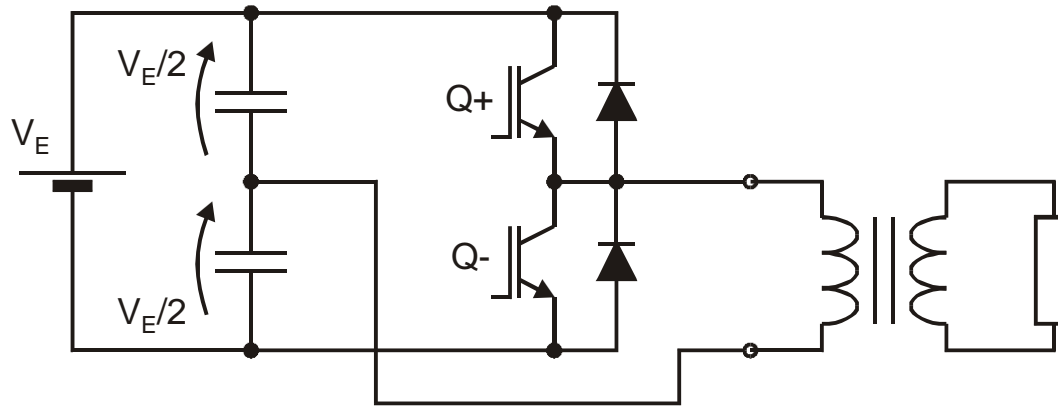


## Inversor en medio puente: funcionamiento básico



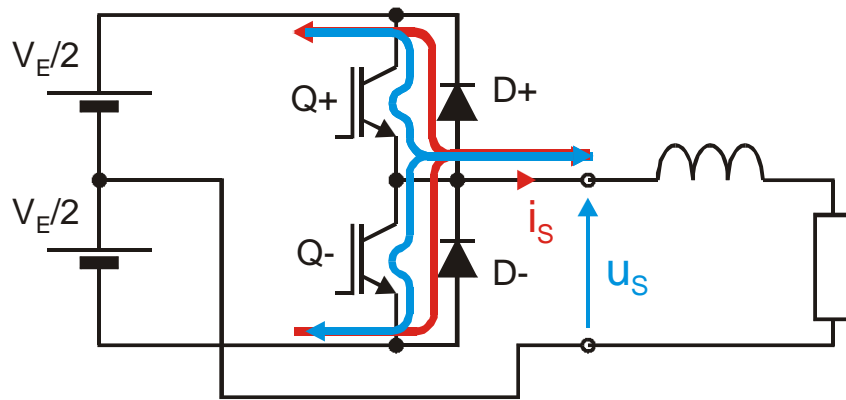
- \* Típicamente se emplean señales de gobierno con ciclo de trabajo del 50% y complementarias en los dos interruptores
- \* La tensión de salida es una onda cuadrada de amplitud  $V_E/2$

## Inversor en medio puente: implementación práctica

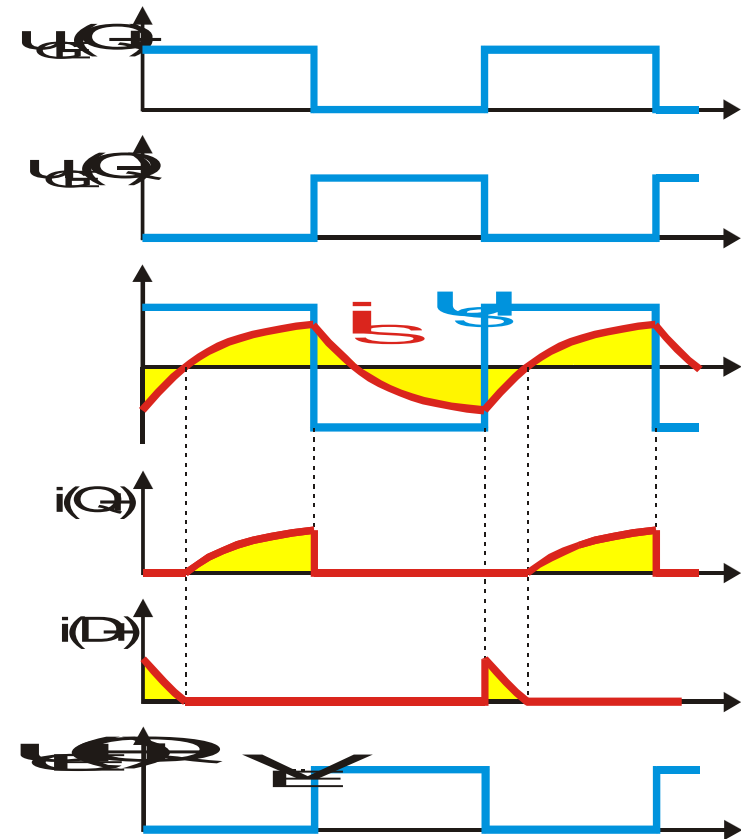


- Funcionamiento en cuatro cuadrantes → diodos
- Fuente única de CC → divisor capacitivo
- Aislamiento → transformador

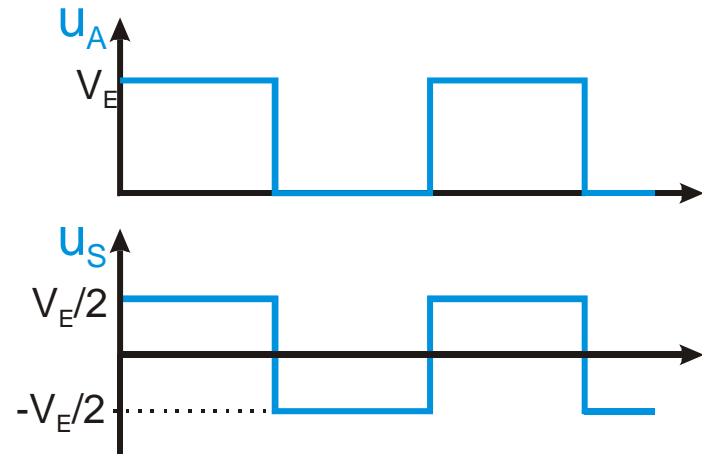
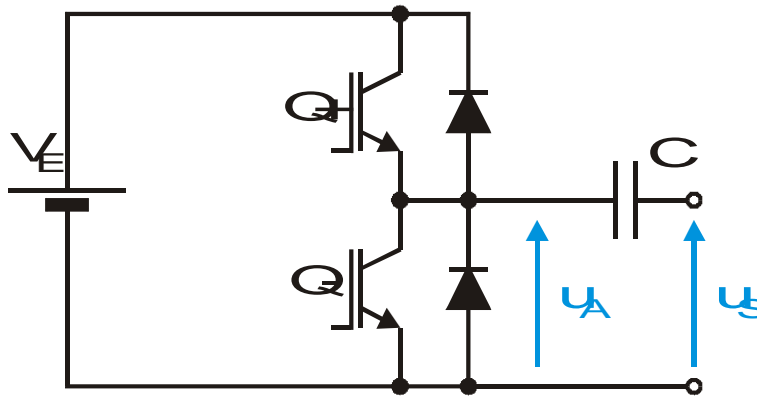
# Inversor en medio puente: formas de onda y esfuerzos



Carga R-L



## Inversor en medio puente asimétrico



- \* Comportamiento equivalente al medio puente monofásico
- \* La componente continua de la tensión de salida se elimina mediante el condensador serie C

## ***Inversor en medio puente: resumen de características***

- 1) Onda cuadrada de salida: alto contenido armónico*
- 2) Amplitud de salida no controlable*
- 3) Frecuencia de salida variable*
- 4) La tensión que soportan los interruptores es el doble que la amplitud de la señal de salida*
- 5) Las señales de gobierno de los interruptores no están referidas al mismo punto: circuito de control complejo*

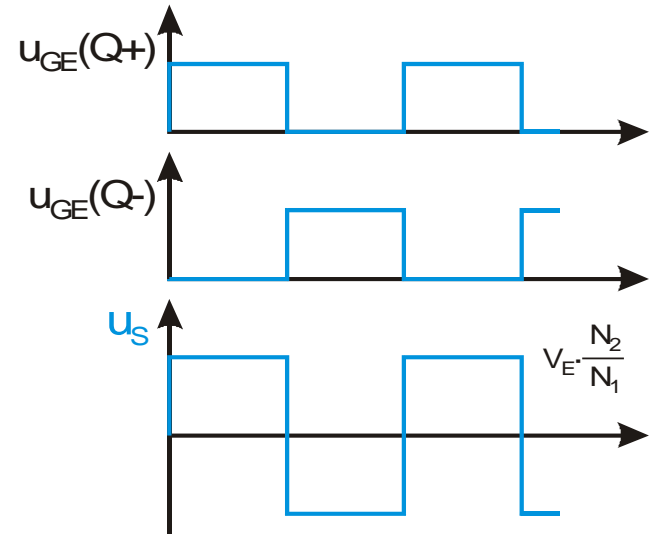
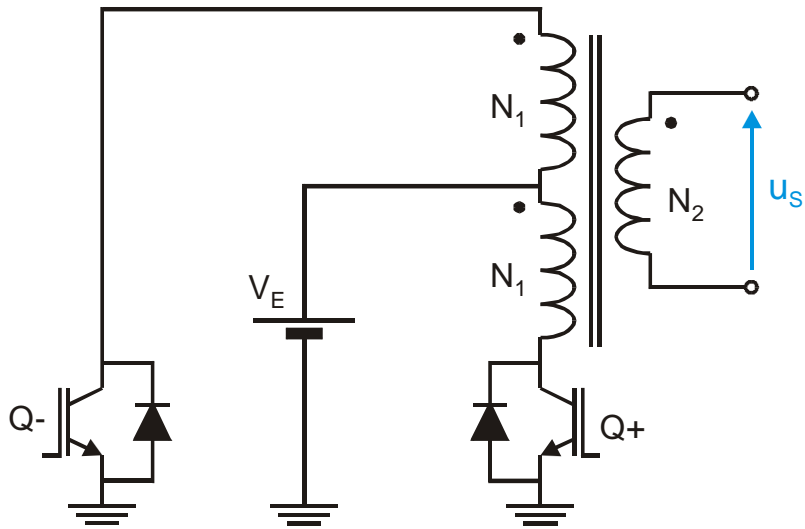


## **Lección: Inversores de onda cuadrada**

- \* **Introducción**
- \* **Inversor en medio puente**
- \* **Inversor “push-pull”**
- \* **Inversor en puente completo**
  - ◆ *Sin deslizamiento de fase*
  - ◆ *Con deslizamiento de fase*
- \* **Análisis del contenido armónico**
- \* **Control de inversores de onda cuadrada**
- \* **Conclusiones**

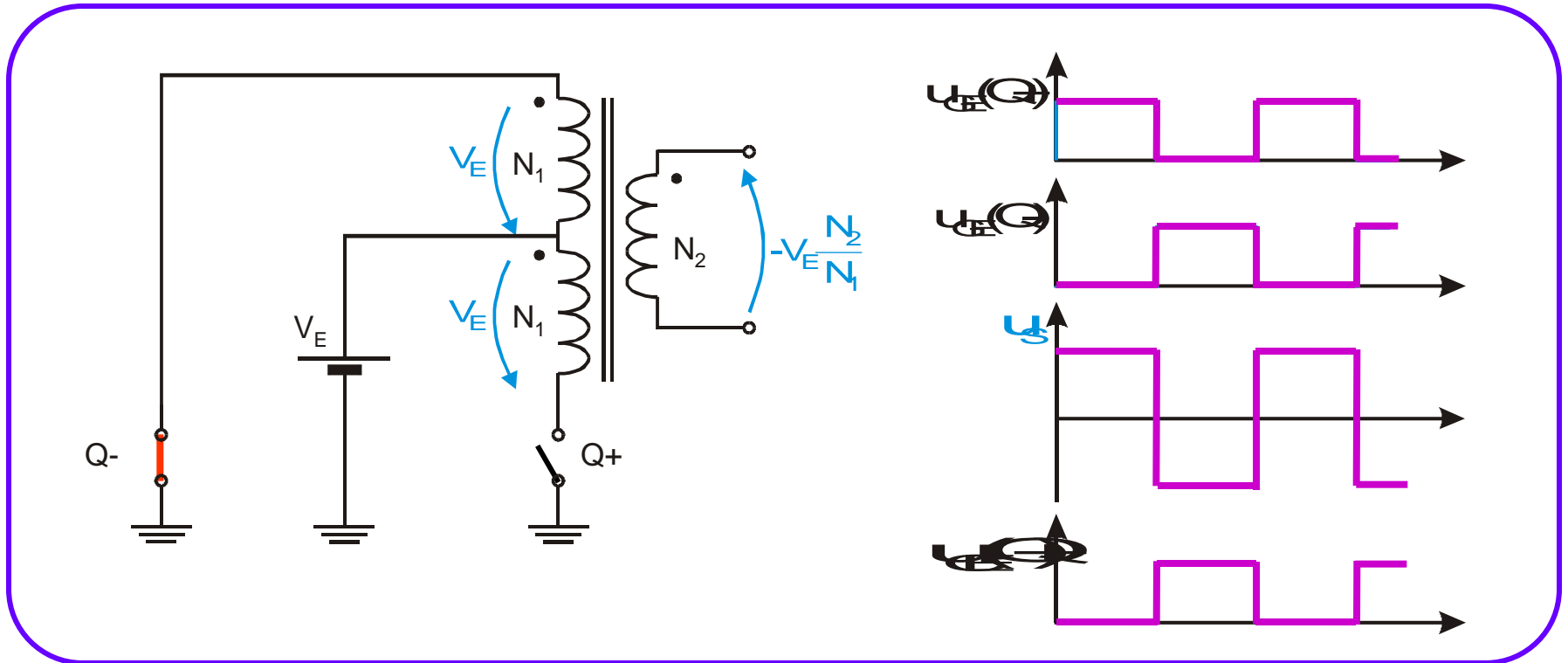


# Inversor "push-pull"





## Inversor "push-pull": funcionamiento básico



## ***Inversor “push-pull”: resumen de características***

- 1) Onda cuadrada de salida*
- 2) Topología con aislamiento*
- 3) Las señales de control de ambos transistores están referidas al mismo punto: control sencillo*
- 4) La tensión que soportan los interruptores es el doble que la tensión de entrada  $V_E$*
- 5) Cualquier asimetría en las señales de control o en el transformador puede dar lugar a la saturación del núcleo*

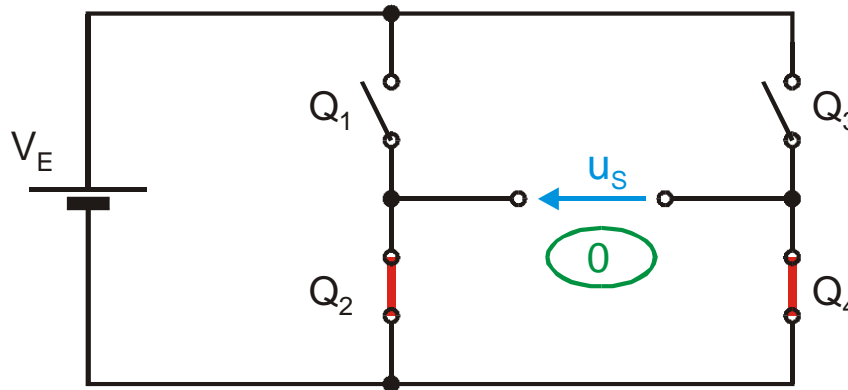


## **Lección: Inversores de onda cuadrada**

- \* Introducción**
- \* Inversor en medio puente**
- \* Inversor “push-pull”**
- \* Inversor en puente completo**
  - ◆ Sin deslizamiento de fase**
  - ◆ Con deslizamiento de fase**
- \* Análisis del contenido armónico**
- \* Control de inversores de onda cuadrada**
- \* Conclusiones**



## Inversor en puente completo

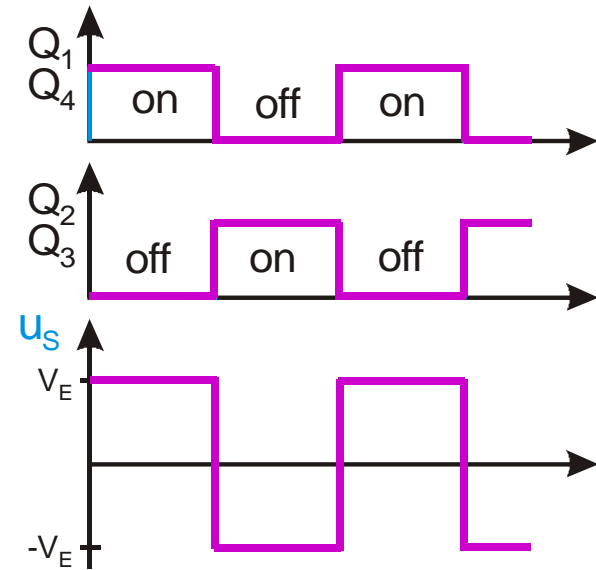
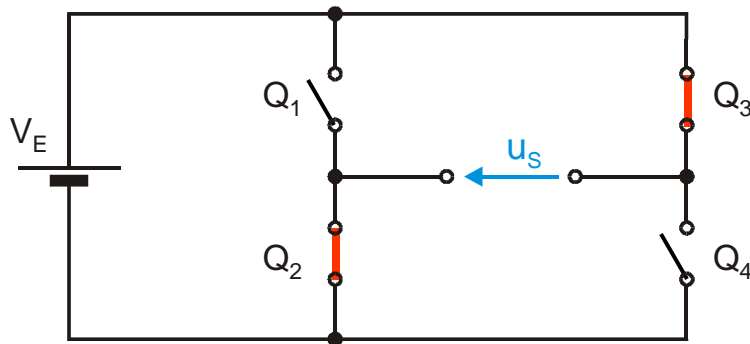


### Cuatro interruptores: mayores posibilidades de control

- Interruptores de la diagonal  $Q_1$ - $Q_4 \rightarrow u_S = +V_E$
- Interruptores de la diagonal  $Q_2$ - $Q_3 \rightarrow u_S = -V_E$
- Interruptores de la parte superior  $Q_1$ - $Q_3 \rightarrow u_S = 0$
- Interruptores de la parte inferior  $Q_2$ - $Q_4 \rightarrow u_S = 0$

## Inversor en puente completo: funcionamiento

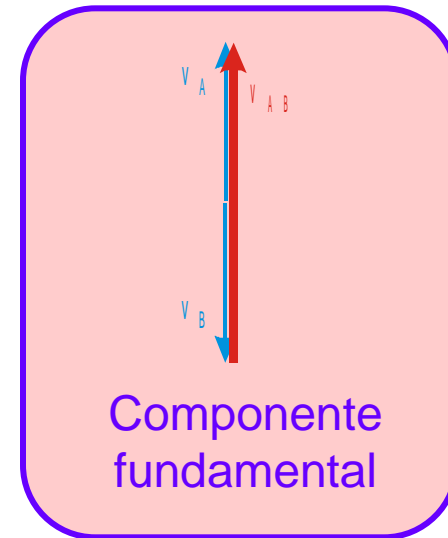
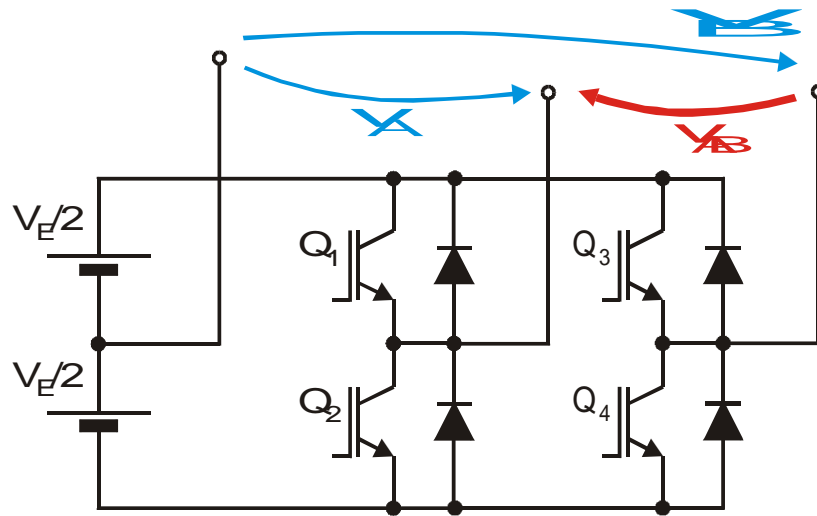
### Control sin deslizamiento de fase



- Permite manejar el doble de potencia que un medio puente para el mismo esfuerzo en los interruptores

## Inversor en puente completo

Método de análisis alternativo: derivación a partir del medio puente

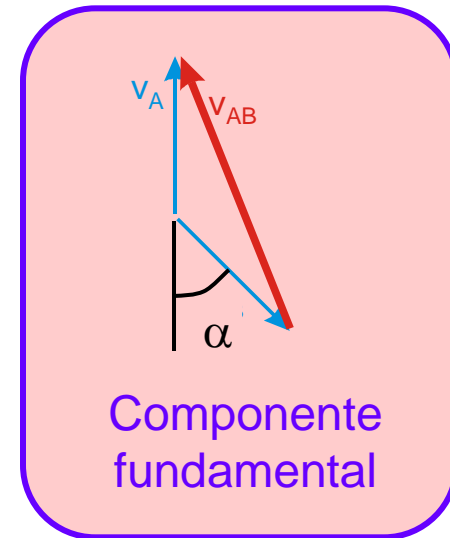
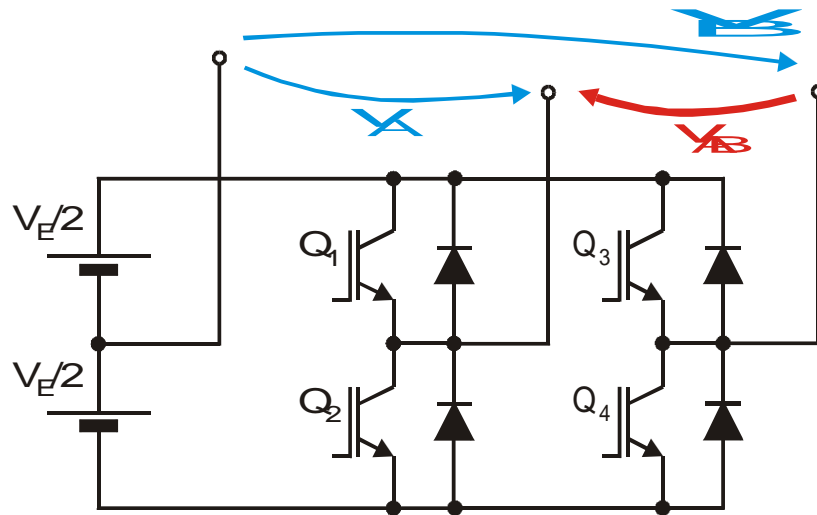


¿Se puede modificar la amplitud de salida modificando la fase relativa entre ambas ramas?

Control por deslizamiento de fase

## Inversor en puente completo

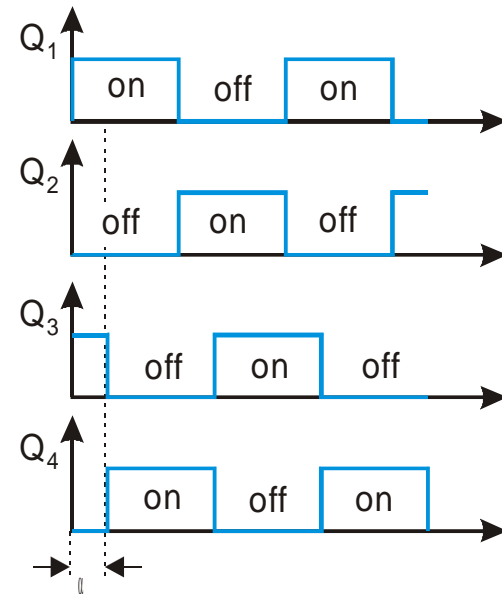
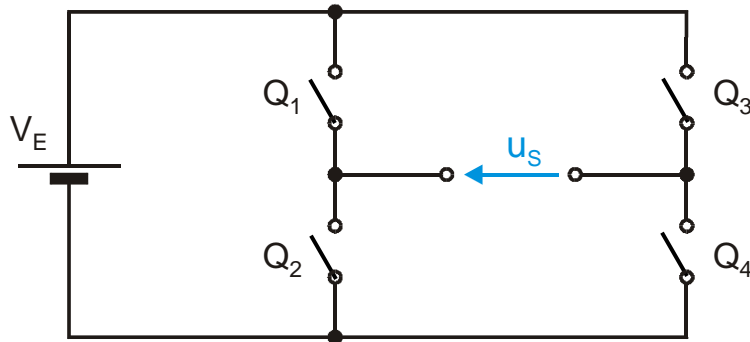
### Control con deslizamiento de fase



- Se puede ajustar la amplitud de salida mediante el ángulo  $\alpha$

## Inversor en puente completo

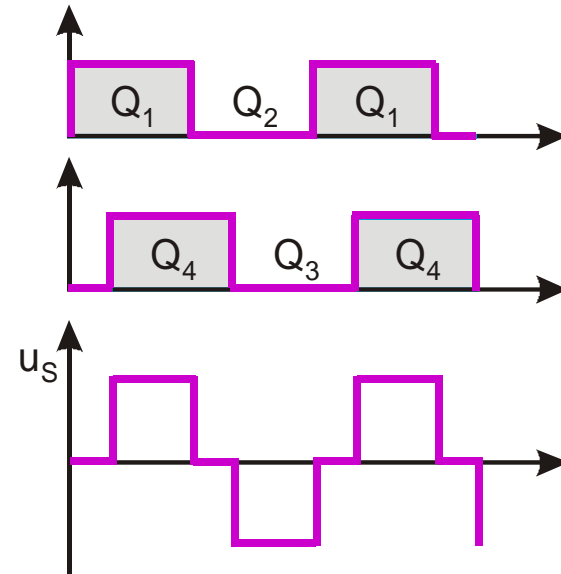
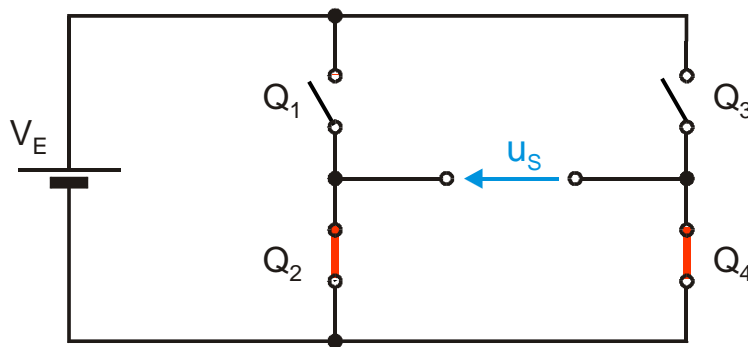
### Control con deslizamiento de fase





## Inversor en puente completo

### Control con deslizamiento de fase



- Se puede ajustar la amplitud de salida  $u_s$  mediante el ángulo  $\alpha$
- La forma de onda obtenida es más próxima a una onda senoidal:

***menor contenido armónico***

## ***Inversor en puente completo: resumen de características***

- 1) La tensión de salida puede tomar tres valores:  $V_E$ ,  $-V_E$  y 0*
- 2) Permite el control de la amplitud de salida*
- 3) Permite reducir el contenido armónico en la salida*
- 4) Los esfuerzos de tensión en los interruptores son iguales a la tensión máxima de salida*



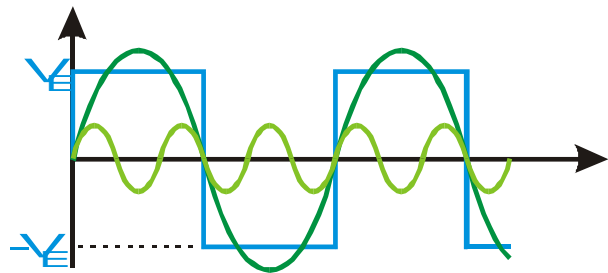
## **Lección: Inversores de onda cuadrada**

- \* Introducción**
- \* Inversor en medio puente**
- \* Inversor “push-pull”**
- \* Inversor en puente completo**
  - ◆ Sin deslizamiento de fase**
  - ◆ Con deslizamiento de fase**
- \* Análisis del contenido armónico**
- \* Control de inversores de onda cuadrada**
- \* Conclusiones**



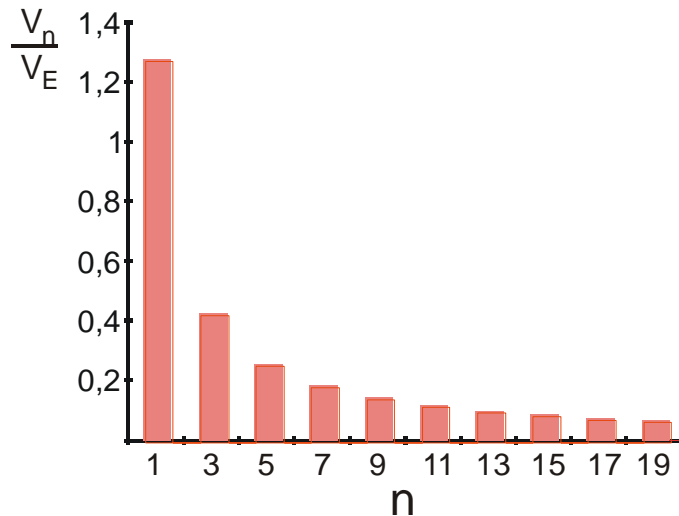
## Análisis del contenido armónico

Medio puente, push-pull y puente completo **sin** deslizamiento



Fourier

$$V_n(\text{pico}) = \frac{2 \cdot V_E}{\pi} \int_0^{\pi} V_A(1 - \cos(n\theta)) d\theta$$



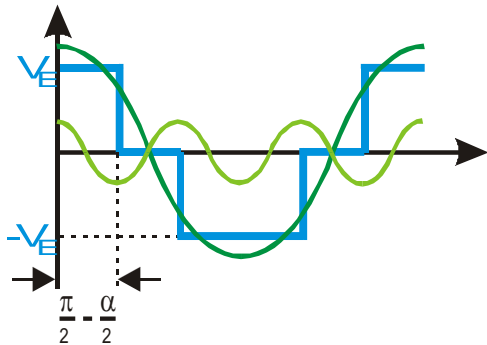
Componente fundamental:

$$V_1(\text{pico}) = \frac{4 \cdot V_E}{\pi}$$

Elevado THD: 48%

## Análisis del contenido armónico

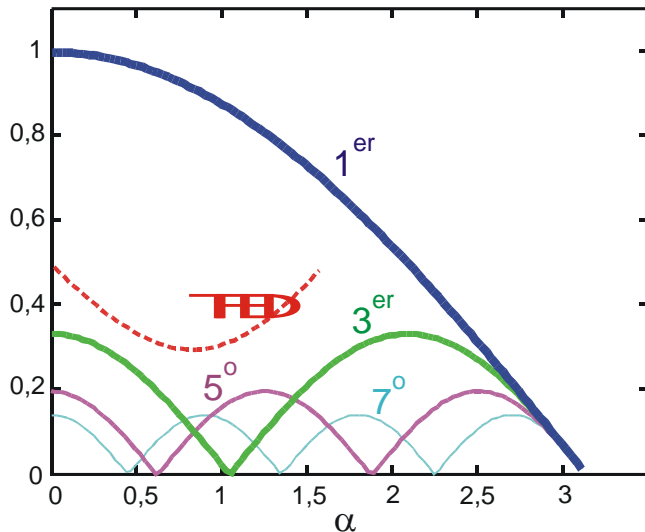
### Puente completo con deslizamiento de fase



Fourier

$$V_n(\text{pico}) = \frac{4}{\pi} \cdot \int_0^{\frac{\pi-\alpha}{2}} V_E \cdot \cos(n \cdot \theta) \cdot d\theta \quad \text{para } n = 1, 3, 5, \dots$$

$$V_n(\text{pico}) = \frac{4 \cdot V_E}{n \cdot \pi} \cdot \text{sen} \left( n \cdot \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} \right) \right) \quad \text{para } n = 1, 3, 5, \dots$$



- \* El ángulo de deslizamiento  $\alpha$  permite ajustar la componente fundamental de la tensión de salida
- \* El contenido armónico depende del ángulo  $\alpha$

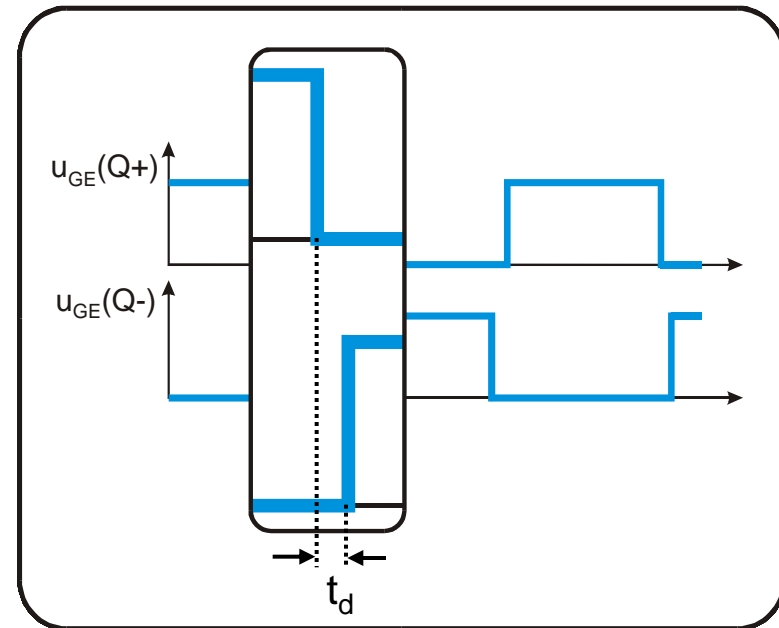
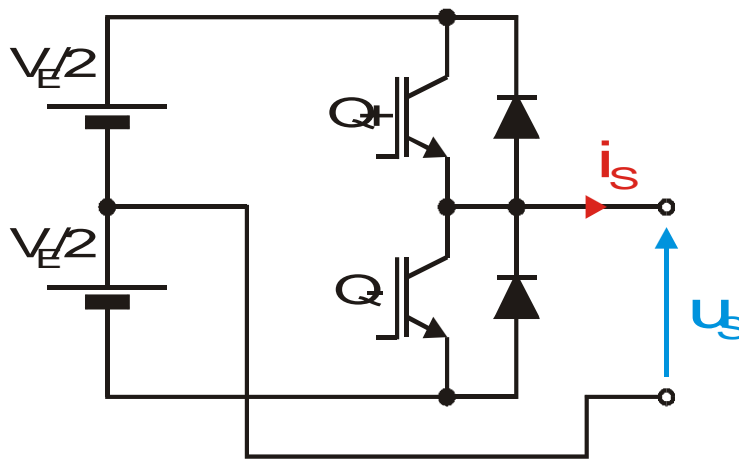
## **Lección: Inversores de onda cuadrada**

- \* Introducción**
- \* Inversor en medio puente**
- \* Inversor “push-pull”**
- \* Inversor en puente completo**
  - ◆ Sin deslizamiento de fase**
  - ◆ Con deslizamiento de fase**
- \* Análisis del contenido armónico**
- \* Control de inversores de onda cuadrada**
- \* Conclusiones**



## Control de inversores de onda cuadrada

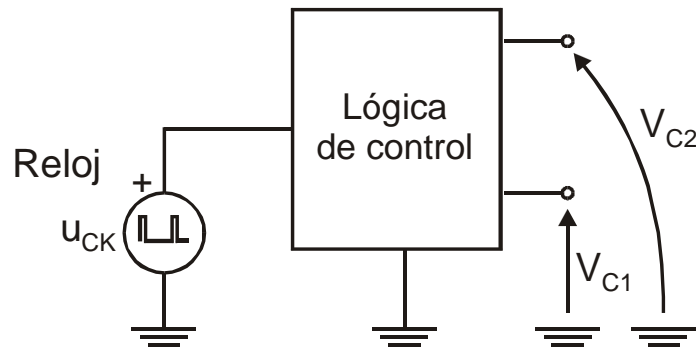
### Problemática del control de un medio puente



- Es necesario incluir tiempos muertos para evitar cortocircuitos puntuales de rama debidos a los tiempos de conmutación

## Control de inversores de onda cuadrada

### Problemática del control de un medio puente



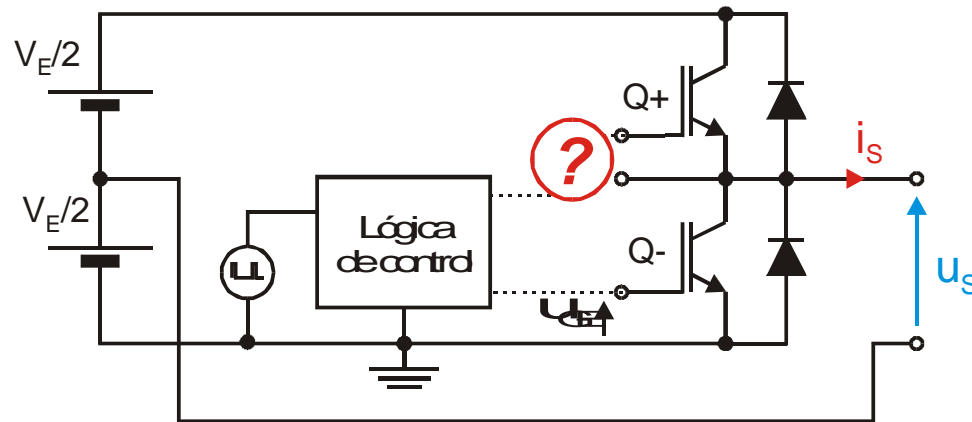
Circuitos integrados específicos:

- SG3524
- LM3525
- ...



## Control de inversores de onda cuadrada

### Problemática del control de un medio puente



Las señales de control no están referidas al mismo punto:

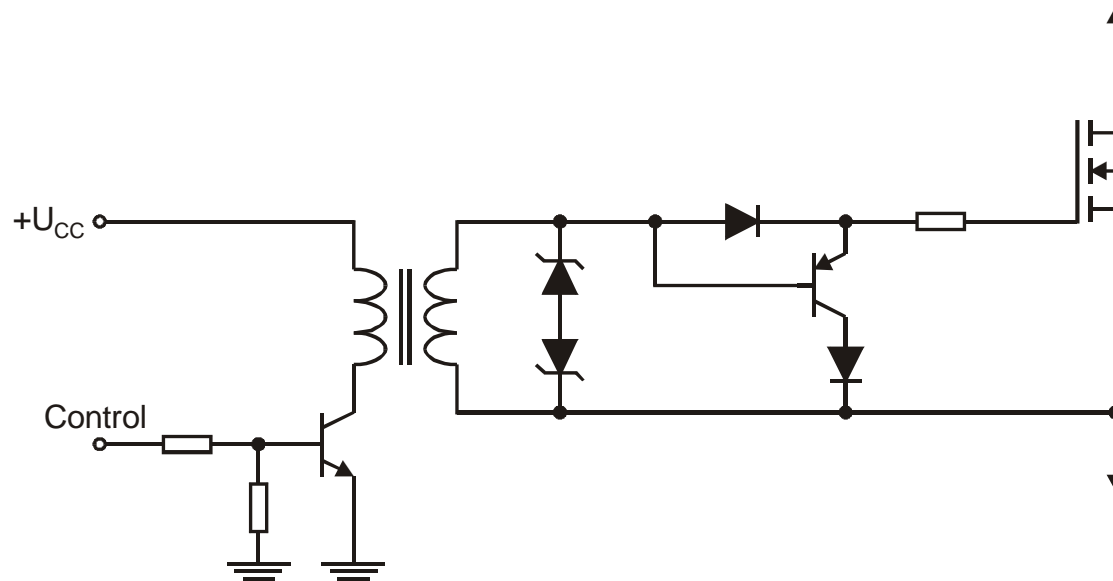
***es necesario aislamiento***

Opciones:

- *Transformador de impulsos para el transistor superior*
- *Fuente aislada + optoacoplador*
- *Circuitos integrados específicos para el control de un medio puente*

## Control de inversores de onda cuadrada

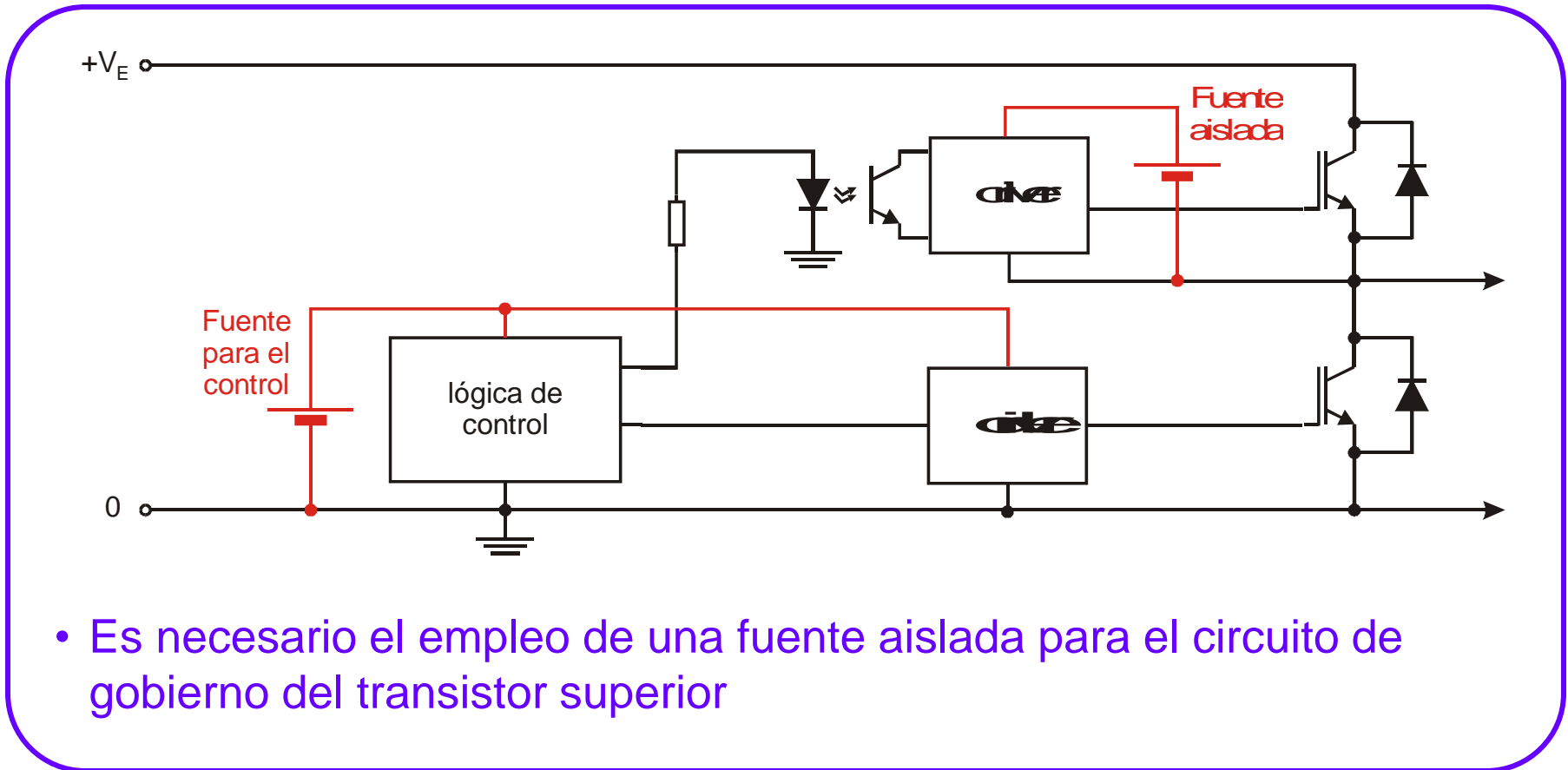
Control de un medio puente: *transformador de impulsos*



Transformador de impulsos para el gobierno de un MOSFET

## Control de inversores de onda cuadrada

### Control de un medio puente: *optoacoplador + fuente aislada*

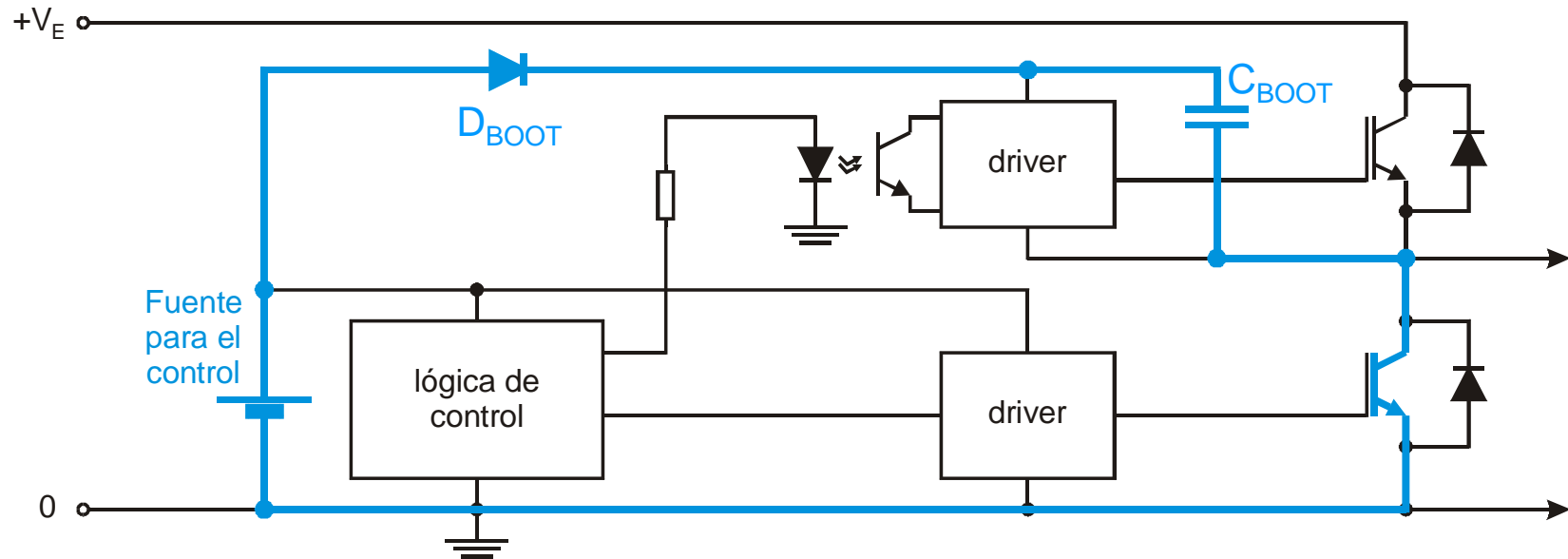


- Es necesario el empleo de una fuente aislada para el circuito de gobierno del transistor superior

## Control de inversores de onda cuadrada

### Control de un medio puente: *optoacoplador + fuente aislada*

Obtención de la fuente aislada mediante la técnica "bootstrap"



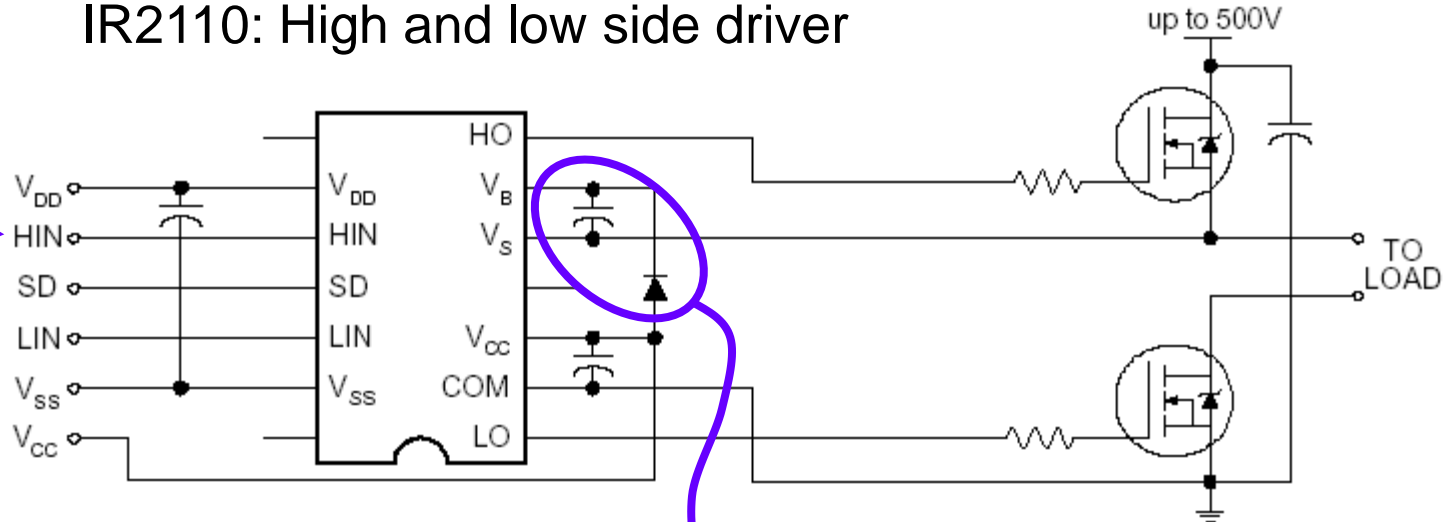
- Cuando conmuta el transistor inferior  $C_{BOOT}$  se carga desde la fuente de control a través de  $D_{BOOT}$

## Control de inversores de onda cuadrada

Control de un medio puente: *circuitos integrados específicos*

Familia IR21xx: gobierno de un puente de MOSFET + "bootstrap"

IR2110: High and low side driver



Control independiente de los transistores superior e inferior

Alimentación auxiliar "bootstrap"

## Control de inversores de onda cuadrada

### Control de un medio puente: *módulos específicos*

Familia SKHIxx: gobierno de un puente de IGBT

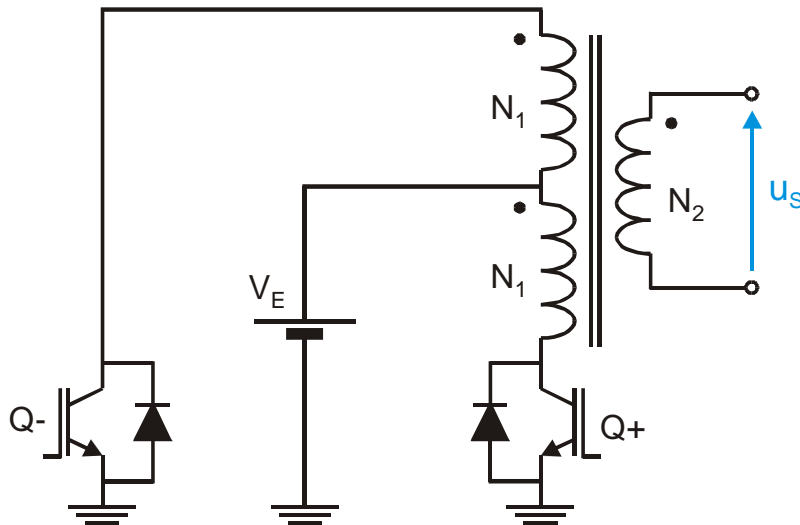
SKHI61: 6-pack driver



- Señales de control aisladas para una o varias ramas de IGBTs
- Acoplamiento aislado mediante optoacopladores o transformador
- Entradas digitales compatibles CMOS o TTL

## Control de inversores de onda cuadrada

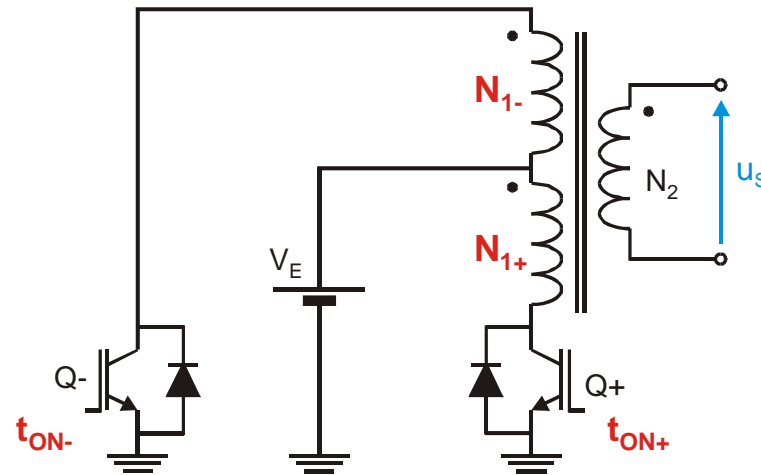
### Problemática del control de un inversor “push-pull”



- Señales de control referidas a un punto común
- Es necesario introducir tiempos muertos en las señales de control
- Cualquier asimetría en el transformador o en las señales de control llevan el núcleo a saturación

## Control de inversores de onda cuadrada

### Problemática del control de un inversor “push-pull”

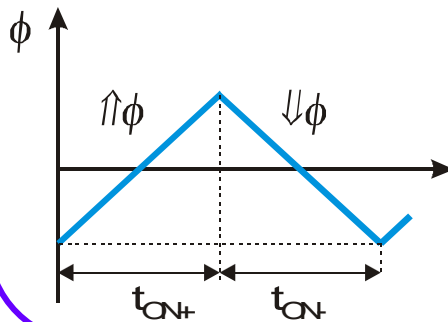


Idealmente:

$$t_{ON+} = t_{ON-}$$

$$N_{1+} = N_{1-}$$

Flujo núcleo



$$\hat{\uparrow}\phi = \frac{V_E}{N_{1+}} \cdot t_{ON+}$$

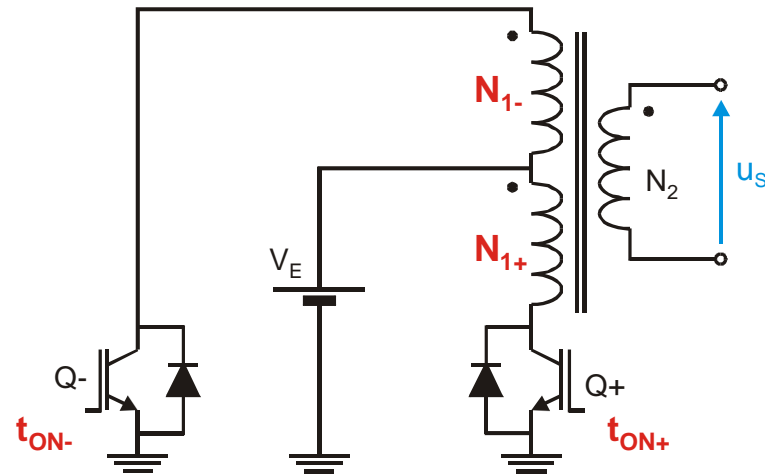
$$\hat{\downarrow}\phi = \frac{V_E}{N_{1-}} \cdot t_{ON-}$$

$$\hat{\uparrow}\phi = \hat{\downarrow}\phi$$



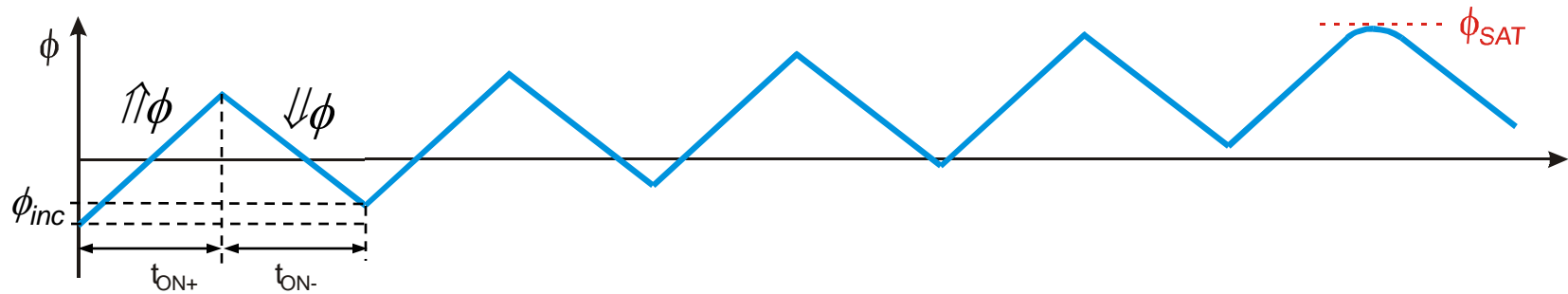
## Control de inversores de onda cuadrada

### Problemática del control de un inversor “push-pull”



En la práctica:

$$\uparrow\phi \neq \downarrow\phi$$



## Control de inversores de onda cuadrada

### Problemática del control de un inversor “push-pull”

#### Conclusiones del funcionamiento del “push-pull”:

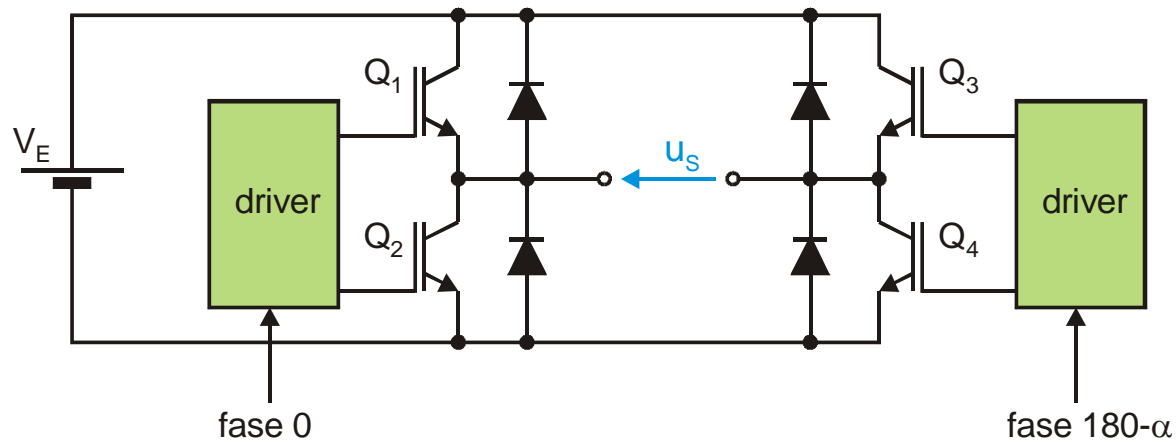
- No es necesario aislamiento en las señales de control
- Es preciso incluir tiempos muertos en las señales de gobierno
- El núcleo del transformador tiende a trabajar en saturación en parte del periodo:

*Mayores pérdidas en el material magnético e interruptores*



## Control de inversores de onda cuadrada

### Control de un inversor en puente completo



Misma problemática que en un medio puente:

- Es necesario aislamiento en las señales de control
- Es preciso incluir tiempos muertos en las señales de gobierno de los transistores de una misma rama

## **Lección: Inversores de onda cuadrada**

- \* Introducción**
- \* Inversor en medio puente**
- \* Inversor “push-pull”**
- \* Inversor en puente completo**
  - ◆ *Sin deslizamiento de fase*
  - ◆ *Con deslizamiento de fase*
- \* Análisis del contenido armónico**
- \* Control de inversores de onda cuadrada**
- \* Conclusiones**



**Conclusiones:**

*¿Hay alguna forma de reducir el contenido armónico y facilitar el filtrado?*

Alto contenido armónico

Conversiones CC/CA

Inversores

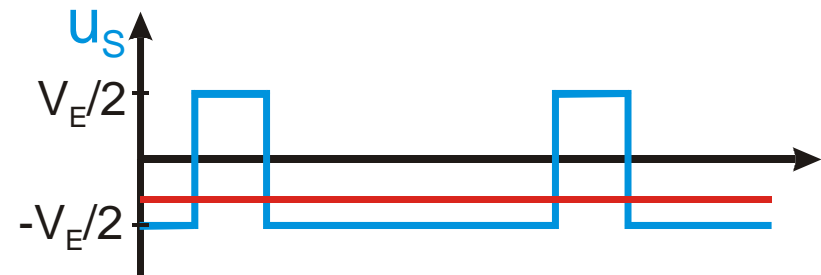
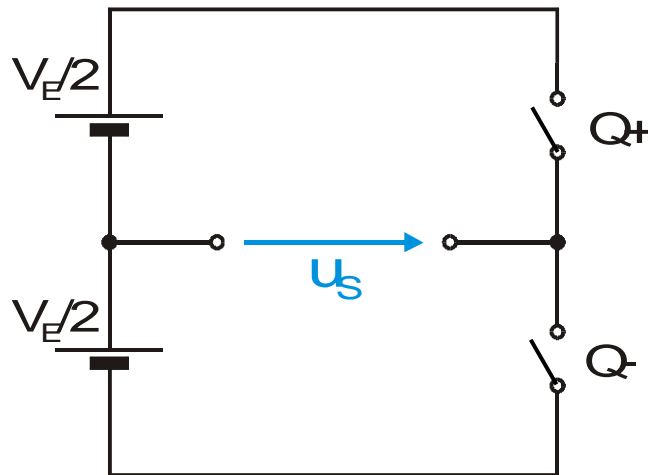
Onda Cuadrada

Pu

*Inversores modulados*

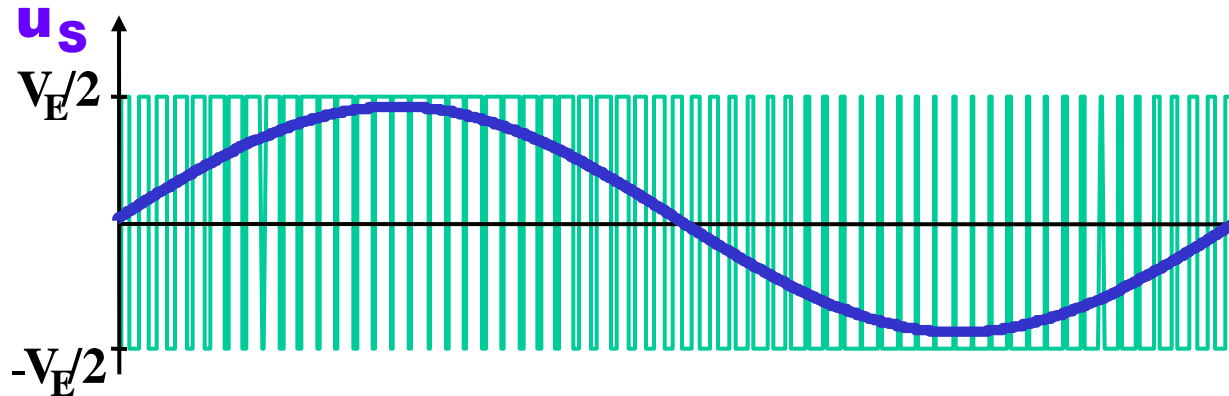


## Introducción a los inversores modulados:



- Modificando la proporción de tiempo en que están encendidos los interruptores se puede modificar el valor medio de salida

## Introducción a los inversores modulados:



- Frecuencia de conmutación de los interruptores mucho mayor que la de salida  $\Rightarrow$  *fácil filtrado*