

Sistemi Elettronici per Automazione e Robotica



4 PWM switching converters, AC/DC

Prof. Sergio Saponara

DII, Università di Pisa

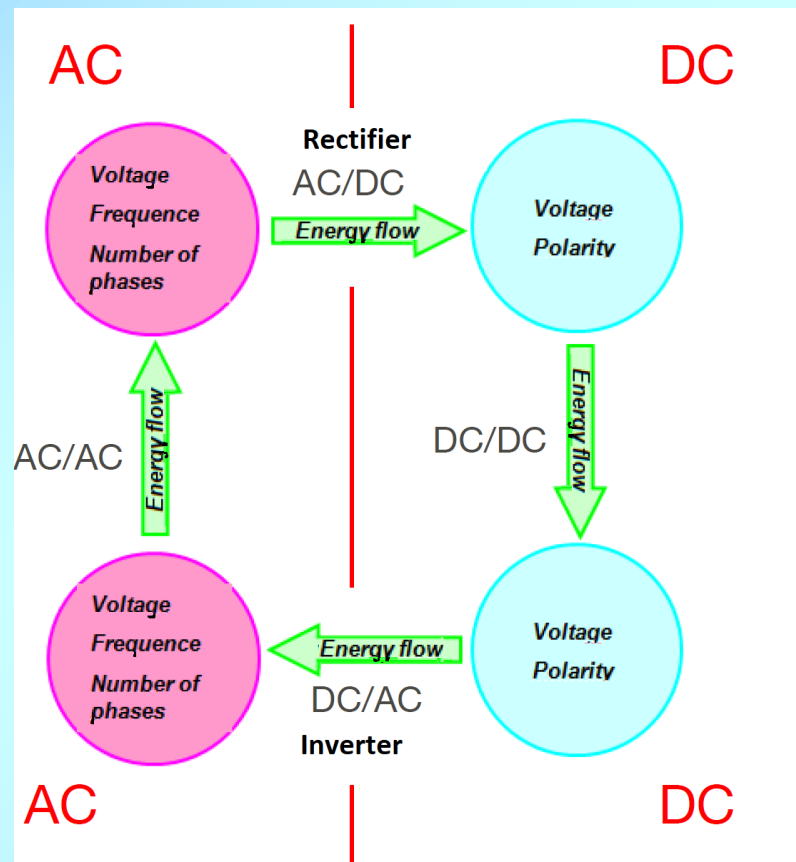
sergio.saponara@unipi.it

AGENDA

- Principi di conversione della potenza
- Generazione segnali PWM
- Convertitori AC/DC

Principi di conversione della potenza

4 tipi di convertitori: AC/AC, AC/DC, DC/AC, DC/DC per modificare livelli di tensione (corrente), polarità (i.e. segno), frequenza, numero delle fasi



Principi di conversione della potenza

4 tipi di convertitori: AC/AC, AC/DC, DC/AC, DC/DC per modificare livelli di tensione e/o corrente, polarità (i.e. segno), frequenza, numero delle fasi

Convertitori di potenza sono necessari per adattare sorgente (e.g. 50 Hz AC mono o trifase da rete elettrica, AC da macchina elettrica che funziona da generatore, DC da batterie,...) a sistema di accumulo e carico (e.g. DC nel caso di ECUs e sensori, DC o AC mono o trifase nel caso si attuatori, DC nel caso di energy storage su batterie)

Più convertitori di tipi diversi possono essere combinati tra loro

Applicazioni 1

- **CONVERTITORI SWITCHING DA ALTERNATA A CONTINUA:**
CONVERTITORI AC-DC

(es. Alimentazione e controllo dei motori a corrente continua a partire da sorgente in alternata;

on-board charger di batterie in DC ricaricate da sorgenti in AC)

- **CONVERTITORI SWITCHING DA CONTINUA AD ALTERNATA: CONVERSIONE DC-AC (INVERTER)**

(es. usati per variazione della velocità dei motori a corrente alternata a partire da sorgente di potenza in continua, es pacco batteria in full Electric Vehicle)

Applicazioni 2

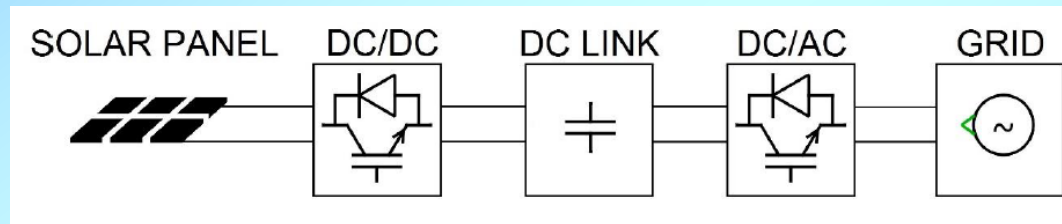
- **CONVERSIONE AC/AC** si può fare con trasformatori (polarità e ampiezza di tensione/corrente, ma a parità di frequenza). Per conversione AC/AC con cambio di frequenza si può ricorrere a cascata convertitori switching AC/DC e poi DC/AC

CONVERTITORI SWITCHING DC/DC

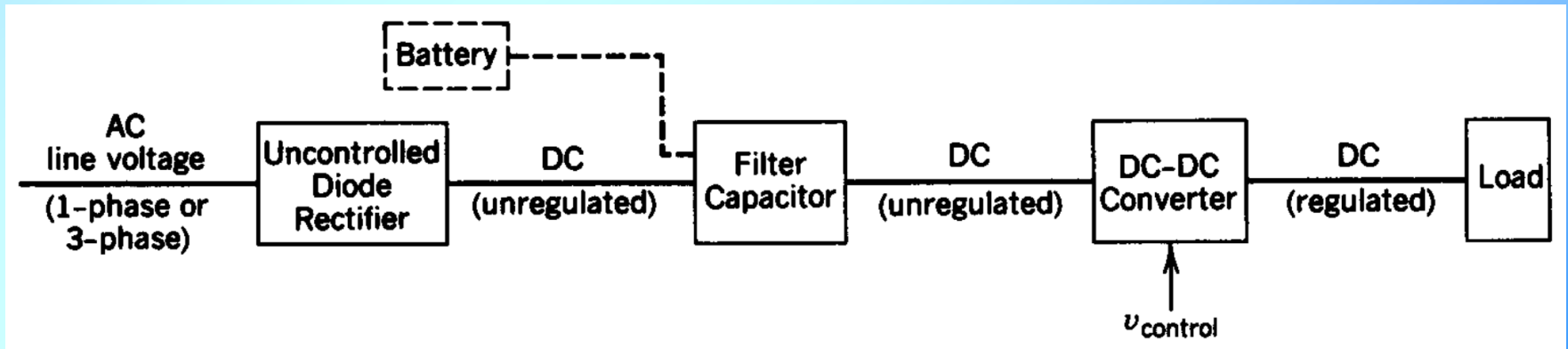
(tra domini diversi in continua, es. 48V/12V in veicolo ibrido, 400V/48V/12V in full Electric)

Principi di conversione della potenza

Esempio di cascata di un DC/DC e successivo DC/AC per accumulare su una batteria o supercap potenza da pannello fotovoltaico e poi re-immetterlo in AC in rete



Esempio di cascata di un AC/DC, filtro e successiva DC/DC per alimentare un carico (es. ECUs con sensori, processori, memorie) a partire da una sorgente in AC mono o trifase



Principi di conversione della potenza

Basse potenze → **regolatori DC/DC lineari** che hanno vantaggio di essere semplici e integrabili e non richiedere induttanze o controlli complessi (es alimentare MCU a 3V a partire da alimentazione di scheda a 5 V)

Efficienza massima teorica limitata a V_{out}/V_{in} (qui $I_n = I_{out}$), usati essenzialmente come point of load per regolare tensione di alimentazione finale a carichi di bassa potenza

V_{out} è sempre minore di V_{in} (step-down)

Siccome si usano spesso con V_{out} vicina a V_{in} per non avere bassa efficienza si parla anche di **regolatori LDO** (Low Drop Out)

Per le applicazioni che richiedono **medie-alte potenze o alta efficienza energetica** si usano **convertitori switching**

Efficienza massima teorica del 100%

Richiedono uso di induttanze e controlli più complessi

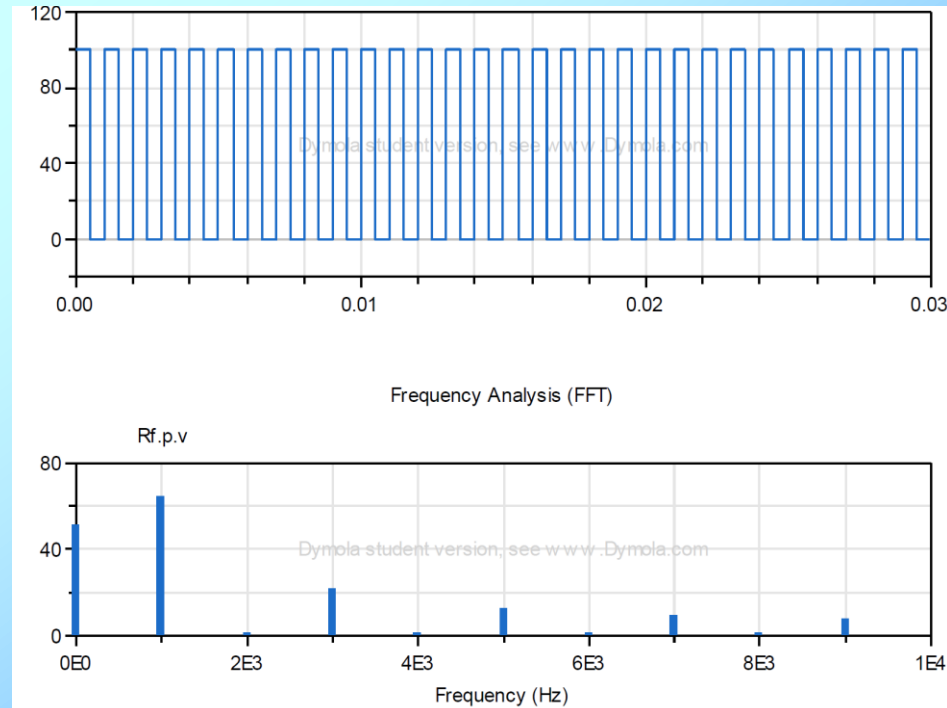
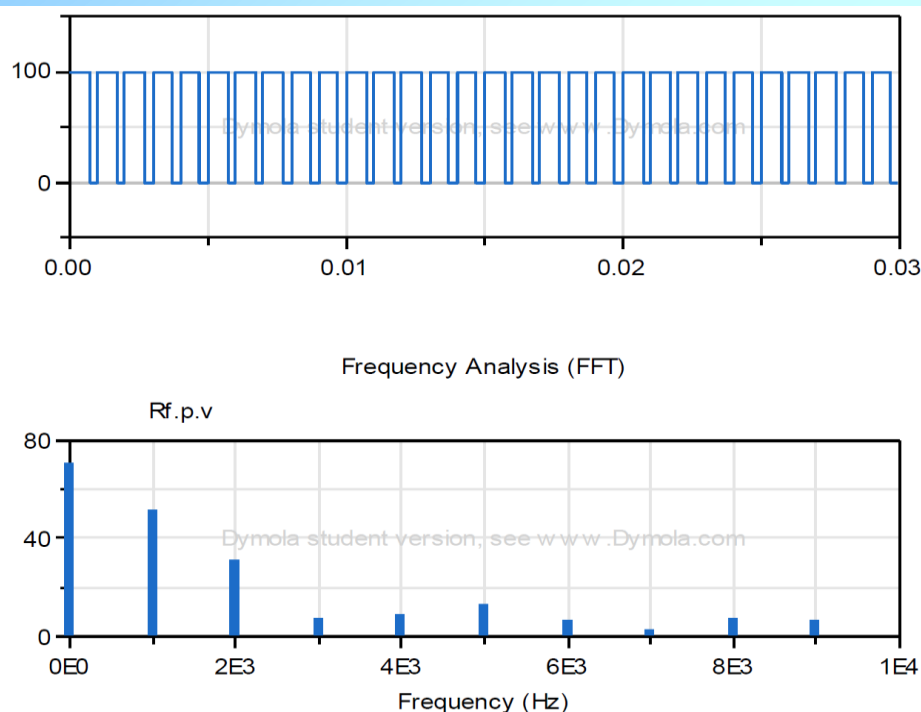
AGENDA

- Principi di conversione della potenza
- Generazione segnali PWM
- Convertitori AC/DC

Modulazione PWM

Andamenti nel tempo e in frequenza di segnali PWM (2 livelli) con stessa frequenza di switching $T_s = T_{on} + T_{off} = 1$ ms, Livelli fissi $V_L = 0$, $V_H = 100$ (normalizzato), duty cycle: SX 0.7 ($T_{on} = 0.7$ ms, $T_{off} = 0.3$ ms), DX 0.5 ($T_{on} = T_{off} = 0.5$ ms)

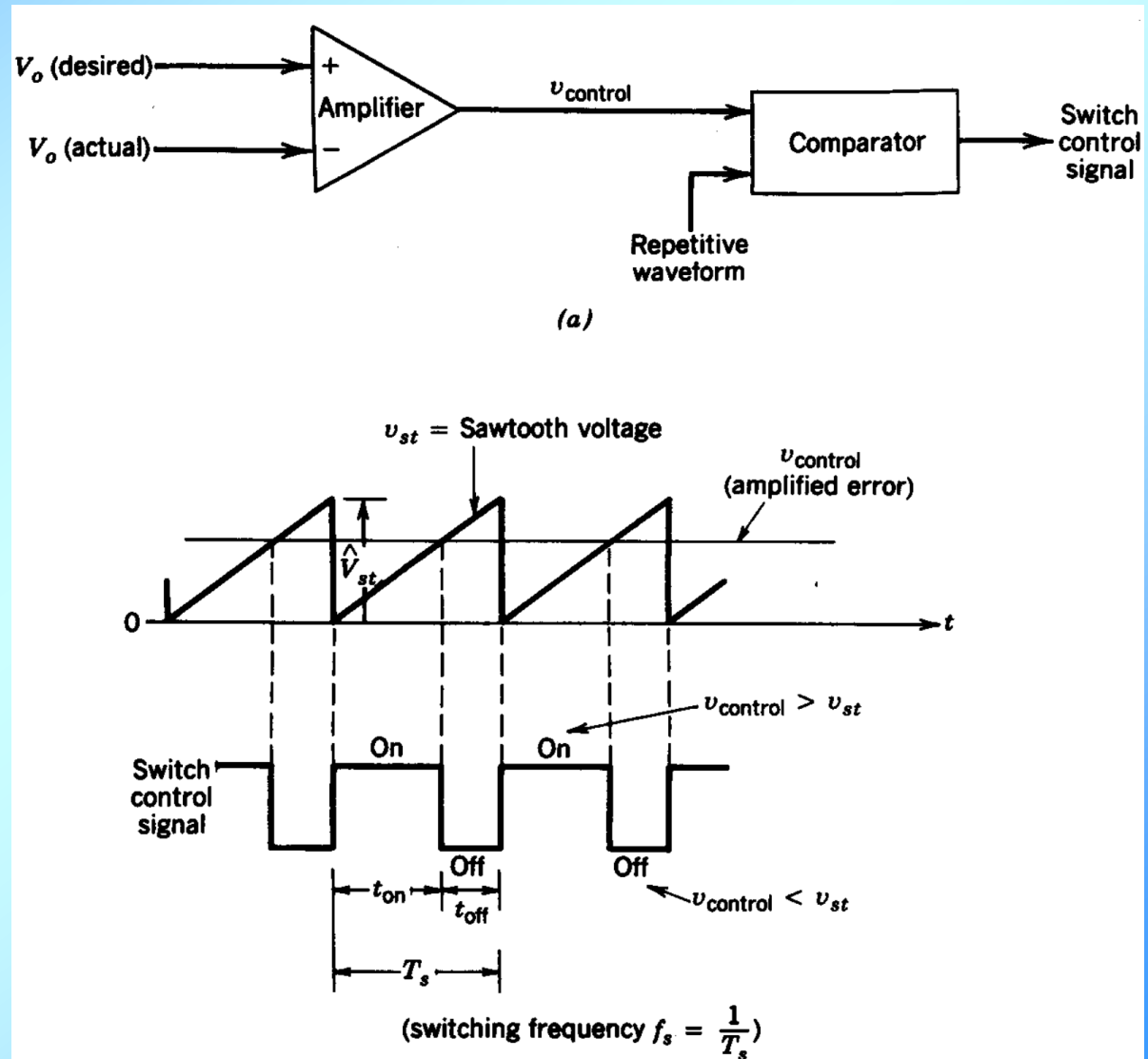
Per entrambi in frequenza fondamentale è a 1kHz, la continua (0Hz) è $(T_{on} \cdot V_H + T_{off} \cdot V_L) / T_s = 70$ a SX e 50 a DX



Generazione segnale PWM

Se segnale di riferimento è costante allora duty-cycle è costante.

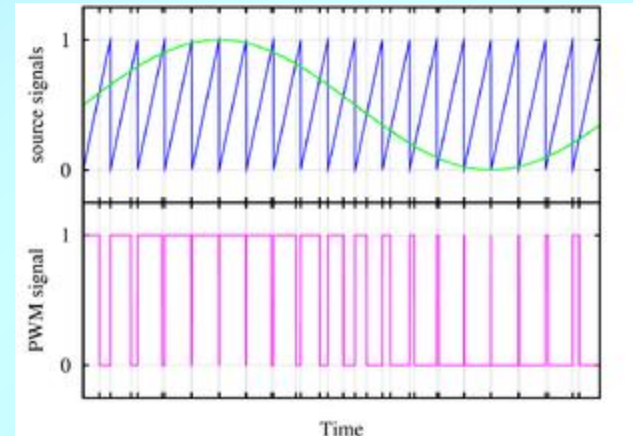
Frequenza è fissata da onda di riferimento (di solito un dente di sega)



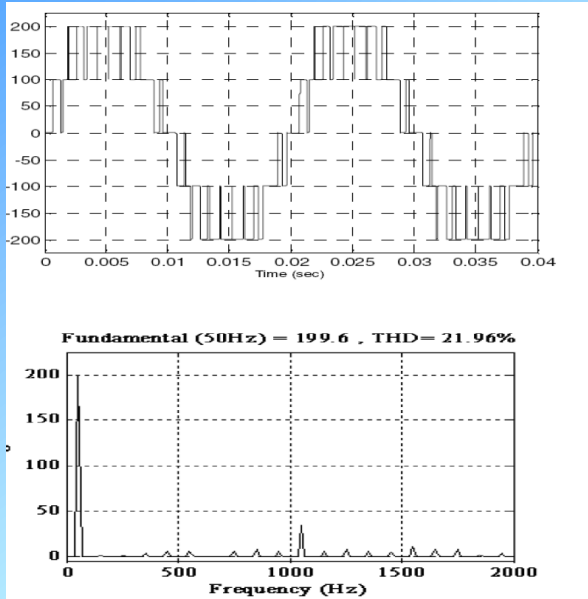
Generazione segnale PWM

Se segnale di riferimento è variabile con banda massima B (es. una sinusoide) allora duty-cycle è variabile e suo valore è proporzionale ad ampiezza segnale di riferimento.

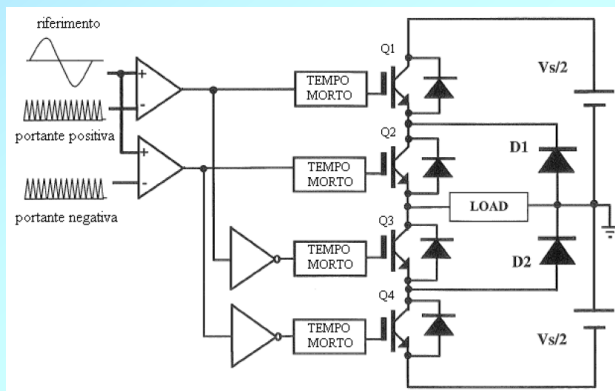
Infatti modulazione PWM si ottiene confrontando il segnale di ingresso con un segnale a dente di sega di frequenza $> 10 \cdot B$



PWM multi-livello



Esempio PWM 5 livelli nel tempo e in frequenza, con $T_s=1$ ms in applicazione DC/AC con AC uscita a 50 Hz (si noti come la portante a 1kHz è estremamente ridotta e difatti altre spurie sono praticamente cancellate)



Circuito che realizza modulazione multilivello riportata

Pro/contro convertitori PWM multi-livello

VANTAGGI

- 1) Consentono di superare i limiti sulle tensioni massime applicabili al sistema di conversione, altrimenti imposti dai valori massimi applicabili ai singoli dispositivi di potenza utilizzati (e.g. permettono la realizzazione di apparati che possono essere collegati alle reti di distribuzione in media tensione senza l'interposizione di trasformatori, oppure alimentare grandi macchine elettriche rotanti di decine e centinaia di kW)
- 2) Danno luogo ad una considerevole riduzione sia del contenuto armonico nelle grandezze elettriche in uscita e in ingresso, sia della frequenza di commutazione dei dispositivi a semiconduttore impiegati. Infatti, le tensioni presenti ai morsetti di uscita presentano forme d'onda che approssimano sinusoidi, con un basso contenuto di armoniche spurie
- 3) Ciò consente di incrementare l'efficienza e ridurre dimensioni dei filtri in uscita e/o in ingresso.

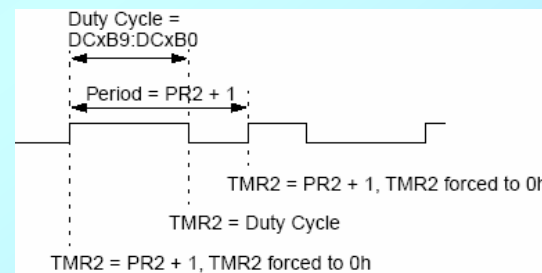
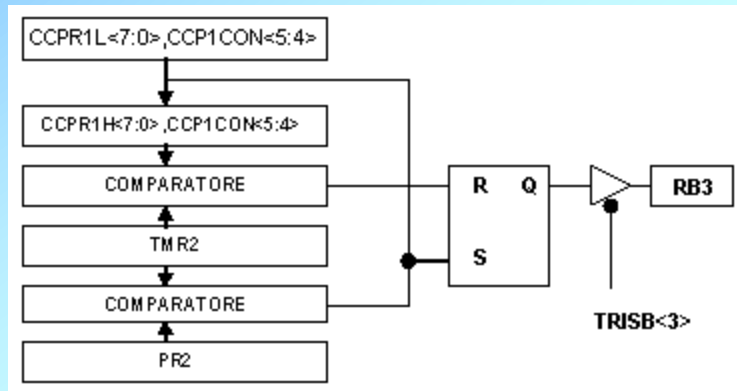
SVANTAGGI

- 1) Maggiore numero di Switch (componenti attivi)
- 2) Necessità di un controllo più sofisticato

Generazione PWM con microcontrollori digitali

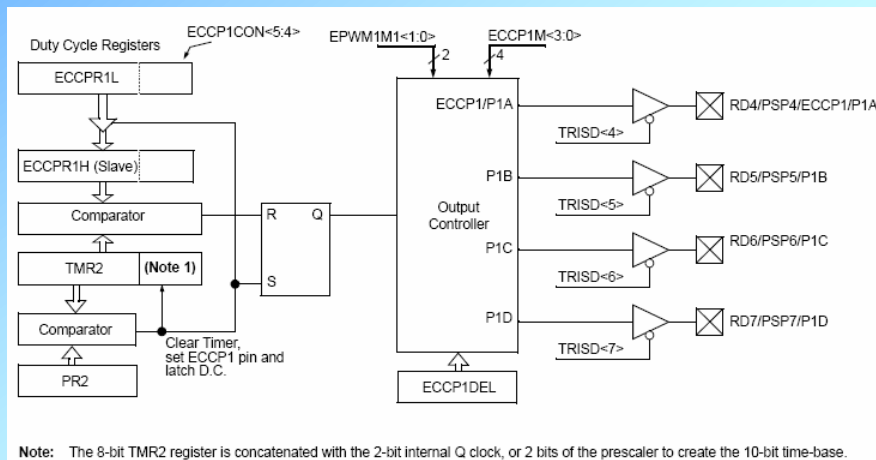
Di solito si carica il valore del duty cycle in appositi registri (es. 10 bit in microprocessori PIC16Fxx) e vengono confrontati con i numeri contati da un timer (TMR2) in modo da resettare a 1 uscita quando segnale del contatore (che emula il dente di sega analogico supera il valore del codice di riferimento). Il contatore TMR2 è periodicamente resettato una volta raggiunto un valore massimo (corrispondente alla max dinamica del segnale per duty-cycle=1) conservato nel registro PR2.

Frequenza di PWM dipende da clock del micro, prescaler del timer e da PR2.



Generazione PWM con microcontrollori digitali

Possono essere previste configurazioni con più pin di uscita dedicati ad altrettanti canali PWM (es 4 in PIC18F448). Generazione PWM viene fatta scrivendo opportuno codice SW sul microcontrollore.



INIZIALIZZAZIONE PWM MODE

```

CLRFB CCP1CON      ; CCP Module is off
CLRFB TMR2         ; Clear Timer2
MOVLW 0x7F         ;
MOVWF PR2          ;
MOVLW 0x1F         ;
MOVWF CCPR1L       ; Duty Cycle is 25% of PWM Period
CLRFB INTCON        ; Disable interrupts and clear T0IF

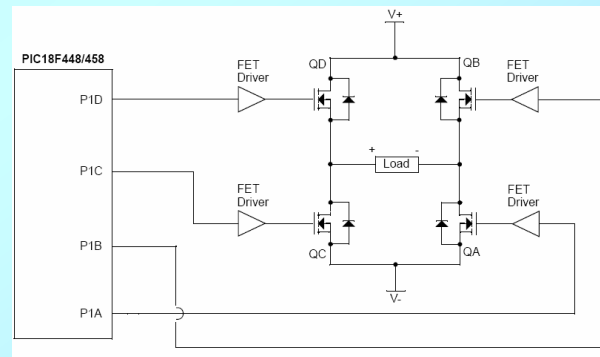
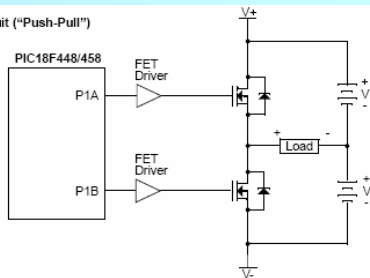
BCF TRISC, PWM1     ; Make pin output
CLRFB PIE1          ; Disable peripheral interrupts

CLRFB PIR1          ; Clear peripheral interrupts Flags
MOVLW 0x2C          ; PWM mode, 2 LSBs of Duty cycle = 10
MOVWF CCP1CON       ;
BSF T2CON, TMR2ON   ; Timer2 starts to increment

;
; The CCP1 interrupt is disabled,
; do polling on the TMR2 Interrupt flag bit
;
PWM_Period_Match
    BTFSS PIR1, TMR2IF
    GOTO PWM_Period_Match

; Update this PWM period and the following PWM Duty cycle
;
BCF PIR1, TMR2IF
    
```

Standard Half-Bridge Circuit ("Push-Pull")

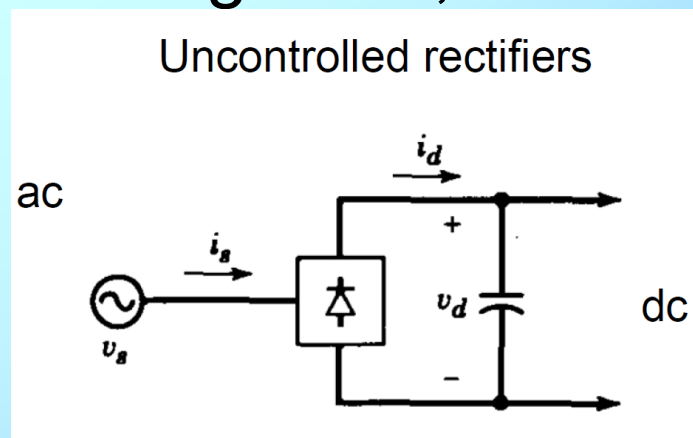


AGENDA

- Principi di conversione della potenza
- Regolatori Lineari
- Generazione segnali PWM
- Convertitori AC/DC

Convertitori AC-DC

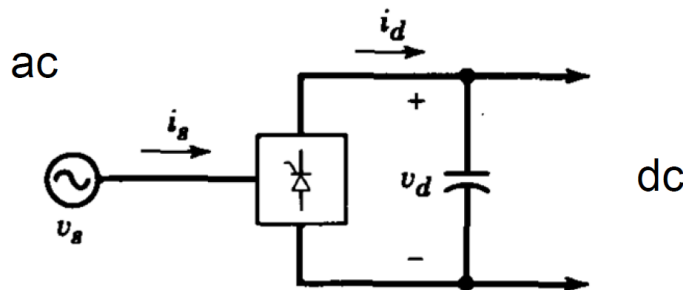
- Sono sistemi di potenza: IN = grandezza elettrica alternata (AC) e OUT = grandezza elettrica continua (DC)
- Possono essere non controllati (usano diodi), dove la conduzione del diodo dipende solo dalla polarità della tensione in ingresso, o controllati (usano SCR)



Convertitori AC-DC controllati

- IN = grandezza elettrica alternata (AC) e OUT = grandezza elettrica continua (DC) il cui livello di potenza è regolata con una variabile di controllo;
- Dispositivi più utilizzati: SCR (possono essere spenti naturalmente dal cambiamento di polarità della alimentazione alternata: “Spegnimento di linea”);

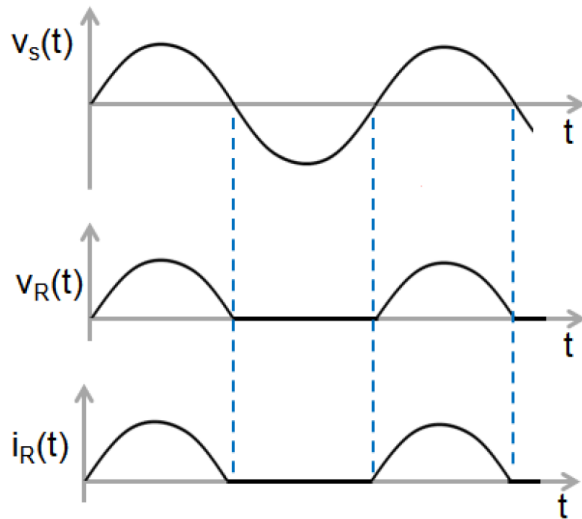
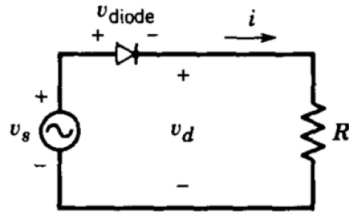
Phase-controlled rectifiers



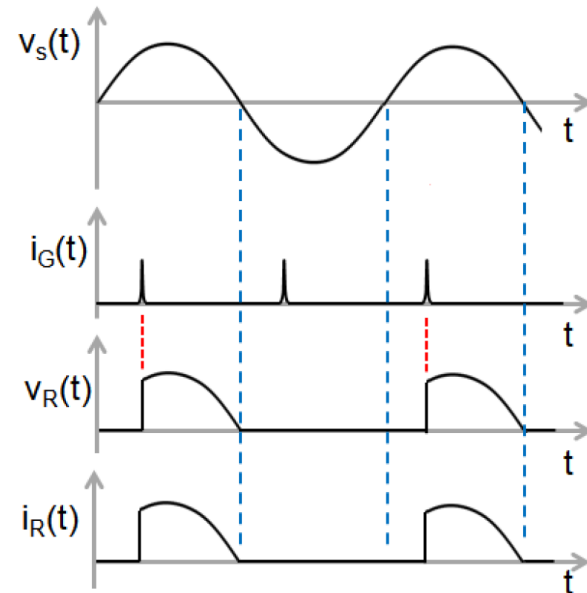
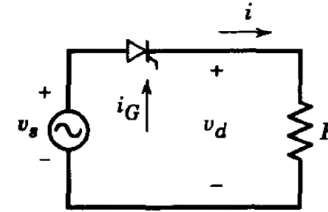
Thyristor conduction depends on V_{ak} waveform polarity and on control input pulse

Convertitori AC-DC singola semionda

Diode based

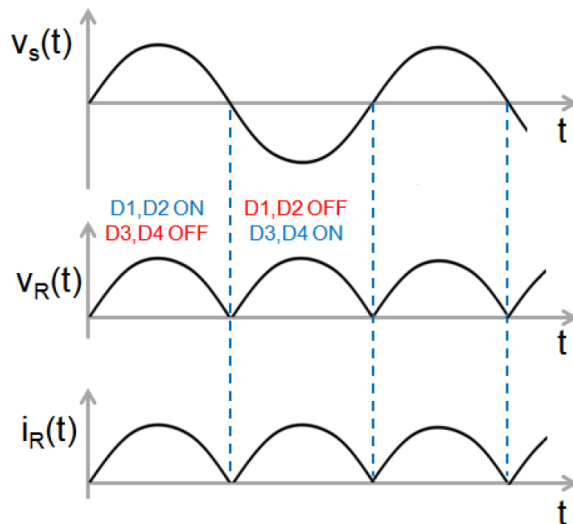
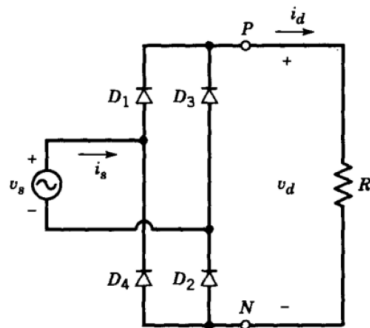


Phase-controlled

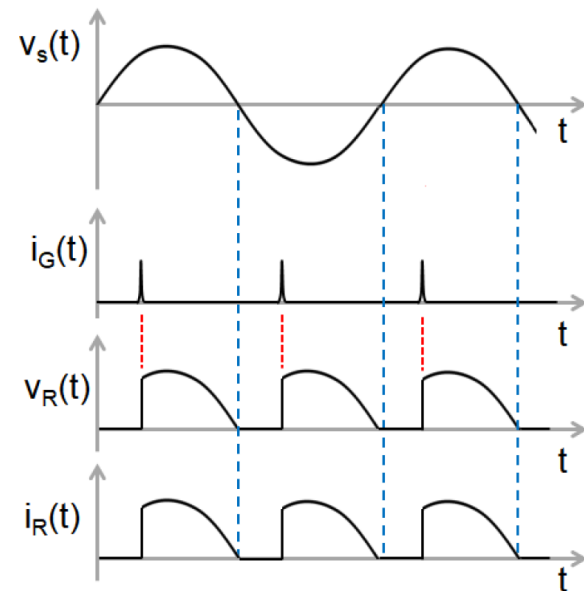
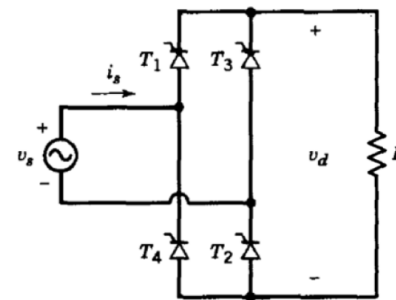


Convertitori AC-DC a ponte (doppia semionda, ponte di Graetz)

Diode based



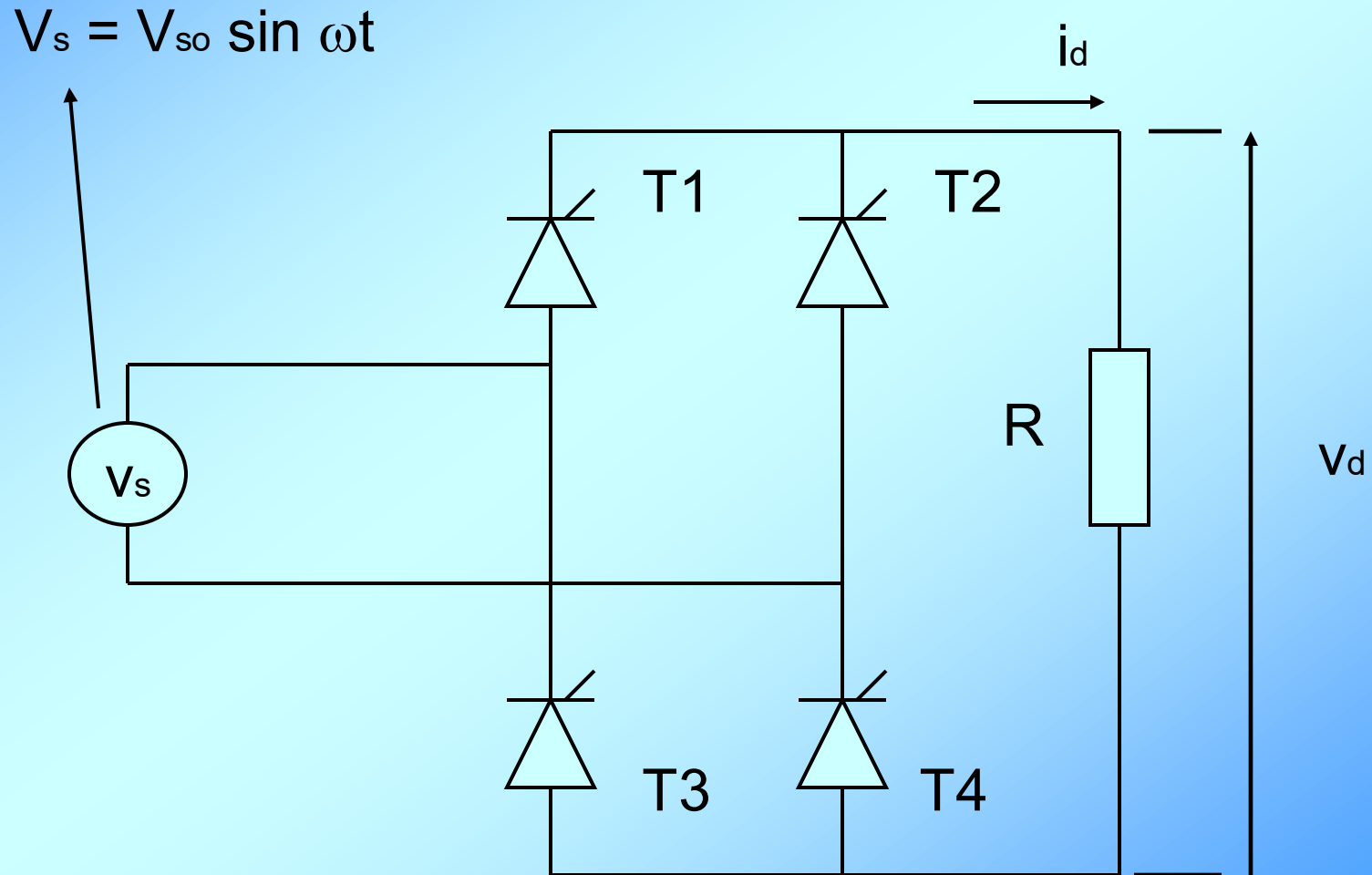
Phase-controlled



Proprietà

- Configurazione più usata: a ponte di SCR;
- Per potenze superiori a qualche kW si utilizzano sistemi trifase: nella conversione AC-DC consentono di ottenere forme d'onda più pulite in OUT (con minor contenuto armonico)
- OSS: carico = Motore Elettrico (si rappresenta con una induttanza "L", un resistore "R" e una f.c.e.m. pari ad "E")
- Convertitori con SCR (tiristori) permettono di variare il valor medio della tensione di uscita agendo sull'istante di innesco del componente

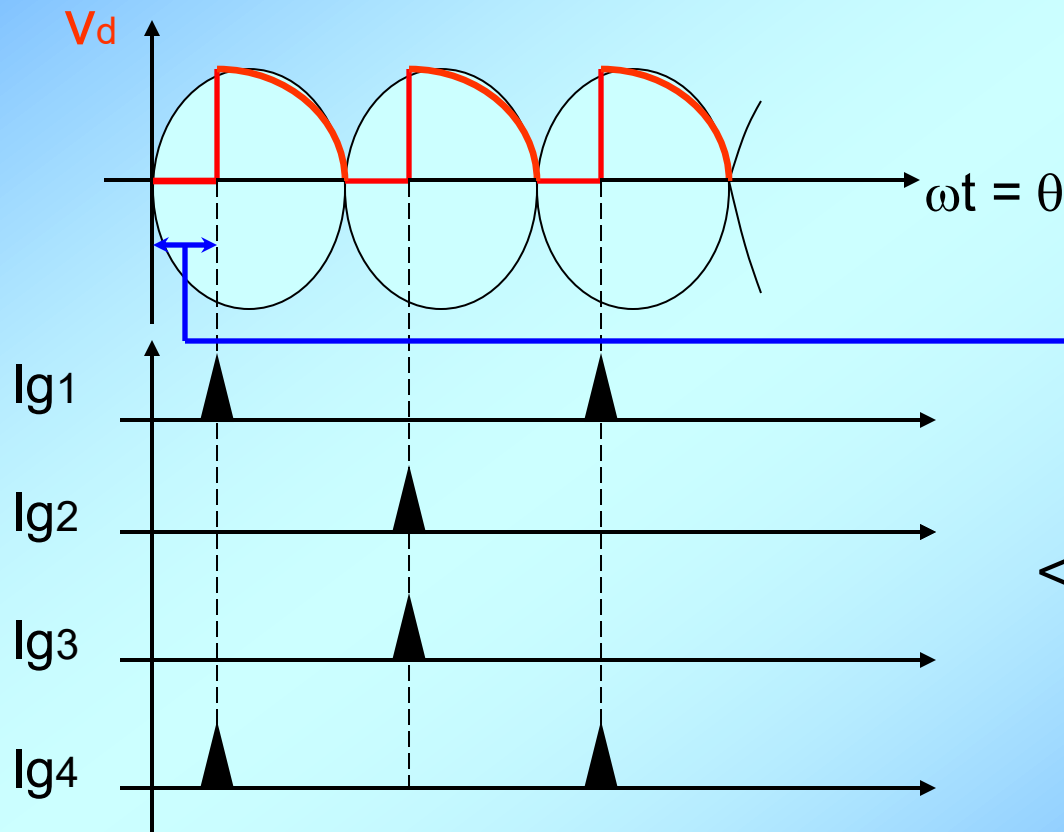
Per capire il funzionamento, si farà il caso semplice di un convertitore a ponte di SCR, con carico resistivo



FUNZIONAMENTO

$V_s > 0$: T1 e T4 sono polarizzati direttamente; si possono accendere con l'impulso di gate, mentre T3 e T4 sono polarizzati in inversa

$V_s < 0$: è il contrario del caso sopra!



Variando l'angolo di innesco, la V_d si modifica e varia, di conseguenza, la tensione media sul carico ($\langle V_d \rangle$).

α = angolo di innesco

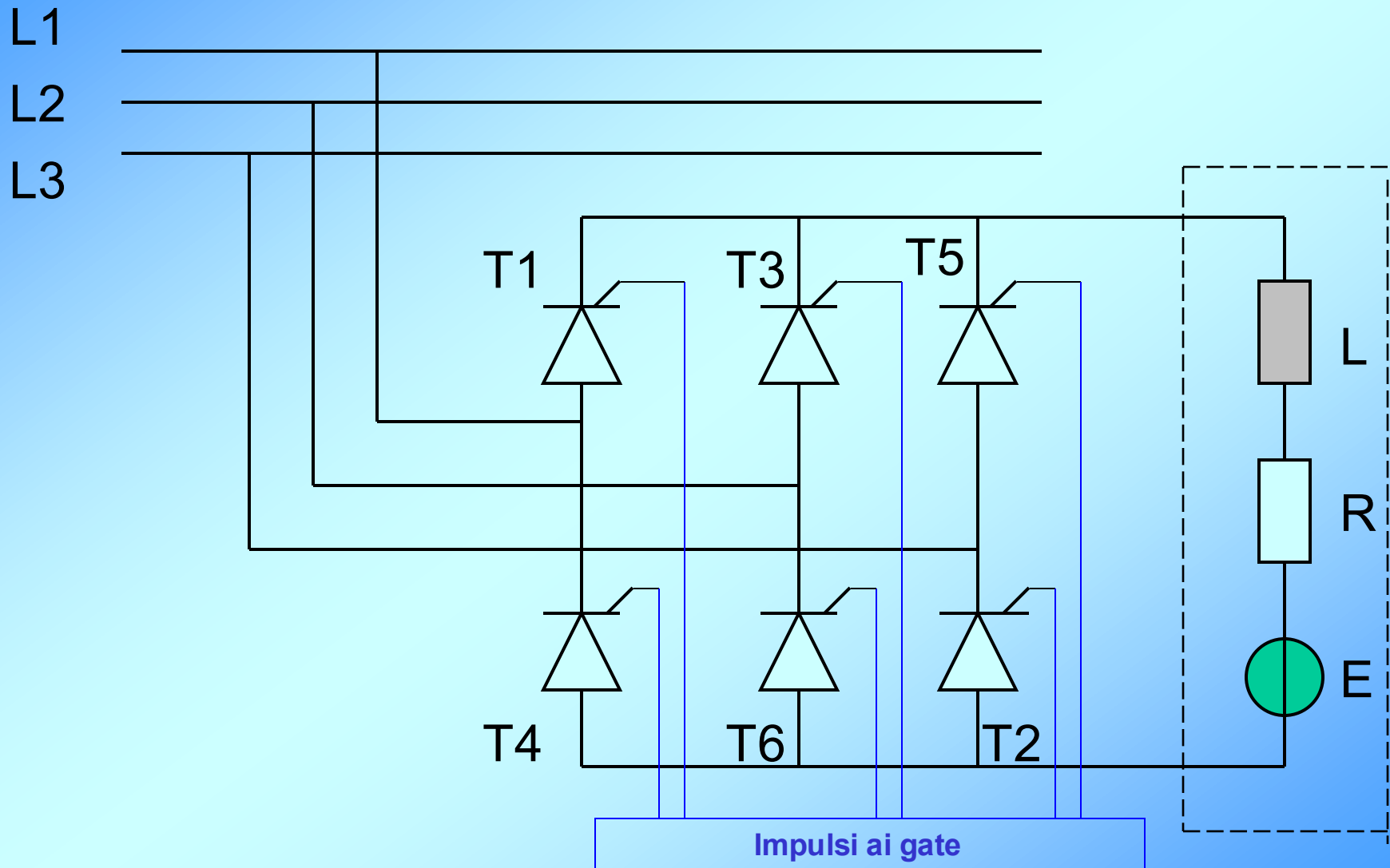
$\langle V_d \rangle$ = valor medio della V_d

$$\langle V_d \rangle = V_{so} (1 + \cos \alpha) / \pi$$

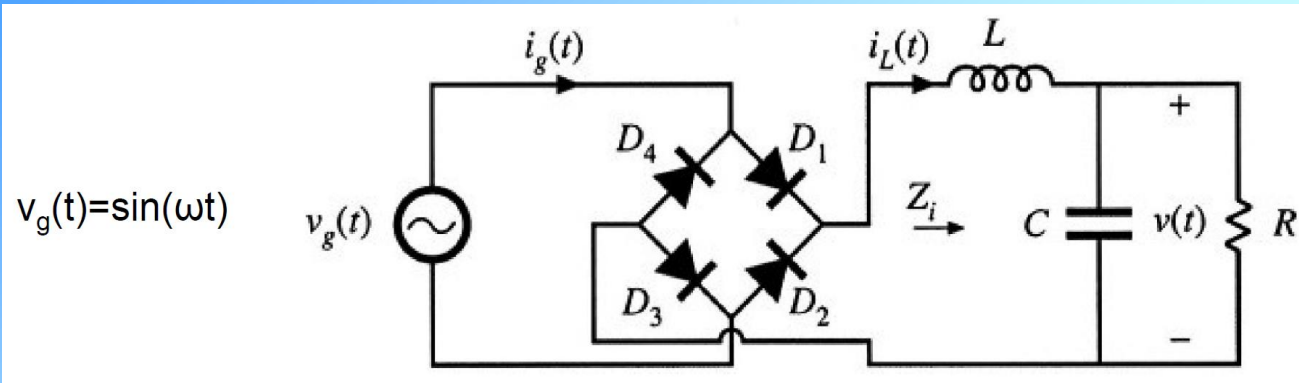
$$\langle V_d \rangle = V_{so} (1 + \cos \alpha) / \pi$$

- I valori medi dipendono da α ;
- La conduzione è discontinua per α compreso fra 0 e π ;
- Conduzione discontinua = una coppia di SCR si spegne prima che si accende l'altra coppia di SCR.

CONVERTITORI AC-DC TRIFASI



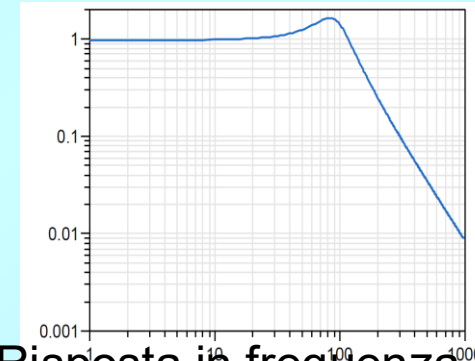
CONVERTITORI AC-DC con filtro



Finite values of L and C :

- THD decreases with increasing ω_0
- For a given ω_0 , THD is minimum at $Q \sim 1$
- $\omega_0 = 1/\sqrt{L \cdot C}$
- $Q = R \cdot \sqrt{C/L}$

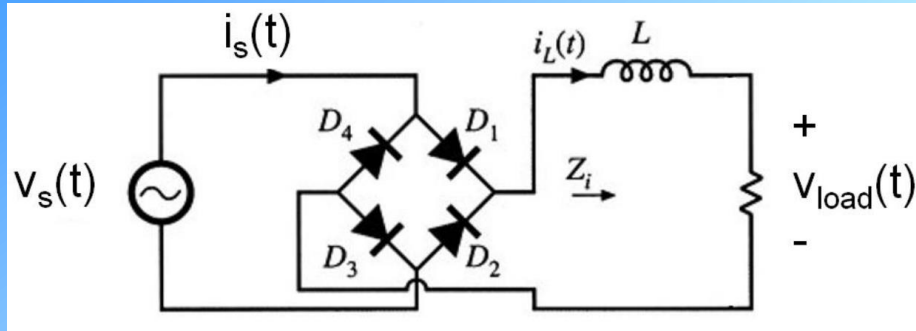
$$\text{THD} = \frac{\text{rms value of the waveform not including the fundamental component}}{\text{rms fundamental magnitude}}$$



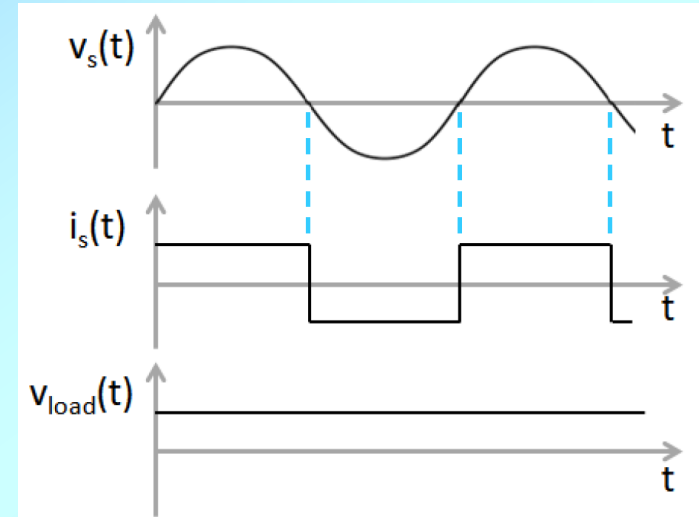
Risposta in frequenza
filtro LC (smorzato per
la R di carico), 100Hz

Sia nei convertitori AC-DC controllati (con SCR) che non (con diodi) sia singola che doppia semionda l'uso di un filtro in uscita (spesso LC, o solo C se il carico è induttivo) aiuta a reiettare armoniche spurie e ottenere una DC meno affetta da ripple (i.e. residuo di alternata)

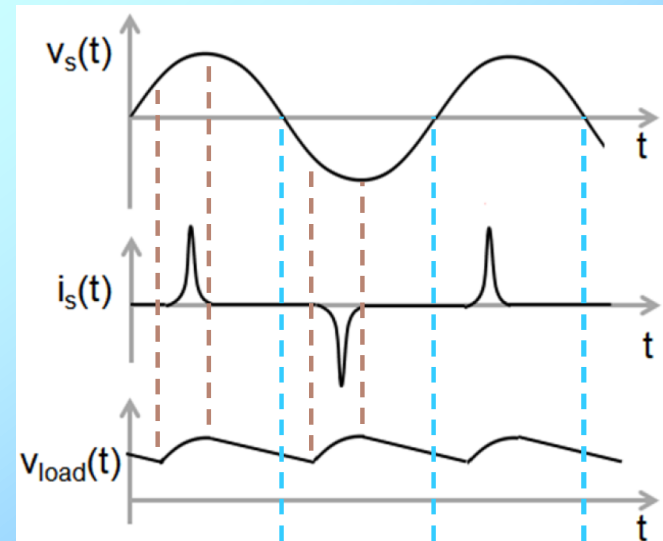
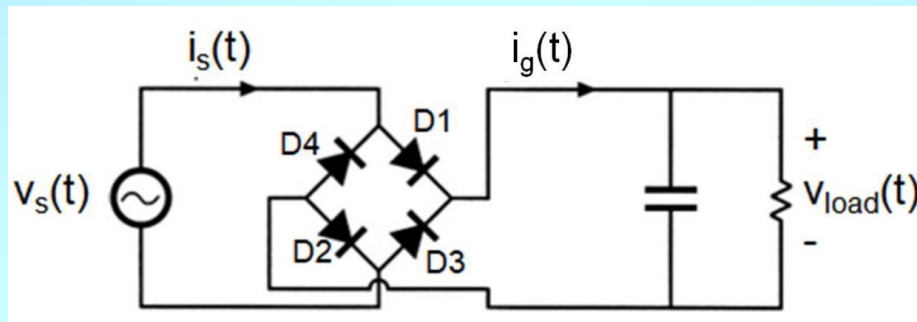
CONVERTITORI AC-DC con filtro



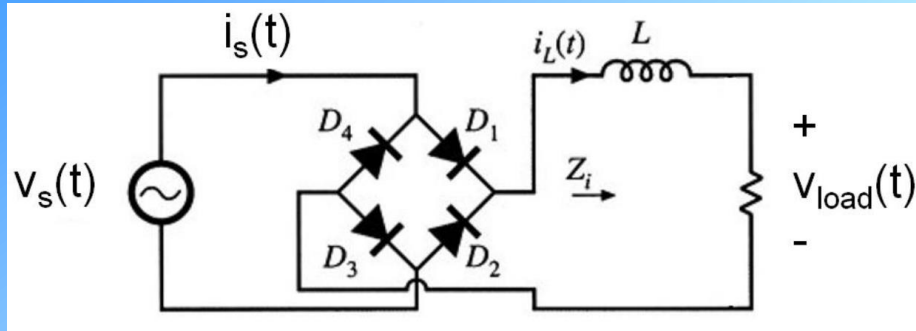
Solo con filtro induttivo



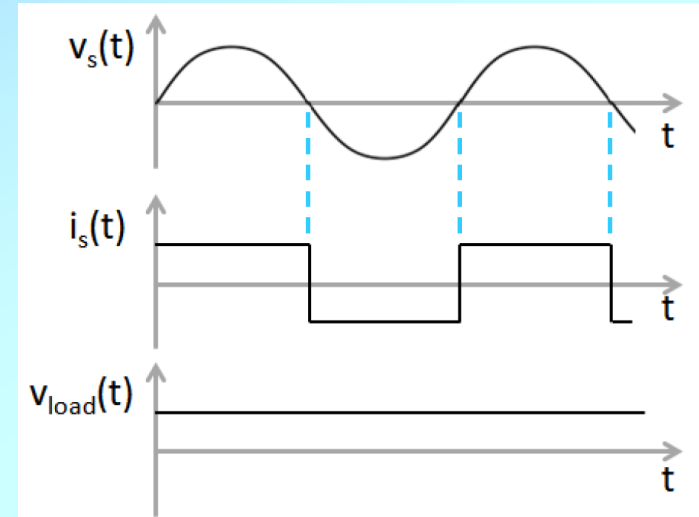
Solo con filtro capacitivo



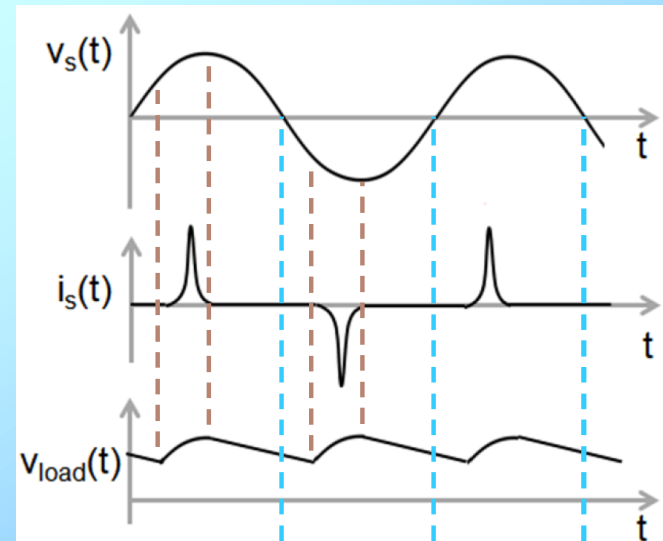
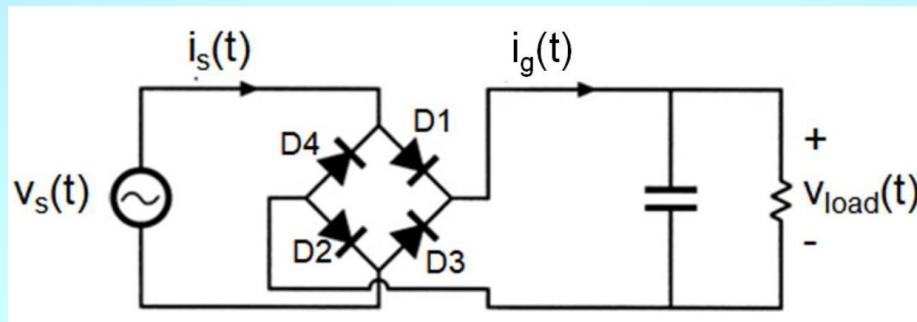
CONVERTITORI AC-DC con filtro



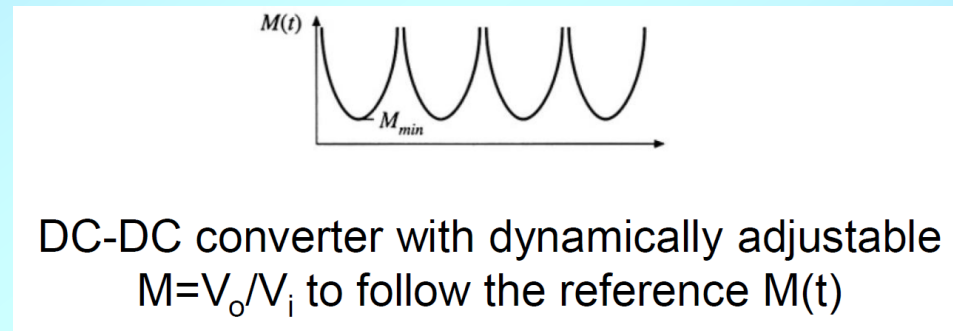
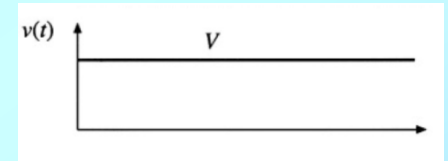
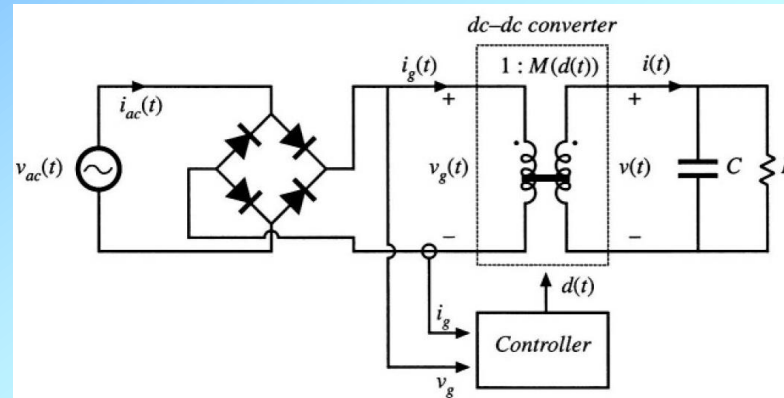
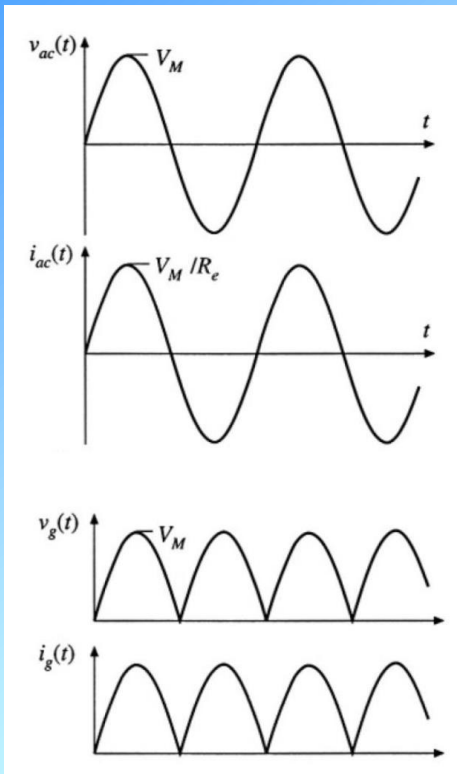
Solo con filtro induttivo



Solo con filtro capacitivo

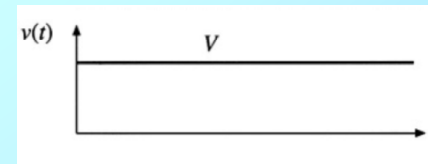
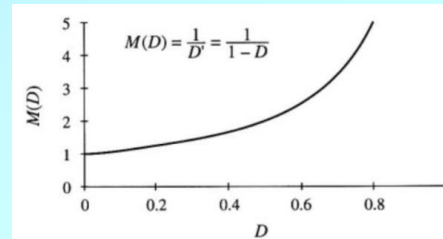
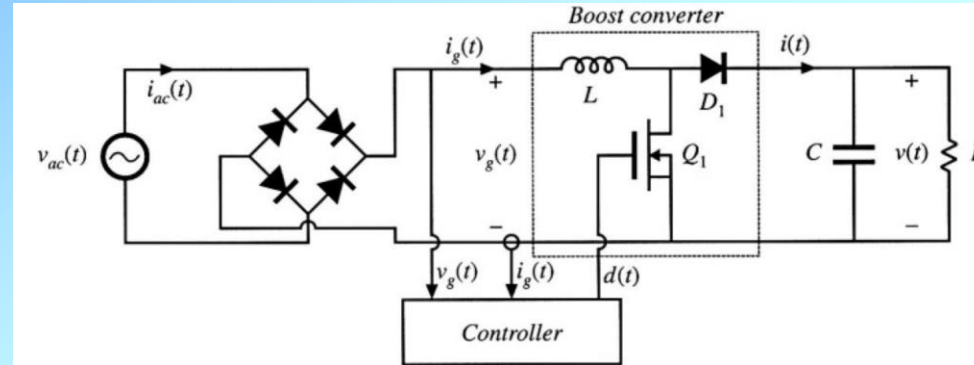
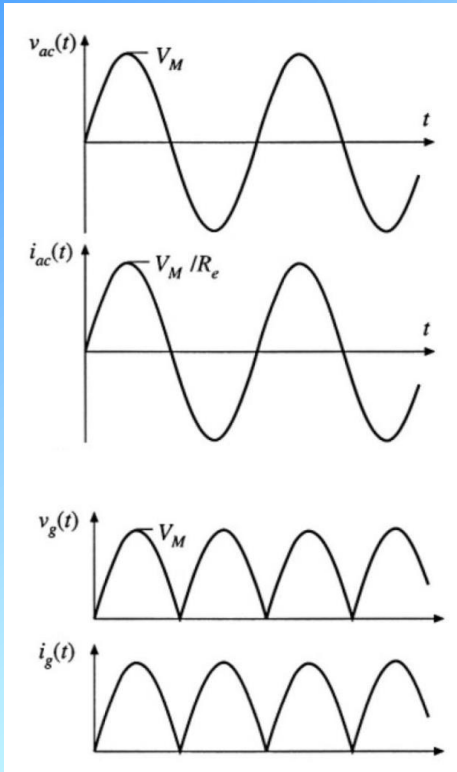


CONVERTITORI AC-DC avanzati



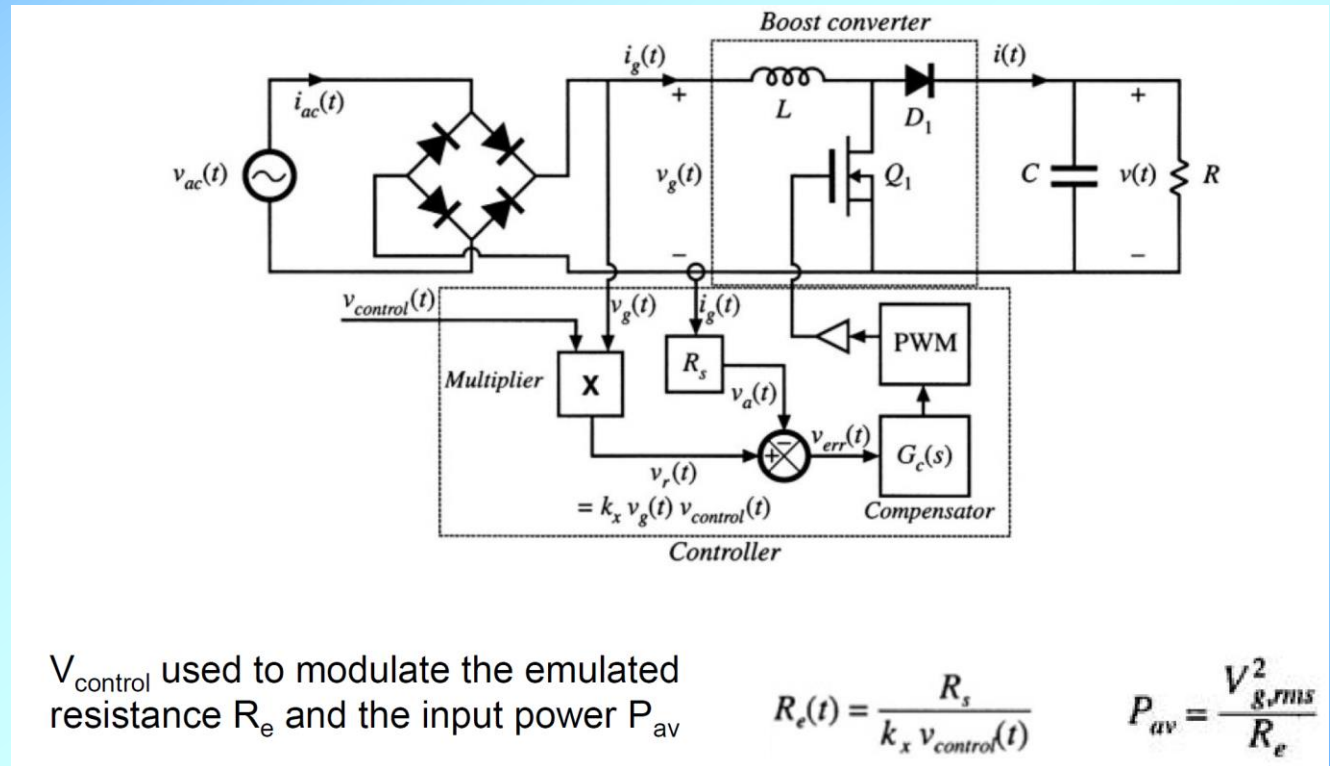
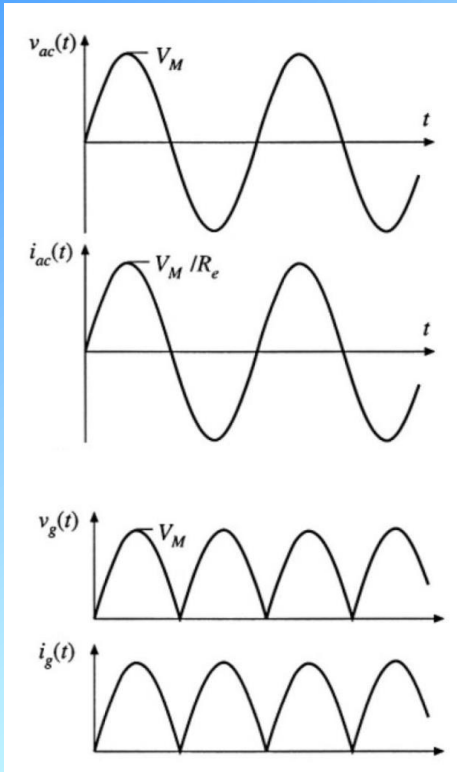
Pro) V_o/V_{ax} max. regolabile, isolamento Out-In, rete ingresso vede V_{ac} , i_{ac} e V_g , i_g rifasate in fase grazie a controllore
Con) Circuito più complesso con trasformatore

CONVERTITORI AC-DC avanzati



$M(D)$ può variare da 1 a infinito

CONVERTITORI AC-DC avanzati



→ Resistive load emulated by a control loop that force the $i_g(t)$ current waveform to follow $v_g(t)$, by dynamically adjusting $d(t)$