

1

# Corso di ELETTRONICA INDUSTRIALE

## **INVERTITORI MONOFASE A TENSIONE IMPRESSA**

0.  
2

## Principi di funzionamento di invertitori monofase a tensione impressa

0.  
3

## Principi di funzionamento di invertitori monofase a tensione impressa

- Struttura e funzionamento dell'invertitore monofase di tensione a due livelli

0.  
4

## Principi di funzionamento di invertitori monofase a tensione impressa

- Struttura e funzionamento dell'invertitore monofase di tensione a due livelli
- Metodi di modulazione a PWM analogici e digitali

0.  
5

## Principi di funzionamento di invertitori monofase a tensione impressa

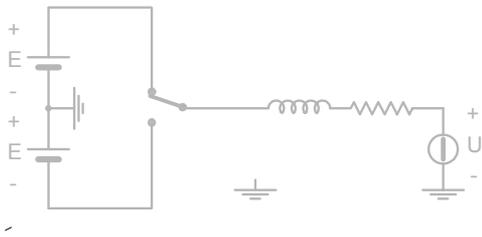
- Struttura e funzionamento dell'invertitore monofase di tensione a due livelli
- Metodi di modulazione a PWM analogici e digitali
- Modulazioni a bassa frequenza di portante e ad onda quadra

0.  
6

## Principi di funzionamento di invertitori monofase a tensione impressa

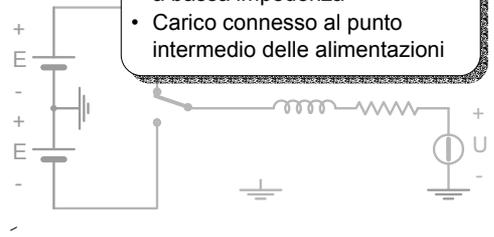
- Struttura e funzionamento dell'invertitore monofase di tensione a due livelli
- Metodi di modulazione a PWM analogici e digitali
- Modulazioni a bassa frequenza di portante e ad onda quadra
- Componenti di potenza per invertitori

### Invertitore di tensione monofase a PWM Generazione di due livelli di tensione: positivo e negativo



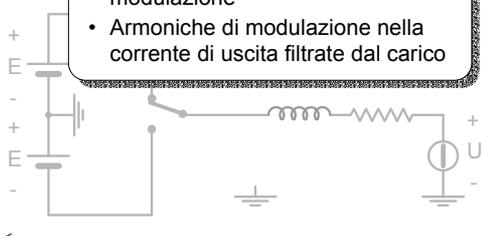
### Invertitore Gene

- Due livelli di tensione di uscita
- Alimentazioni continue (+E e -E) a bassa impedenza
- Carico connesso al punto intermedio delle alimentazioni



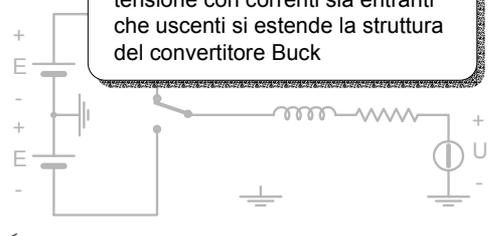
### Invertitore di tensione monofase a PWM

- Carico induttivo alla frequenza di modulazione
- Armoniche di modulazione nella corrente di uscita filtrate dal carico

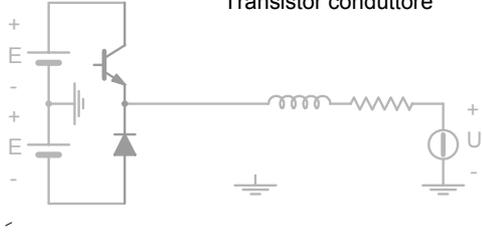


### Invertitore di tensione monofase a PWM

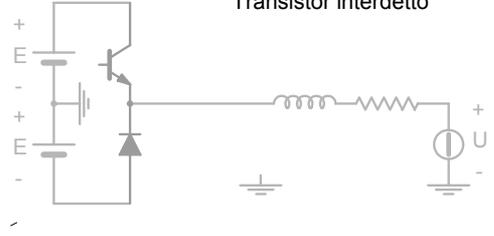
- Per generare i due livelli di tensione con correnti sia entranti che uscenti si estende la struttura del convertitore Buck



### Realizzazione dell'invertitore di tensione a due livelli (A) Corrente di carico uscente Transistor conduttore

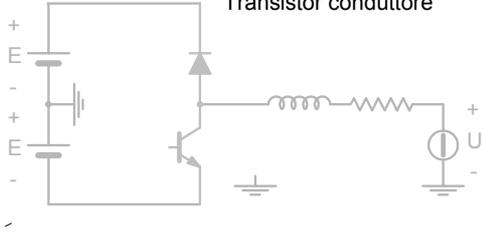


### Realizzazione dell'invertitore di tensione a due livelli (A) Corrente di carico uscente Transistor interdetto



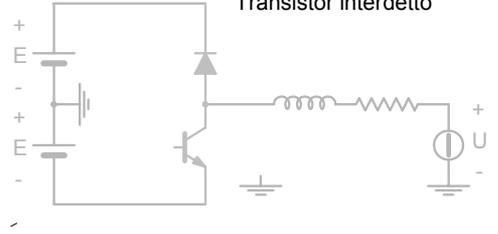
### Realizzazione dell'invertitore di tensione a due livelli

(B) Corrente di carico entrante  
Transistor conduttore



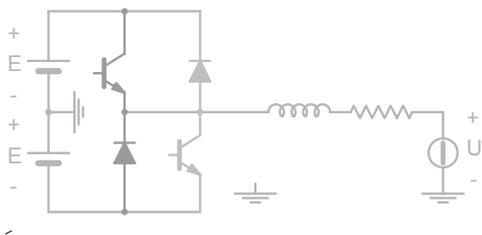
### Realizzazione dell'invertitore di tensione a due livelli

(B) Corrente di carico entrante  
Transistor interdetto



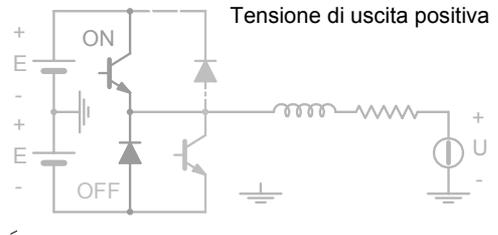
### Realizzazione dell'invertitore di tensione a due livelli

(A+B) Corrente di carico bidirezionale



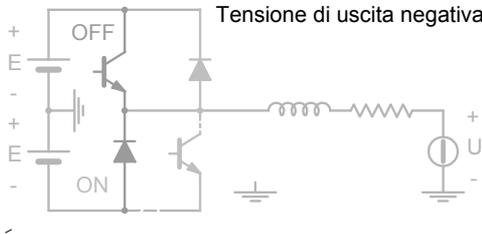
### Realizzazione dell'invertitore di tensione a due livelli

Corrente di carico bidirezionale  
Tensione di uscita positiva

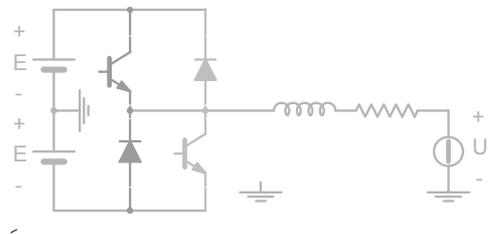


### Realizzazione dell'invertitore di tensione a due livelli

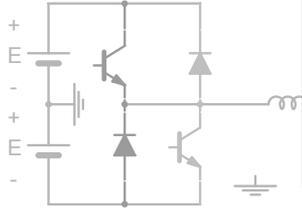
Corrente di carico bidirezionale  
Tensione di uscita negativa



### Realizzazione dell'invertitore di tensione a due livelli



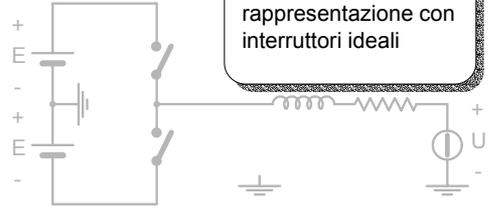
### Realizzazione dell'invertitore di tensione a due livelli



Ciascun transistor con il diodo connesso in parallelo costituisce un interruttore bidirezionale

### Modulazione PWM a due livelli

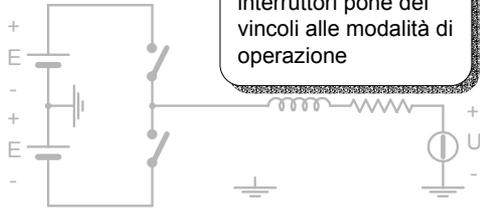
Rappresentazione con interruttori ideali



Per semplicità si userà la rappresentazione con interruttori ideali

### Modulazione PWM a due livelli

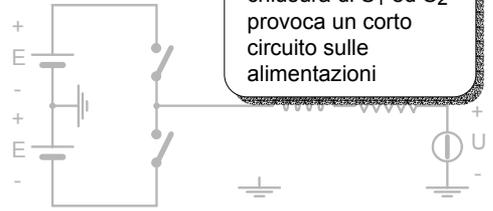
Rappresentazione con interruttori ideali



Tuttavia, la reale struttura degli interruttori pone dei vincoli alle modalità di operazione

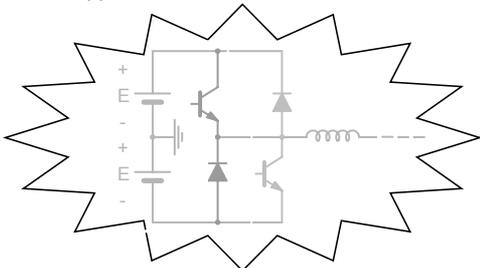
### Modulazione PWM a due livelli

Rappresentazione con interruttori ideali

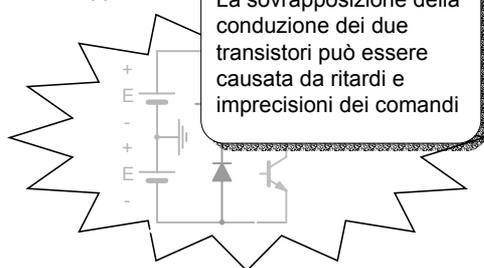


Ad esempio, la contemporanea chiusura di S1 ed S2 provoca un corto circuito sulle alimentazioni

### Invertitore di tensione monofase a due livelli Sovrapposizione di conduzione dei transistor



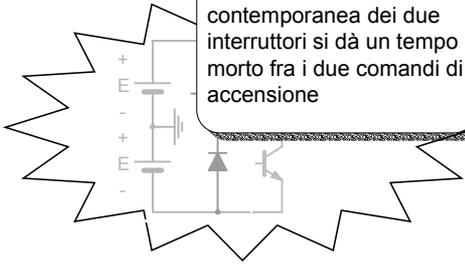
### Invertitore di tensione monofase a due livelli Sovrapposizione



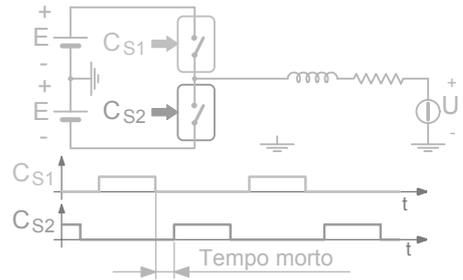
La sovrapposizione della conduzione dei due transistori può essere causata da ritardi e imprecisioni dei comandi

**Invertitore di tensione a due livelli**  
Sovrapposizione

Per evitare la conduzione contemporanea dei due interruttori si dà un tempo morto fra i due comandi di accensione

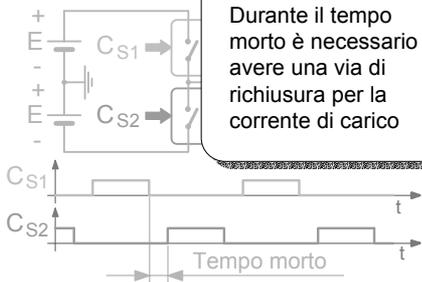


**Tempo morto di comando**

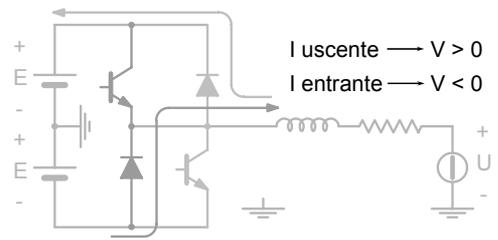


**Tempo morto di comando**

Durante il tempo morto è necessario avere una via di richiusura per la corrente di carico

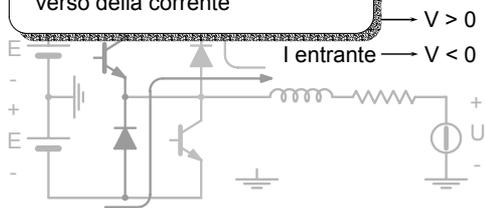


**Conduzione dei diodi durante il tempo morto**



**La via di richiusura è assicurata dai diodi in antiparallelo**

La tensione in uscita dipende dal verso della corrente



**Invertitore di tensione monofase a due livelli**

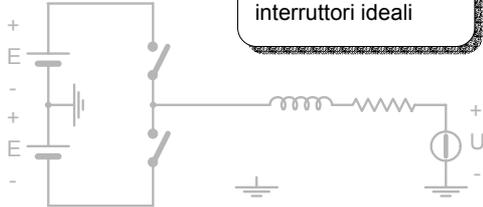
**Stati dell'invertitore**

$S_1$  ON  $S_2$  OFF  $\rightarrow V = +E$   
 $S_1$  OFF  $S_2$  ON  $\rightarrow V = -E$

$S_1$  OFF  $S_2$  OFF  $\rightarrow V$  dipende dal segno di  $I$   
 $S_1$  ON  $S_2$  ON  $\rightarrow$  NON AMMESSA

Invertitore di tensione a due livelli

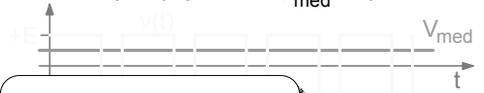
Rappresentazione con interruttori ideali



La modulazione PWM verrà studiata con riferimento a interruttori ideali

Modulazione PWM a due livelli

$$\delta > 0.5 \rightarrow V_{med} > 0$$



Nella modulazione PWM, variando il duty cycle  $\delta$  si varia il valore medio della tensione di uscita

Modulazione PWM a due livelli

$$\delta > 0.5 \rightarrow V_{med} > 0$$



$$V = V_{med} = (2 \delta - 1) E$$

Modulazione PWM a due livelli

$$\delta < 0.5 \rightarrow V_{med} < 0$$



$$V = V_{med} = (2 \delta - 1) E$$

Modulazione PWM a due livelli

Nel complesso, variazioni del "duty cycle" (fattore di utilizzazione)  $\delta$  da 0 a 1 generano una tensione media di uscita V variabile fra -E e +E

$$V = V_{med} = (2 \delta - 1) E$$

Si ottiene  $V=0$  con  $\delta=0.5$

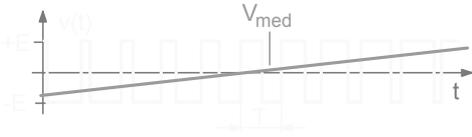
Modulazione PWM a due livelli

La PWM consente di far seguire a  $V_{med}$  una forma d'onda  $V^*$  assegnata, mediante variazioni nel tempo del valore di  $\delta$ :

$$V = V_{med} = (2 \delta(t) - 1) E$$

Modulazione PWM a due livelli

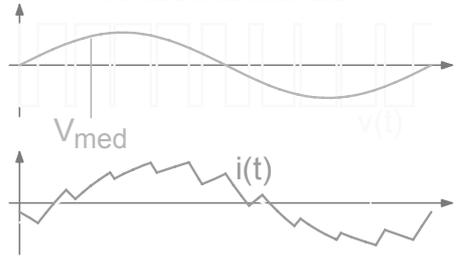
Tensione di uscita variabile



$$V = V_{med} = (2 \delta(t) - 1) E$$

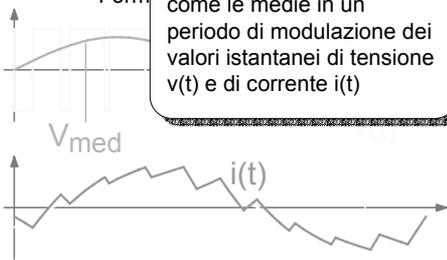
Modulazione PWM a due livelli

Forma d'onda sinusoidale



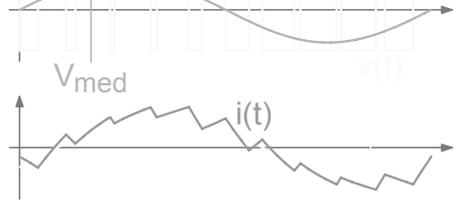
Modulazione  
Forma

$V_{med}$  e  $I_{med}$  sono definite come le medie in un periodo di modulazione dei valori istantanei di tensione  $v(t)$  e di corrente  $i(t)$



Modulazione PWM a due livelli

L'ondulazione di corrente intorno a  $I_{med}$  è ridotta dall'azione filtrante del carico



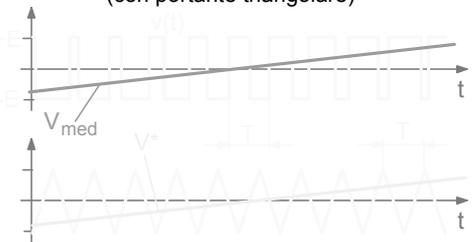
Modulazione PWM a due livelli

La generazione dei segnali di comando con il duty cycle  $\delta(t)$  corrispondente ad una forma d'onda di riferimento  $V^*$  può essere fatta per via analogica o per via digitale

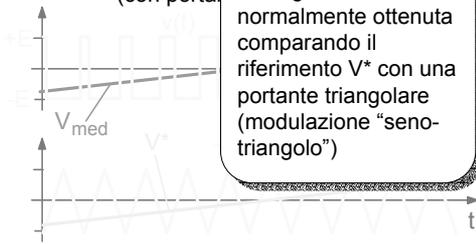


Modulazione PWM a due livelli

Modulazione analogica  
(con portante triangolare)



Modulazione PWM  
Modulazione analogica  
(con portante triangolare)



La modulazione analogica è normalmente ottenuta comparando il riferimento  $V^*$  con una portante triangolare (modulazione "seno-triangolo")

Modulazione PWM a due livelli  
Modulazione analogica: schema a blocchi

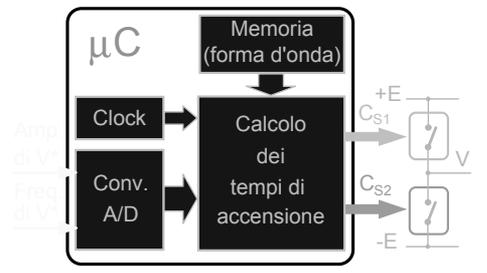


Modulazione PWM  
Modulazione digitale

La modulazione digitale calcola direttamente gli istanti di commutazione, e quindi le durate di conduzione degli interruttori, a partire dalla forma d'onda di riferimento, di solito memorizzata in forma numerica



Modulazione PWM a due livelli  
Modulazione digitale a microcontrollore



Modulazione PWM a due livelli

L'utilizzo di microcontrollori o di circuiti integrati dedicati (ASIC) consente una realizzazione compatta del controllo digitale

Modulazione PWM a due livelli

L'utilizzo di microcontrollori o di circuiti integrati dedicati (ASIC) consente una realizzazione compatta del controllo digitale

Secondo la tendenza attuale, si preferisce il controllo digitale per la sua affidabilità, per l'assenza di procedure di taratura e per la facilità di aggiornare il controllo senza modificare il circuito

### Modulazione ad onda quadra

Quando la frequenza di modulazione diventa prossima a quella della  $V^*$  da generare (pochi impulsi per periodo) il filtraggio del carico si riduce e la forma d'onda della corrente è molto distorta

### Modulazione ad onda quadra

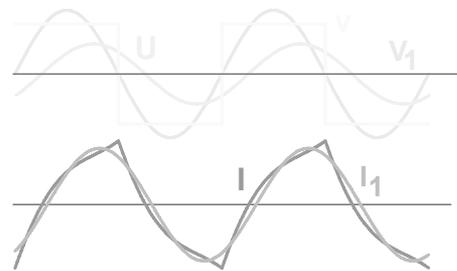
Quando la frequenza di modulazione diventa prossima a quella della  $V^*$  da generare (pochi impulsi per periodo) il filtraggio del carico si riduce e la forma d'onda della corrente è molto distorta

In alcuni casi le deformazioni sono accettabili. La PWM può consentire ancora di regolare l'ampiezza della componente fondamentale della tensione

### Modulazione ad onda quadra

Con un solo impulso per periodo (modulazione ad onda quadra) l'ampiezza della componente fondamentale della tensione generata è fissa e se ne può regolare soltanto la frequenza

### Modulazione ad onda quadra



### Componenti attivi usati negli invertitori

Gli invertitori attuali usano componenti controllati in spegnimento

### Componenti attivi usati negli invertitori

Gli invertitori attuali usano componenti controllati in spegnimento

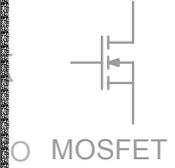
Solo per grossissime potenze e in vecchie costruzioni sono ancora usati invertitori a SCR

## Componenti attivi usati negli invertitori

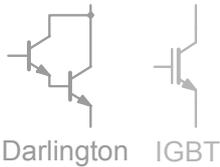


## Componenti attivi usati negli invertitori

I MOSFET sono quasi esclusivamente usati per piccole potenze, elevate frequenze di commutazione ed applicazioni economiche alimentate dalla rete a 220V



## Componenti attivi usati negli invertitori



I transistori darlington di potenza sono stati quasi completamente soppiantati dagli IGBT

Per le potenze medie/grandi (10-200 kW) si usano prevalentemente IGBT



## Componenti attivi usati negli invertitori

I GTO sono SCR dotati di capacità di spegnimento. Si usano normalmente per grandi/grandissime potenze (molti MW)



## Componenti attivi usati negli invertitori

In applicazioni di media potenza si usano spesso moduli comprendenti una o più unità IGBT-DIODO già connessi secondo gli schemi degli invertitori

### Componenti attivi usati negli invertitori

In applicazioni di media potenza si usano spesso moduli comprendenti una o più unità IGBT-DIODO già connessi secondo gli schemi degli invertitori

Si stanno presentando sul mercato moduli comprendenti anche la circuiteria di comando, che sono convenienti sia dal punto di vista della facilità di realizzazione sia per la maggiore affidabilità

### Componenti attivi usati negli invertitori

In applicazioni di media potenza si usano spesso moduli comprendenti una o più unità IGBT-DIODO già connessi secondo gli schemi degli invertitori

Si stanno presentando sul mercato moduli comprendenti anche la circuiteria di comando, che sono convenienti sia dal punto di vista della facilità di realizzazione sia per la maggiore affidabilità

Come alternativa ai GTO sono in fase di sviluppo IGBT adatti all'impiego fino a qualche MW