

Corso di  
**ELETTRONICA INDUSTRIALE**

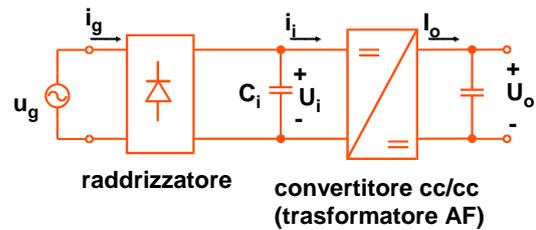
*“ Raddrizzatori con carico capacitivo.  
Impatto sulla rete e filtraggio passivo ”*

**Argomenti trattati**

- Analisi di un raddrizzatore a semionda
- Raddrizzatori a doppia semionda
- Impatto sulla rete
  - Definizione di Power Factor
  - Definizione di THD (distorsione armonica totale)
- Filtri passivi

**Impatto sulla rete di alimentazione  
in c.a. dei raddrizzatori con carico  
capacitivo**

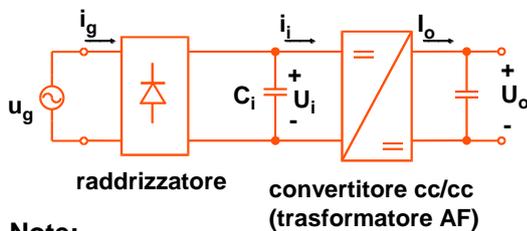
**Schema generale di un alimentatore switching**



$i_i = I_i + \Delta i_i$

$I_i$  = componente continua  
 $\Delta i_i$  = componente alternata ad AF (ripple)

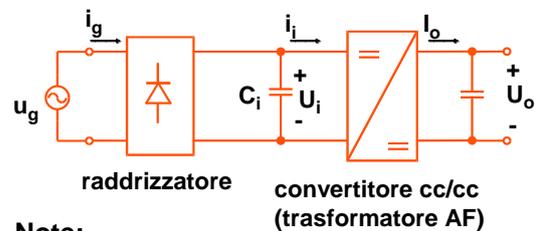
**Schema generale di un alimentatore switching**



**Note:**

- Le componenti armoniche ad alta frequenza di  $i_i$  ( $\Delta i_i$ ) vengono assorbite da  $C_i$  e non influenzano il funzionamento lato rete

**Schema generale di un alimentatore switching**

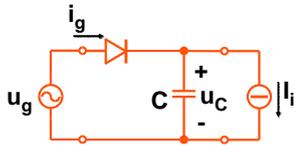


**Note:**

- Pertanto il convertitore cc/cc viene visto dal raddrizzatore come un generatore di corrente:

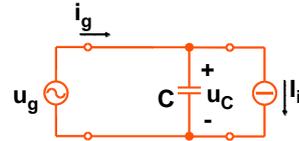
$$I_i \approx \frac{U_o \cdot I_o}{U_i}$$

Analisi di un raddrizzatore con filtro capacitivo e carico costituito da un generatore di corrente



$$u_g = \hat{U}_g \cdot \sin(\omega t)$$

**D on**



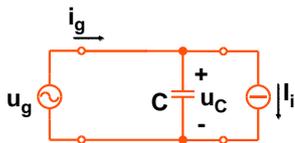
Questo modo di funzionamento inizia quando  $u_g = u_C$  e termina quando  $i_g = 0$

$$u_C = u_g \quad i_g = C \cdot \frac{du_g}{dt} + I_i = \omega C \hat{U}_g \cos(\omega t) + I_i$$

Condizione di fine:

$$i_g = 0 \Rightarrow \cos(\omega t) = \frac{-I_i}{\omega C \hat{U}_g}$$

**D on**



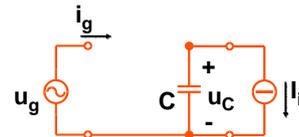
Questo modo di funzionamento inizia quando  $u_g = u_C$  e termina quando  $i_g = 0$

$$u_C = u_g \quad i_g = C \cdot \frac{du_g}{dt} + I_i = \omega C \hat{U}_g \cos(\omega t) + I_i$$

Condizione di fine:

$$i_g = 0 \Rightarrow u_C = U_2 = \hat{U}_g \cdot \sqrt{1 - \frac{I_i^2}{(\omega C \hat{U}_g)^2}}$$

**D off**

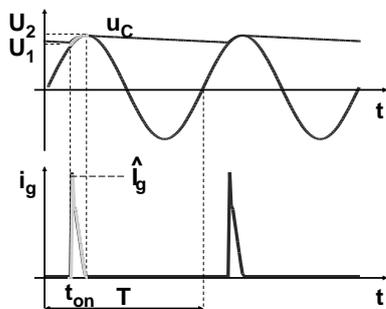


$$i_g = 0 \quad i_C = -I_i \quad u_C = U_2 - \frac{I_i}{C} \cdot t$$

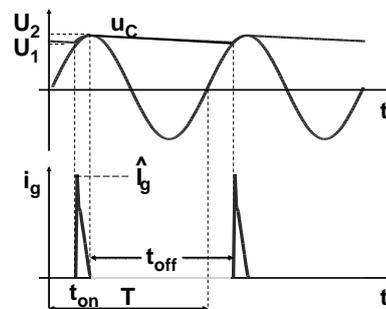
Condizione di fine:

$$u_C = u_g \Rightarrow U_2 - \frac{I_i}{C} \cdot t = \hat{U}_g \sin(\omega t) \Rightarrow u_C = U_1$$

Forme d'onda durante  $t_{on}$  (D on)

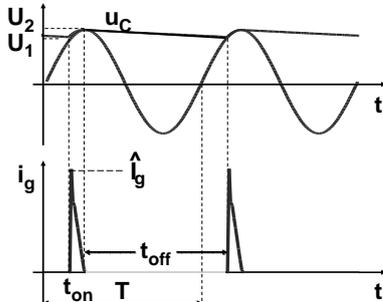


Forme d'onda durante  $t_{off}$  (D off)



### Nota

Per avere una piccola ondulazione di tensione  $\Delta U$  si sceglie C grande.



### Nota

Per avere una piccola ondulazione di tensione  $\Delta U$  si sceglie C grande.  
Ciò implica che:

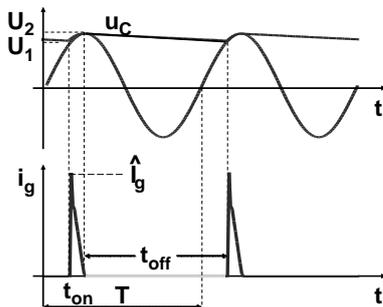
$$\omega C \hat{U}_g \gg I_i \quad (\hat{I}_g \gg I_i)$$

Allora:

$$\begin{cases} U_2 \cong \hat{U}_g \\ t_{\text{off}} \cong T \end{cases} \Rightarrow U_1 \cong \hat{U}_g - \frac{I_i}{C} \cdot T \Rightarrow \Delta U \cong \frac{I_i}{C} \cdot T$$

### Nota

Una piccola ondulazione di tensione  $u_i$  ( $\Delta U$ ) implica elevati picchi di corrente dall'alimentazione.



### Nota

Una piccola ondulazione di tensione  $u_i$  ( $\Delta U$ ) implica elevati picchi di corrente dall'alimentazione.

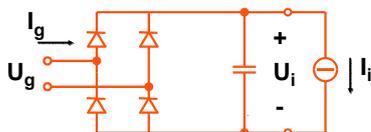
Infatti:

$$P_i = U_i \cdot I_i = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u_g \cdot i_g \, dt \cong \frac{\hat{U}_g}{T} \cdot \int_0^{t_{\text{on}}} i_g \, dt$$

Se  $t_{\text{on}}$  è piccolo occorre un elevato impulso di  $i_g$  per fornire la potenza richiesta dal carico

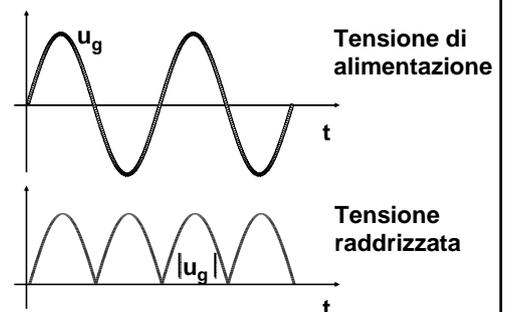
### Schema del raddrizzatore reale

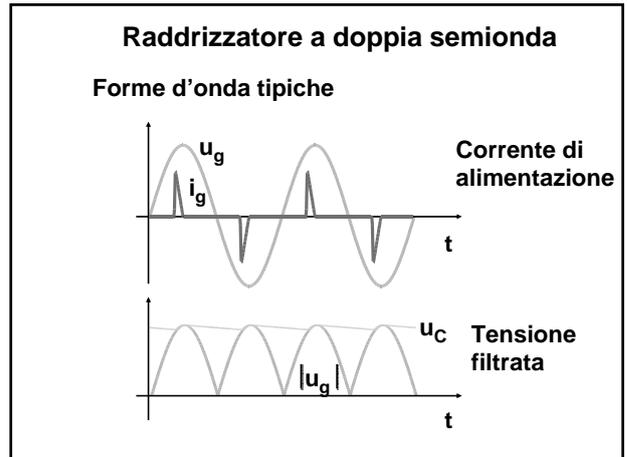
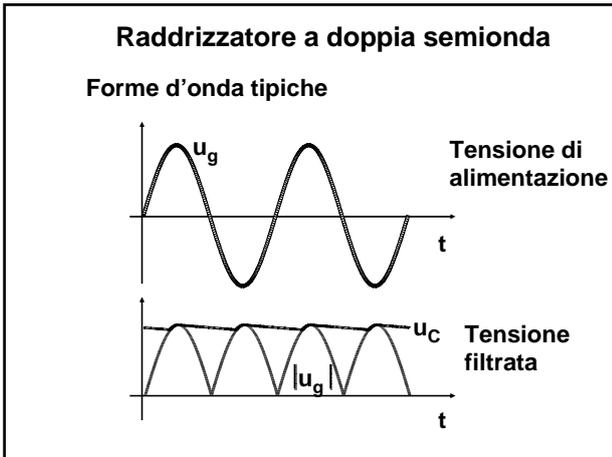
- L'assorbimento di corrente  $i_g$  unidirezionale non è ammissibile, tranne che per potenze piccolissime
- Si usa perciò un raddrizzatore a doppia semionda



### Raddrizzatore a doppia semionda

Forme d'onda tipiche





### Note

- Il funzionamento é lo stesso che nel caso del raddrizzatore a singola semionda, però:

$$\Delta U \cong \frac{1}{2} \frac{I_i \cdot T}{C}$$

- $i_g$  é alternata
- Anche in questo caso per avere bassa ondulazione di tensione occorre scegliere C elevata, causando elevati picchi di corrente

### Problema dei raddrizzatori con carico capacitivo

$i_g$  é fortemente distorta

↙

**basso fattore di potenza**

↘

**distorsione di tensione**

### Fattore di potenza (PF)

$PF = \frac{P}{S} = \frac{\text{Potenza attiva}}{\text{Potenza apparente}}$ 
→ consumo  
↘ dimensionamento

$P = U_g \cdot I_{g1} \cdot \cos \varphi_1$

$$S = U_g \cdot I_g = \frac{\hat{U}_g}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\sum_1^{\infty} I_{gn}^2} = \underbrace{U_g \cdot I_{g1}}_{S_1} \cdot \sqrt{1 + \frac{\sum_2^{\infty} I_{gn}^2}{I_{g1}^2}}$$

### Fattore di potenza (PF)

$$S = U_g \cdot I_g = \frac{\hat{U}_g}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\sum_1^{\infty} I_{gn}^2} = \underbrace{U_g \cdot I_{g1}}_{S_1} \cdot \sqrt{1 + \frac{\sum_2^{\infty} I_{gn}^2}{I_{g1}^2}}$$

$$S = S_1 \cdot \sqrt{1 + (THD)^2}$$

dove:

**THD = distorsione armonica totale di corrente**

$$\sqrt{\frac{\sum_2^{\infty} I_{gn}^2}{I_{g1}^2}}$$

### Fattore di potenza (PF)

$$P = U_g \cdot I_{g1} \cdot \cos \varphi_1 = S_1 \cdot \cos \varphi_1$$

$$S = S_1 \sqrt{1 + (\text{THD})^2}$$

$$\text{PF} = \frac{P}{S} = \frac{P}{S_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (\text{THD})^2}} = \frac{\cos \varphi_1}{\sqrt{1 + (\text{THD})^2}} =$$

$$= \cos \varphi_1 \cdot \text{DF}$$

dove:

$$\text{DF} = \text{Distortion Factor} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\text{THD})^2}} = \frac{I_{g1}}{I_g}$$

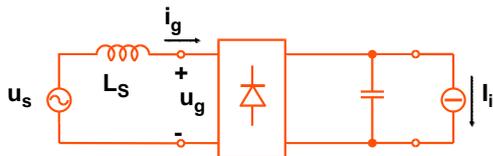
### Note

- Il Power Factor (PF) è influenzato sia dallo sfasamento alla fondamentale sia dalla distorsione armonica
- Per i raddrizzatori il picco di  $i_g$  è localizzato in prossimità del picco di tensione quindi:

$$\cos \varphi_1 \cong 1 \Rightarrow \text{PF} \cong \frac{1}{\sqrt{1 + (\text{THD})^2}}$$

Valori tipici di PF per i raddrizzatori con carico capacitivo sono nel campo 0.5 - 0.6

### Distorsione di tensione (Effetto dell'induttanza di linea)

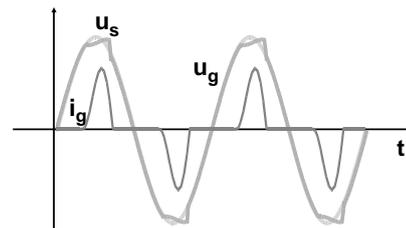


Tenendo conto dell'induttanza di linea si ha:

$$u_g = u_s - L_s \cdot \frac{di_g}{dt}$$

$L_s$  causa il fenomeno dello "schiacciamento" di tensione (peak clipping)

### Schiacciamento di tensione



La distorsione di tensione si ripercuote anche sugli altri carichi connessi allo stesso nodo

### Normative

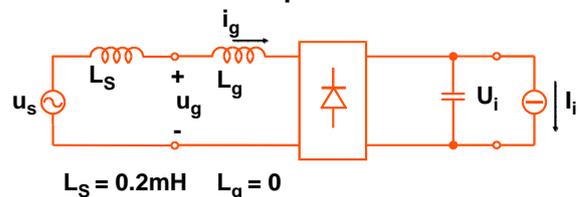
Tendono a limitare THD e ad incrementare PF

Es: EN 61000-3-2 (fino a 16A)  
EN 61000-3-4 (oltre i 16A)

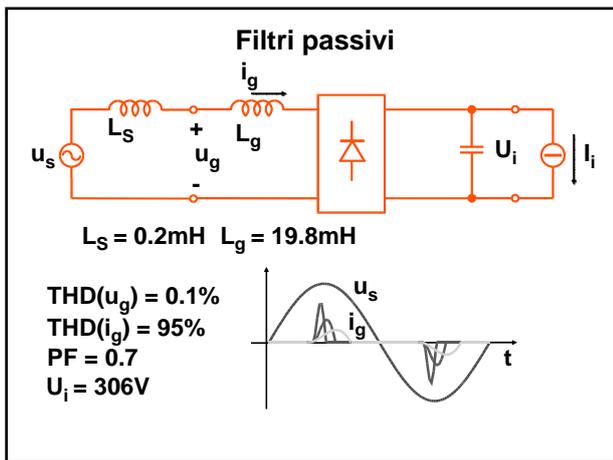
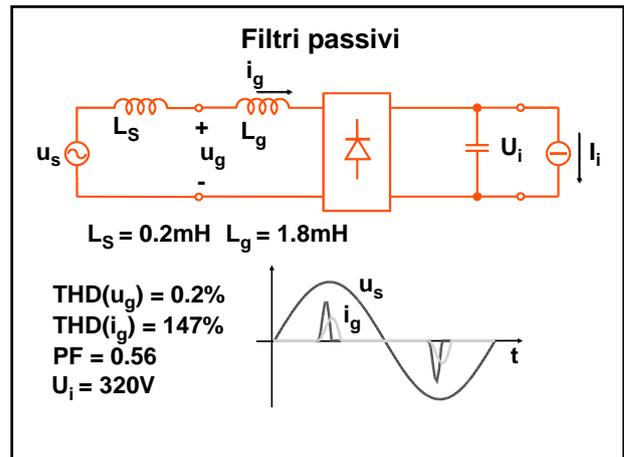
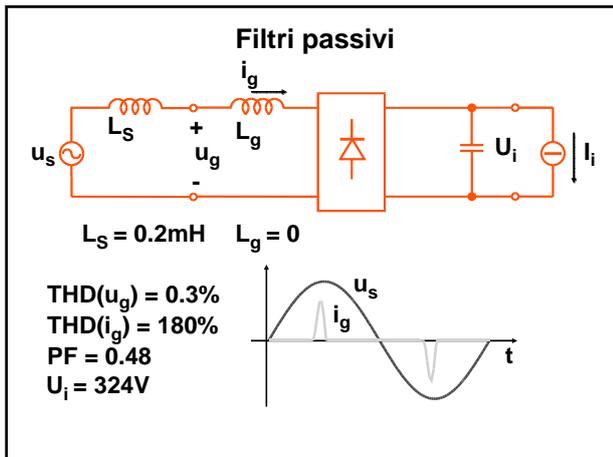
Soluzioni:

Filtri passivi  
Controllo attivo del Power Factor (PFC)

### Filtri passivi



Il più semplice filtro passivo è costituito da un'induttanza all'ingresso del convertitore



**Tabella comparativa**

Al crescere di  $L_g$  aumenta il Power Factor e si riduce il valore di picco di  $i_g$

$L_g$ [mH]	$\hat{i}_g$ [A]	PF	THD( $u_g$ )	THD( $i_g$ )	$U_i$ [V]
0	7.2	0.48	0.3%	180%	324
1.8	4.3	0.56	0.2%	147%	320
19.8	2.3	0.70	0.1%	95%	306

- Difetti dei filtri passivi**
- Sono ingombranti (induttanze a 50Hz)
  - Le prestazioni dipendono dal carico
  - Causano cadute di tensione

- Conclusioni**
- I raddrizzatori con carico capacitivo hanno un pesante impatto sulla rete
    - assorbono armoniche di corrente
    - deformano la tensione di alimentazione
  - I filtri passivi costituiscono una soluzione semplice, ma sono ingombranti e non sempre efficaci
  - In generale ogni modifica della struttura del carico richiede una riprogettazione del filtro