

Corso di  
**ELETRONICA INDUSTRIALE**

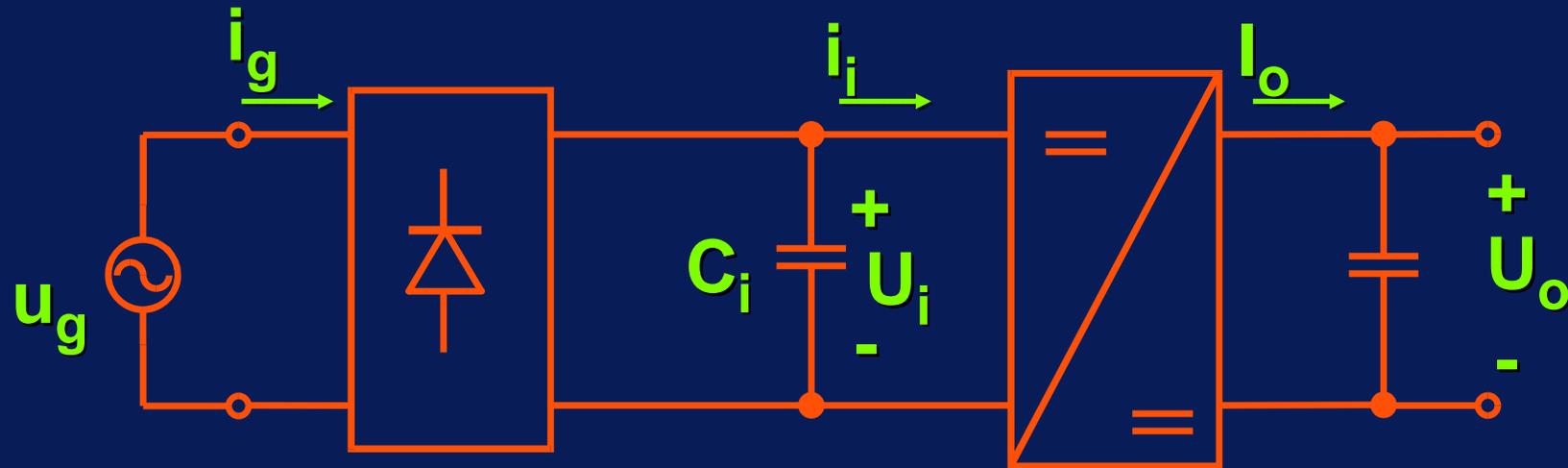
***“ Raddrizzatori con carico capacitivo.  
Impatto sulla rete e filtraggio passivo ”***

# 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**

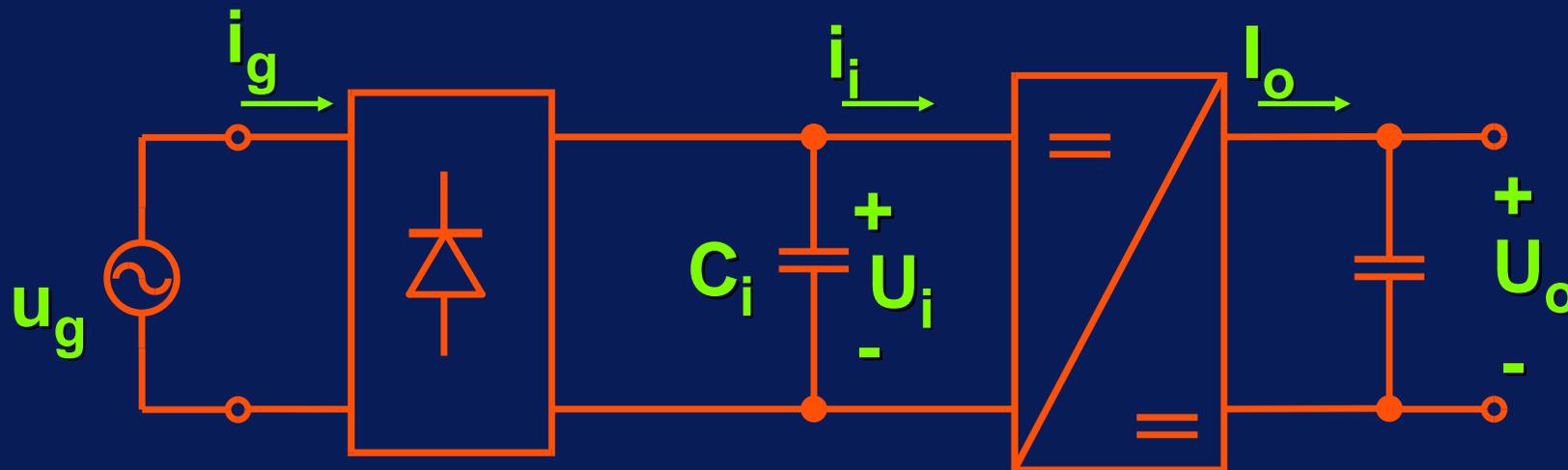
# Schema generale di un alimentatore switching



raddrizzatore

convertitore cc/cc  
(trasformatore AF)

# Schema generale di un alimentatore switching



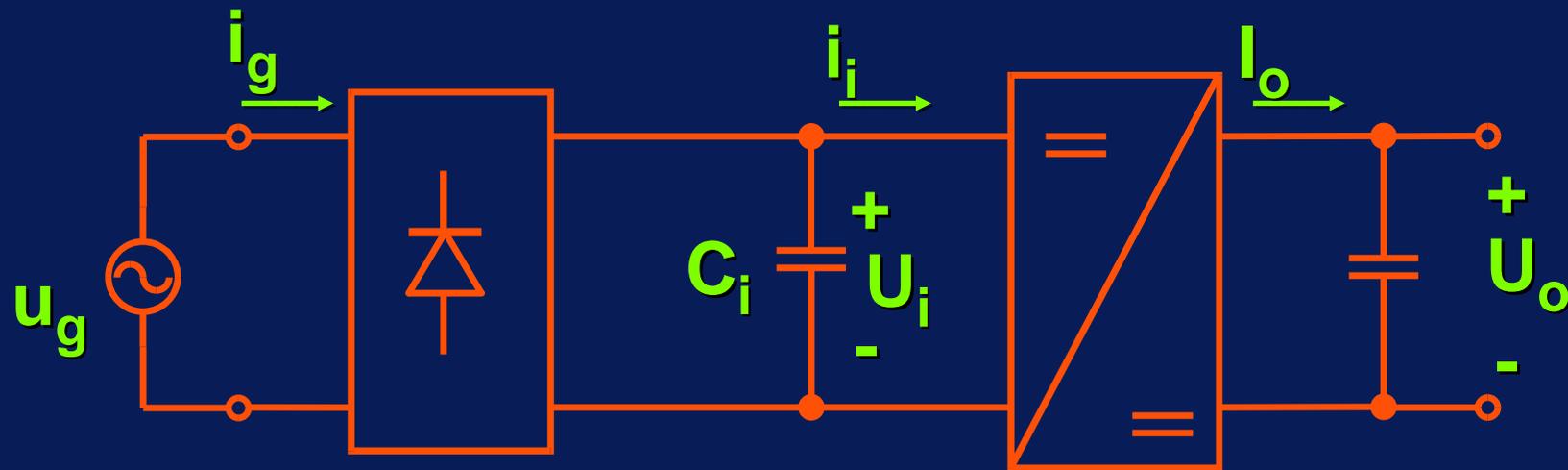
raddrizzatore

convertitore cc/cc  
(trasformatore AF)

$$i_i = I_i + \Delta i_i$$

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

# Schema generale di un alimentatore switching

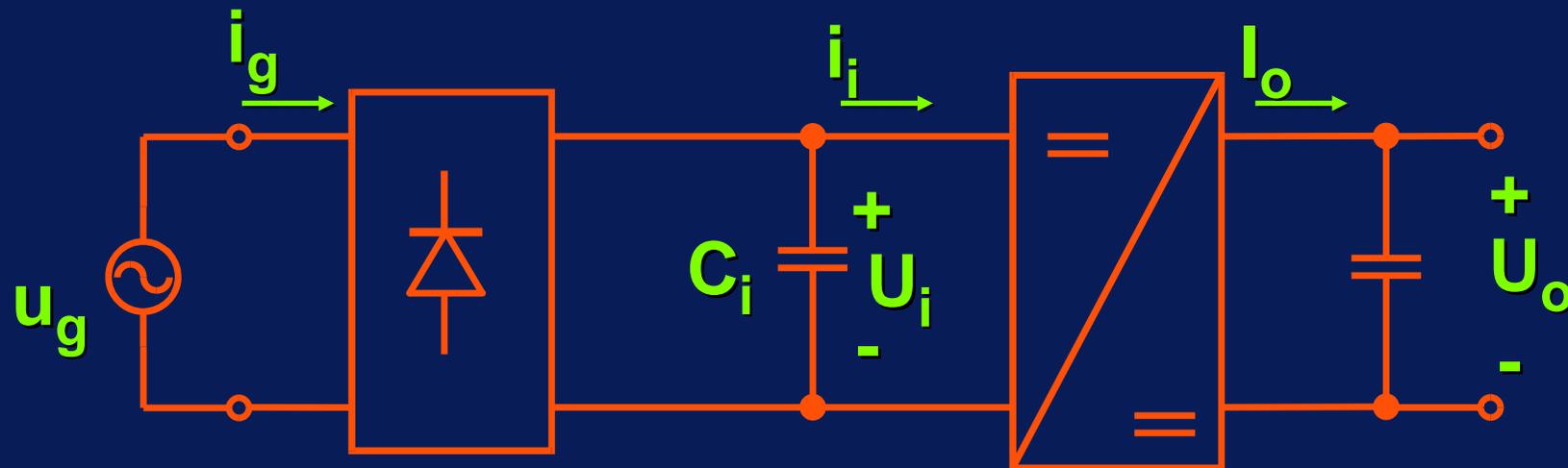


raddrizzatore

convertitore cc/cc  
(trasformatore AF)

Note:

## Schema generale di un alimentatore switching



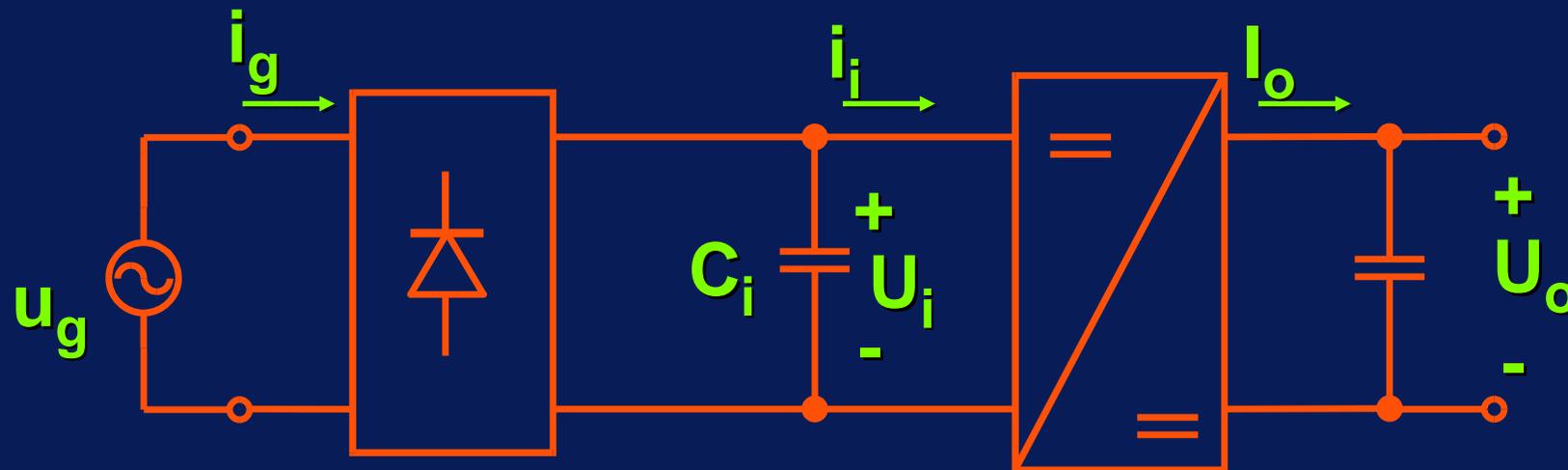
raddrizzatore

convertitore cc/cc  
(trasformatore AF)

**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



raddrizzatore

convertitore cc/cc  
(trasformatore AF)

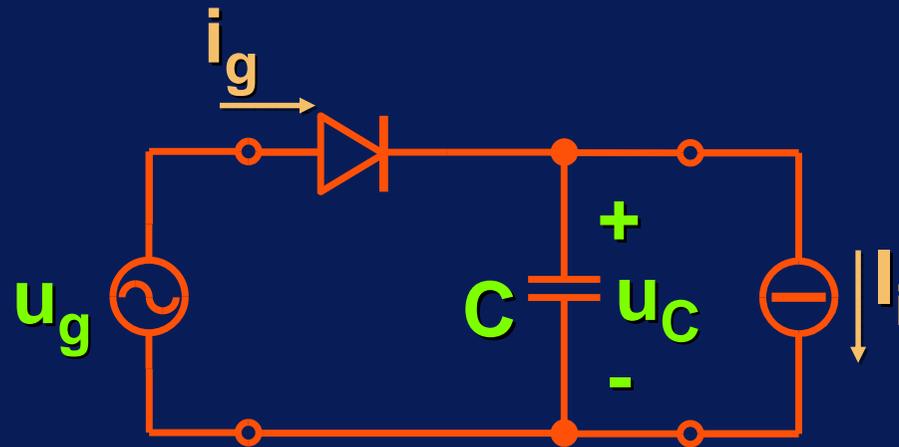
**Note:**

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

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

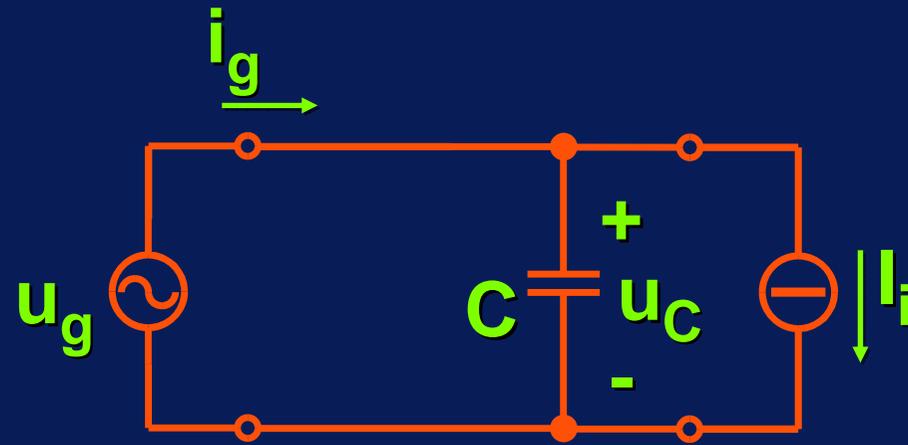
# **Analisi di un raddrizzatore con filtro capacitivo e carico costituito da un generatore di corrente**

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

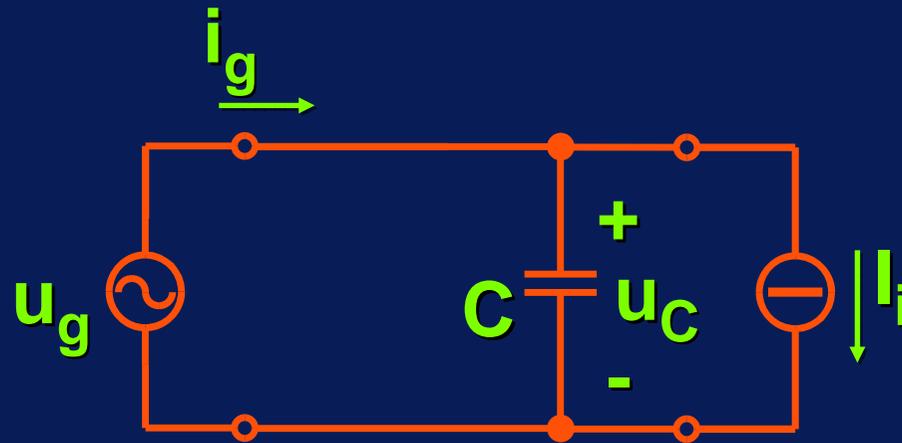


$$u_g = \hat{U}_g \cdot \sin(\omega t)$$

D on

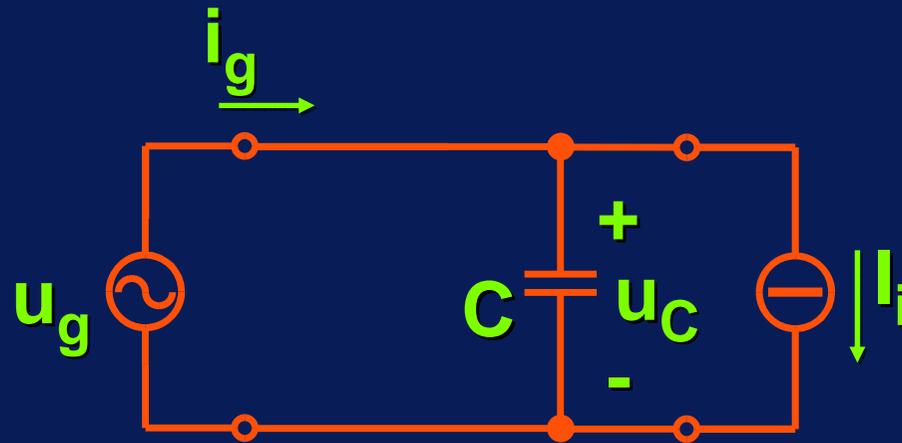


D on



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

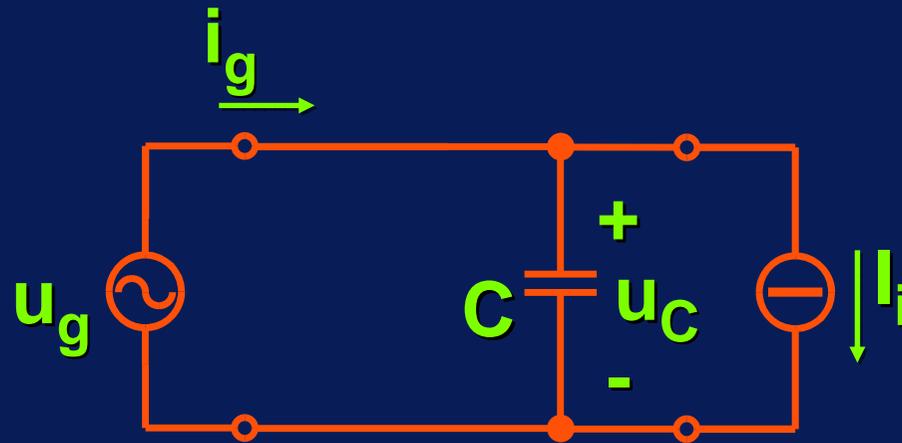
**D on**



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

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

**D on**



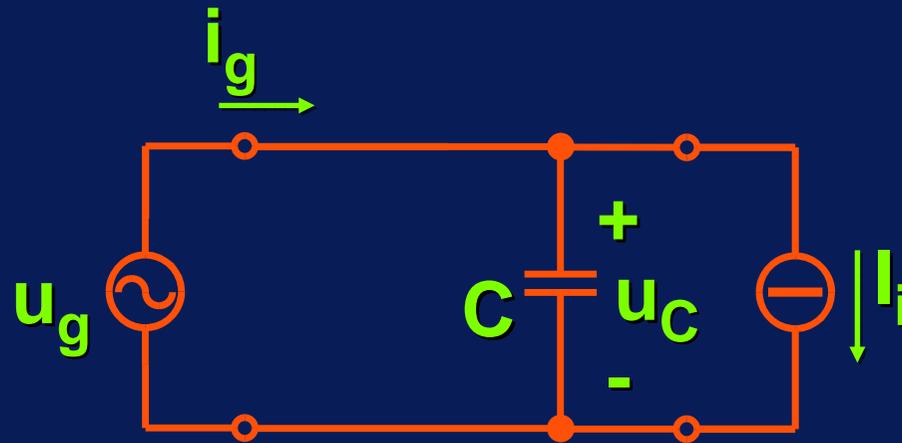
Questo modo di funzionamento inizia quando  $u_g = u_C$  e termina quando  $i_g = 0$

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

**Condizione di fine:**

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

**D on**



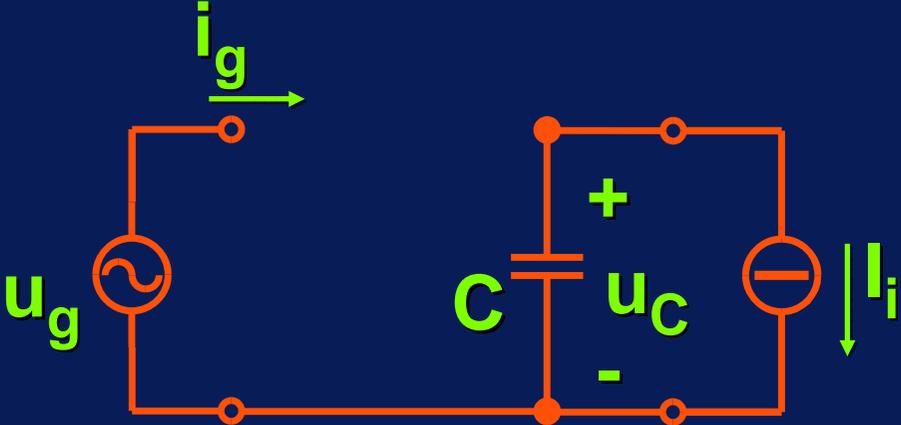
Questo modo di funzionamento inizia quando  $u_g = u_C$  e termina quando  $i_g = 0$

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

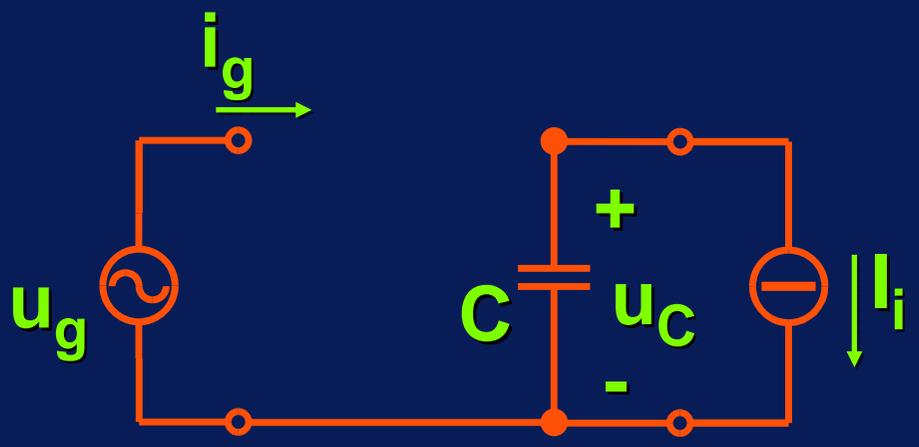
**Condizione di fine:**

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

D off



D off

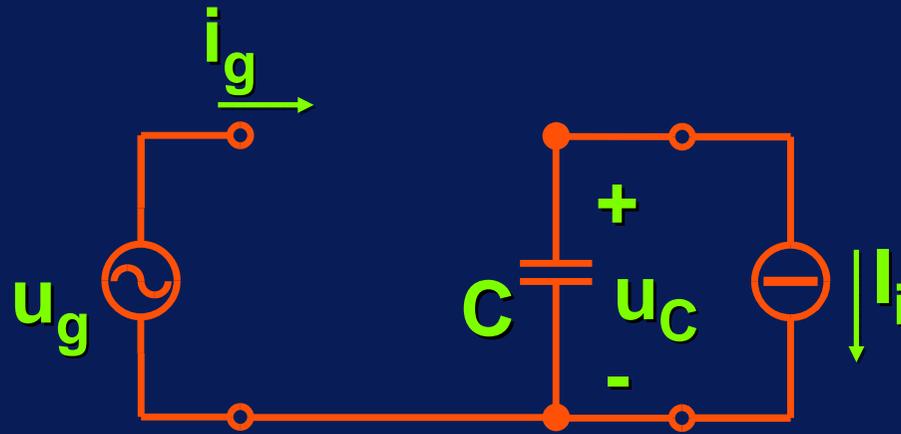


$$i_g = 0$$

$$i_C = -I_i$$

$$u_C = U_2 - \frac{I_i}{C} \cdot t$$

D off



$$i_g = 0$$

$$i_C = -I_i$$

$$u_C = U_2 - \frac{I_i}{C} \cdot t$$

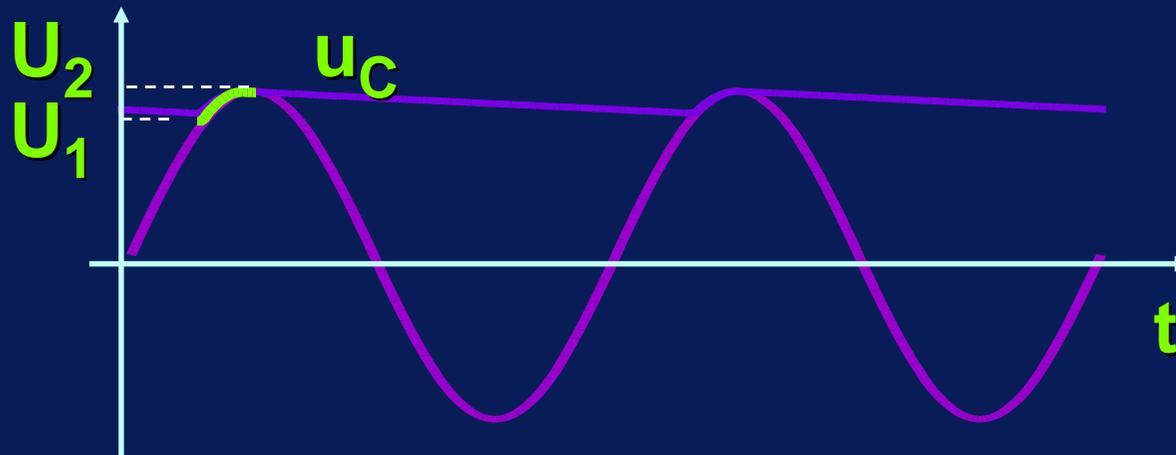
Condizione di fine:

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

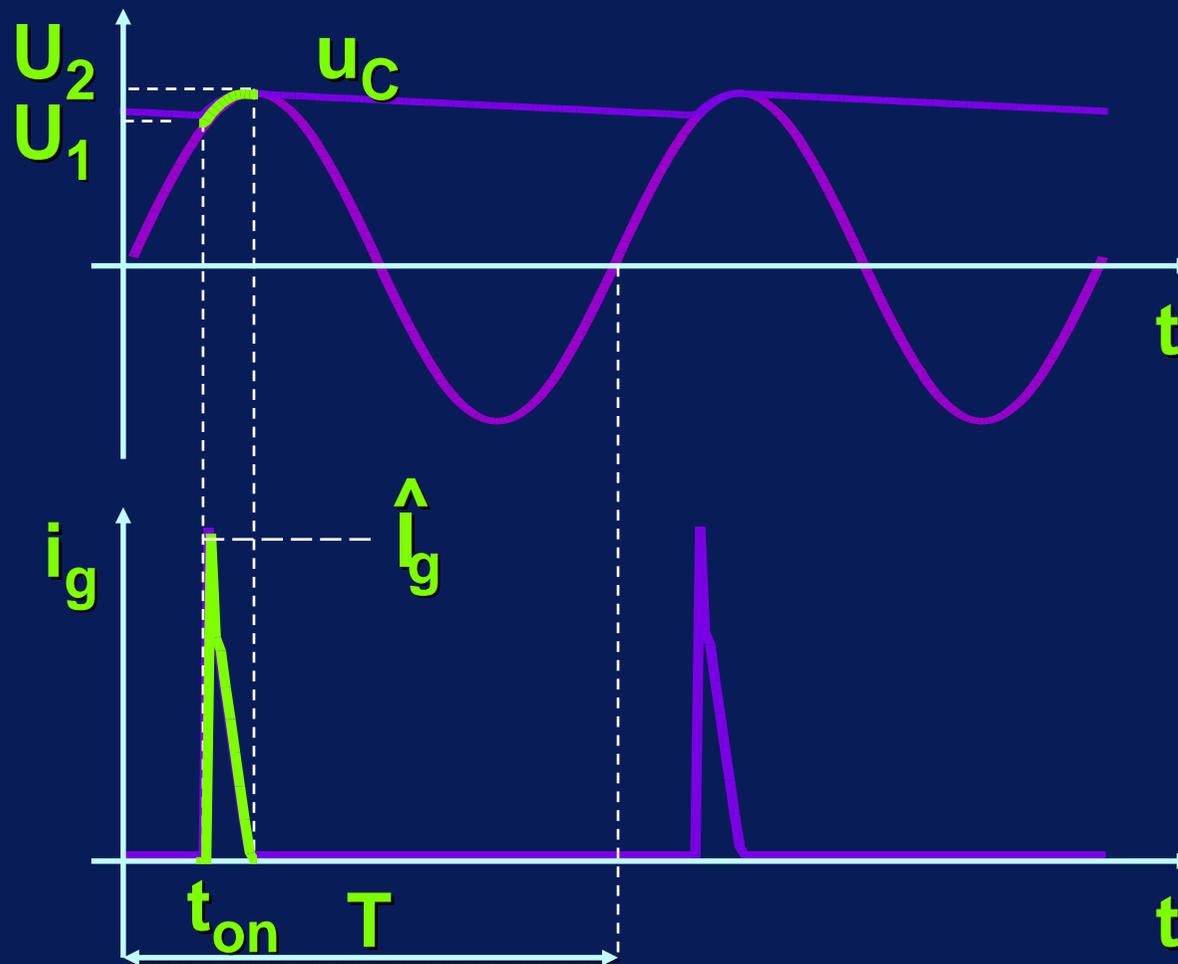
$$t^* = t + (T - t_2)$$

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

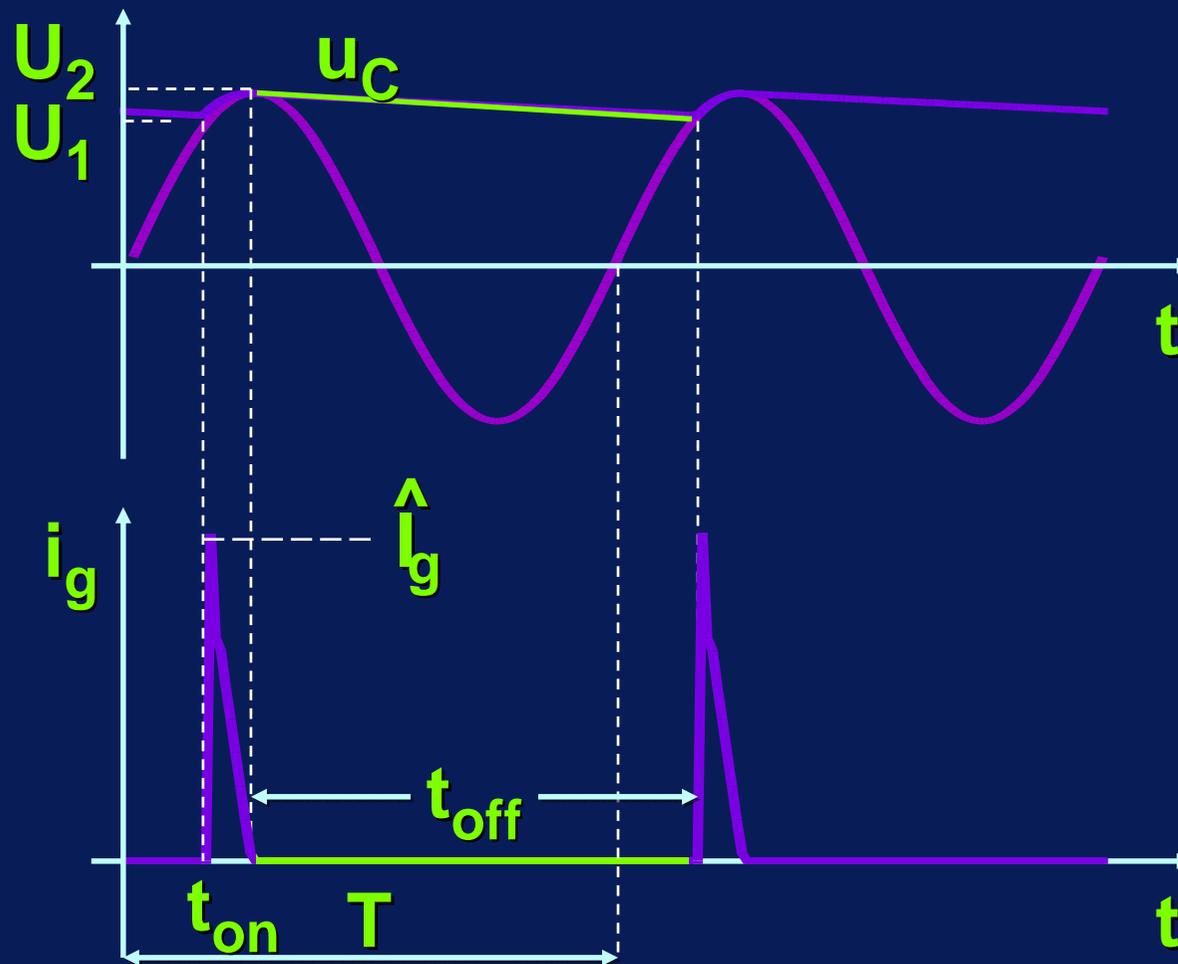
# Forme d'onda durante $t_{on}$ (D on)



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



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



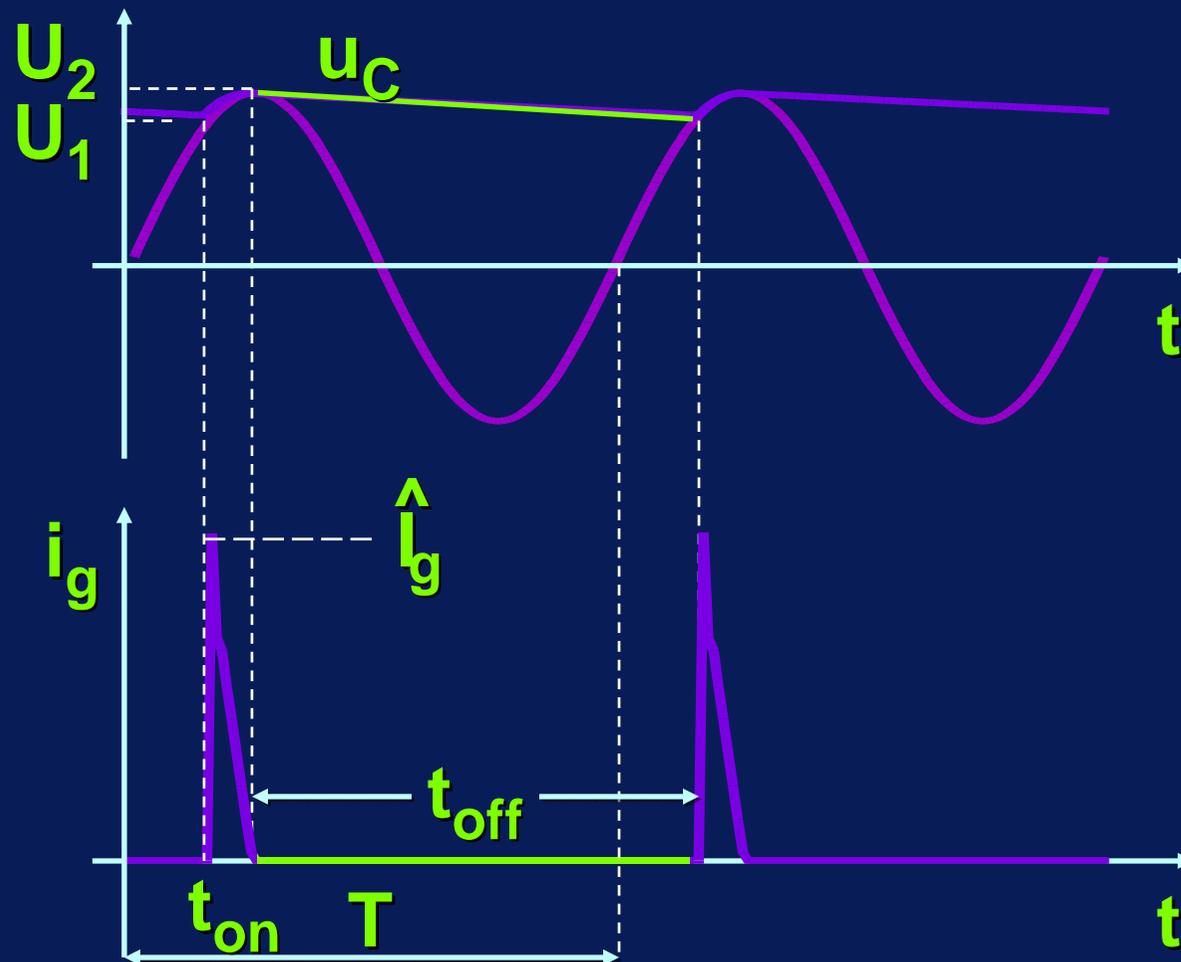
**Nota**

## 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.



## Nota

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

Ciò implica che:

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

## Nota

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

Ciò implica che:

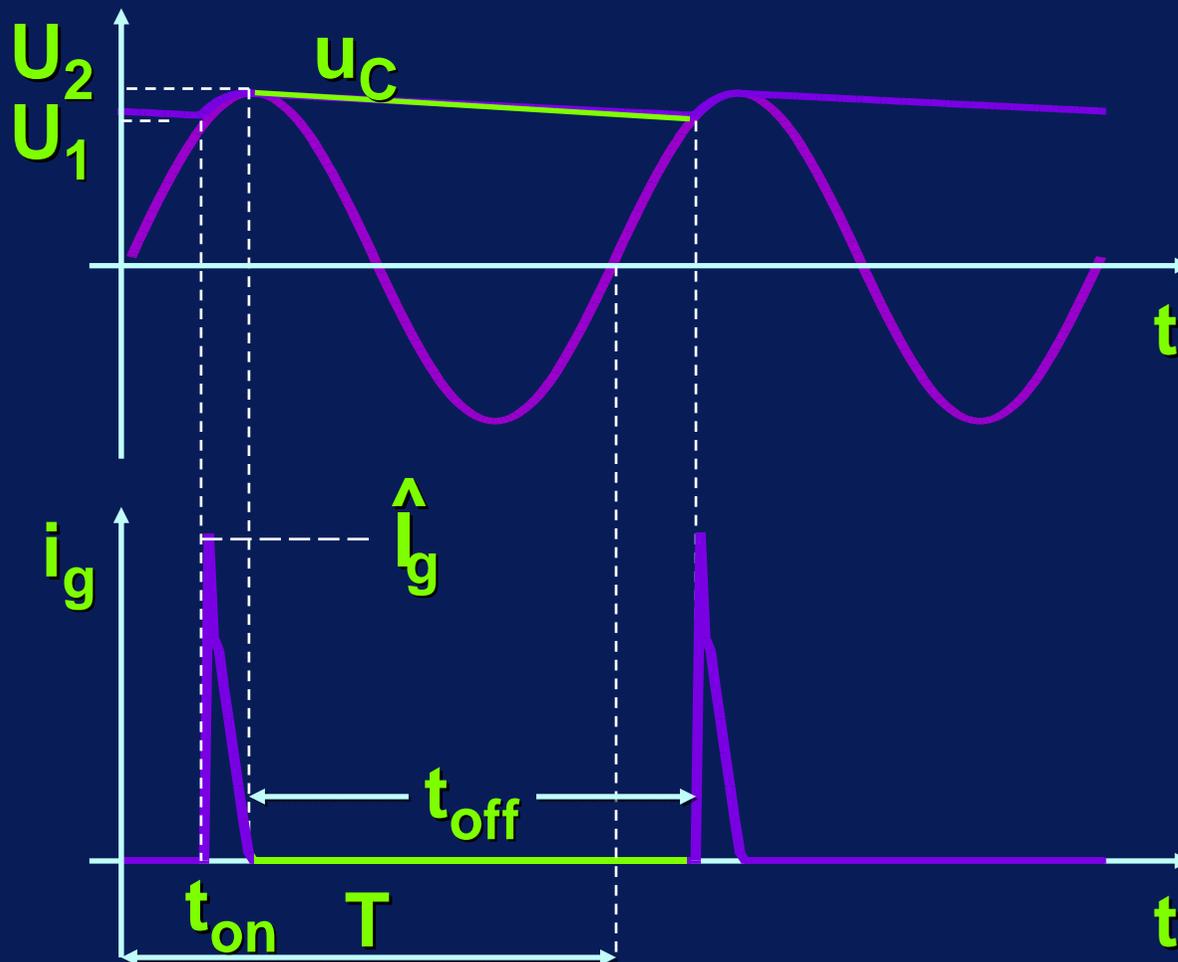
$$\omega C \hat{U}_g \gg I_i \quad (\hat{I}_g \gg I_i)$$

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.



## Note

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

Infatti:

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

## Nota

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

Infatti:

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

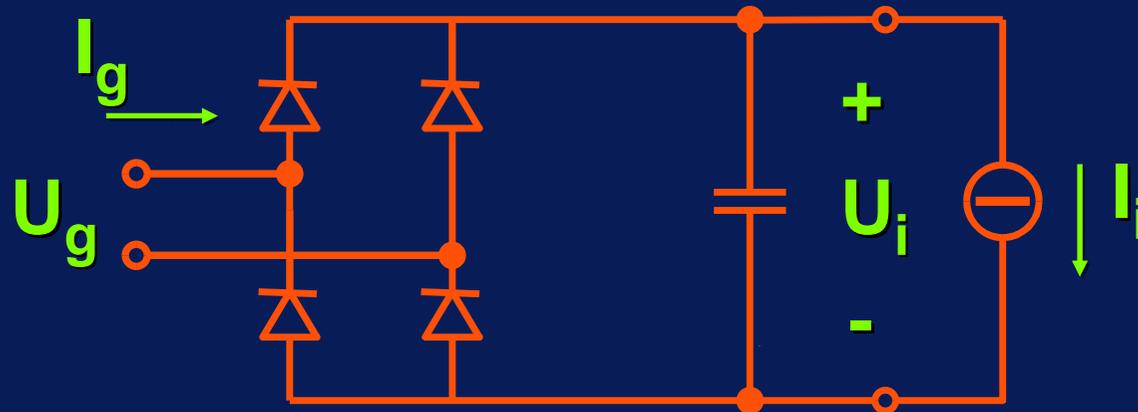
Se  $t_{on}$  é piccolo occorre un **elevato impulso di  $i_g$**  per fornire la potenza richiesta dal carico

# Schema del raddrizzatore reale

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

# Schema del raddrizzatore reale

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

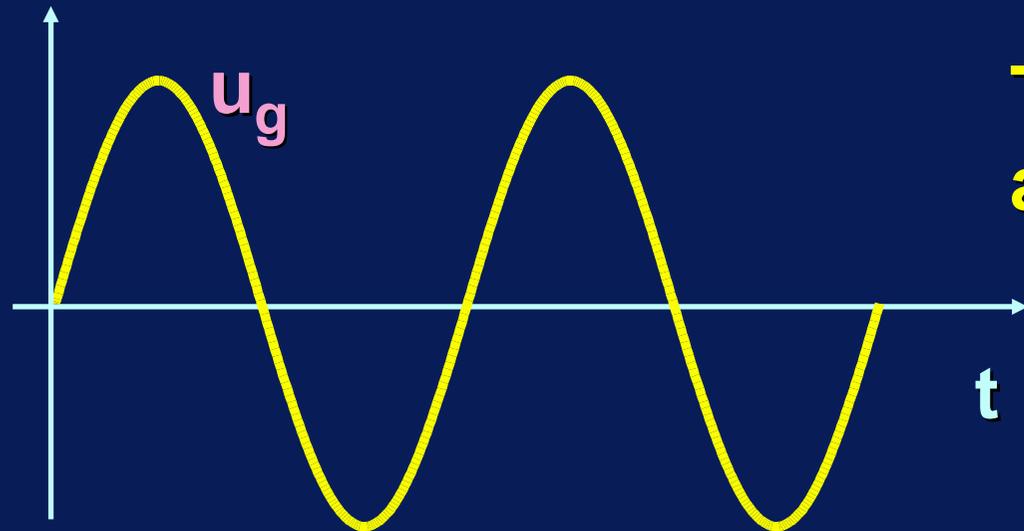


# Raddrizzatore a doppia semionda

Forme d'onda tipiche

# Raddrizzatore a doppia semionda

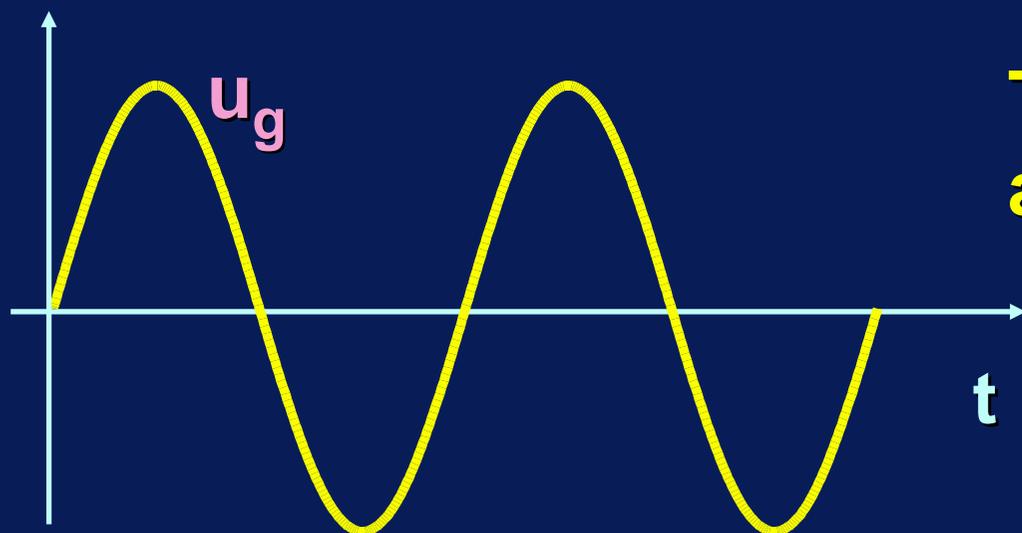
Forme d'onda tipiche



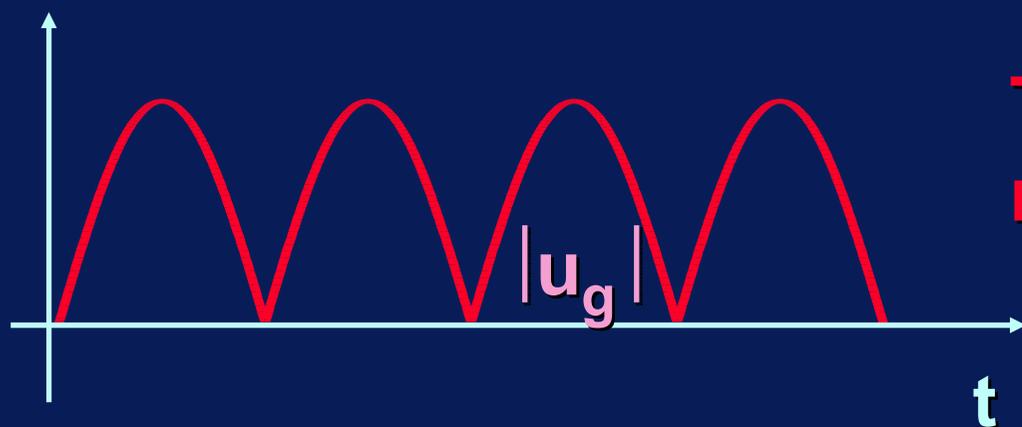
Tensione di alimentazione

# Raddrizzatore a doppia semionda

## Forme d'onda tipiche



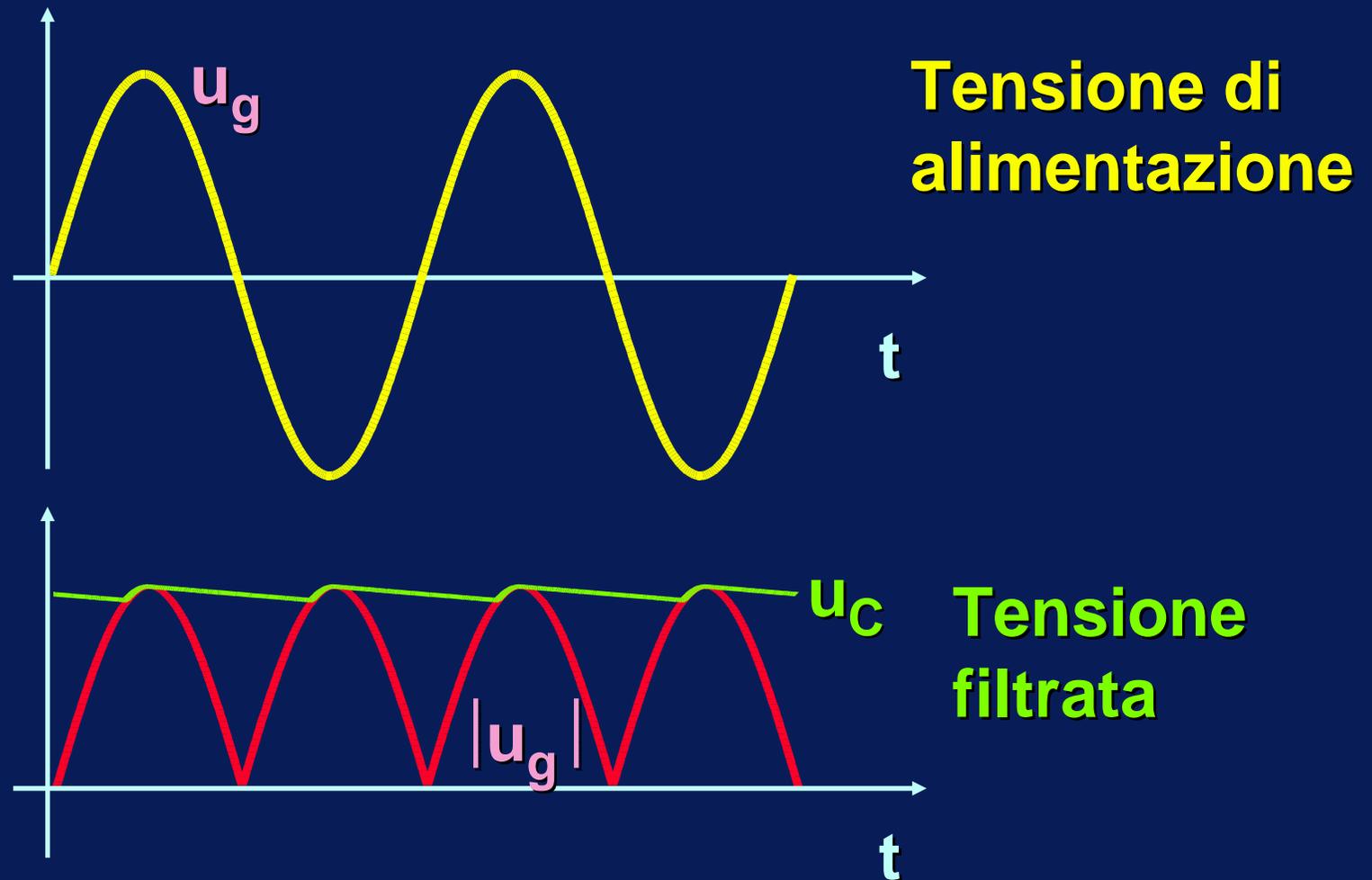
**Tensione di alimentazione**



**Tensione raddrizzata**

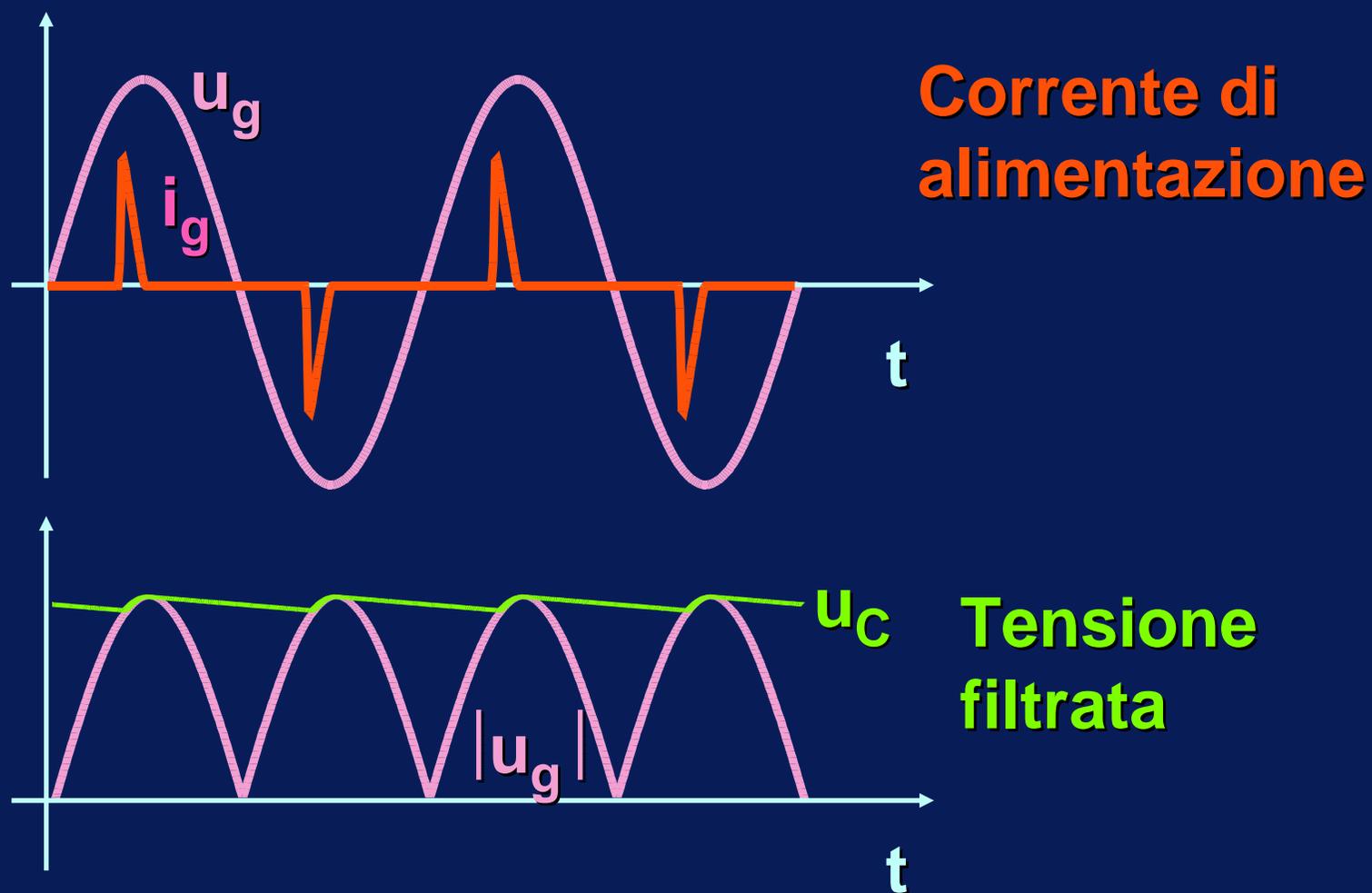
# Raddrizzatore a doppia semionda

## Forme d'onda tipiche



# Raddrizzatore a doppia semionda

## Forme d'onda tipiche



# Note

# Note

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

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

## Note

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

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

- $i_g$  é alternata

## Note

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

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

- $i_g$  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

# Problema dei raddrizzatori con carico capacitivo

$i_g$  é fortemente distorta



basso fattore  
di potenza

# Problema dei raddrizzatori con carico capacitivo

$i_g$  é fortemente distorta



**basso fattore  
di potenza**



**distorsione  
di tensione**

# Fattore di potenza (PF)

# Fattore di potenza (PF)

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{\text{Potenza attiva}}{\text{Potenza apparente}}$$

# Fattore di potenza (PF)

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{\text{Potenza attiva}}{\text{Potenza apparente}} \longrightarrow \text{consumo}$$

# Fattore di potenza (PF)

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{\text{Potenza attiva}}{\text{Potenza apparente}}$$

→ consumo

↘ dimensionamento

# Fattore di potenza (PF)

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{\text{Potenza attiva}}{\text{Potenza apparente}}$$

→ consumo

↘ dimensionamento

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

# Fattore di potenza (PF)

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{\text{Potenza attiva}}{\text{Potenza apparente}}$$

→ consumo

↘ dimensionamento

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

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

# Fattore di potenza (PF)

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

# Fattore di potenza (PF)

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

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

# Fattore di potenza (PF)

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

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

dove:

**THD = distorsione armonica =  
totale di corrente**

$$\sqrt{\frac{\sum_1^{\infty} I_{gn}^2}{I_{g1}^2}}$$

# Fattore di potenza (PF)

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

# Fattore di potenza (PF)

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

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

# Fattore di potenza (PF)

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

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

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

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

# Fattore di potenza (PF)

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

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

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

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

dove:

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

**Note**

# Note

- Il Power Factor (PF) é influenzato sia dallo sfasamento alla fondamentale sia dalla distorsione armonica

## Note

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

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

## Note

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

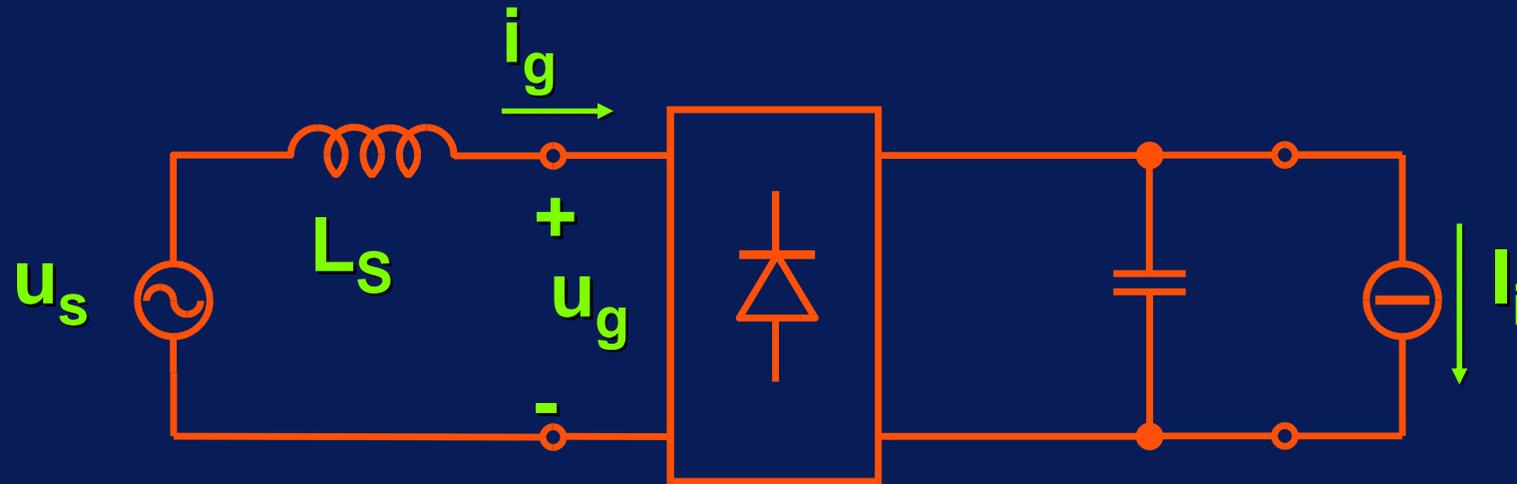
$$\cos \varphi_1 \cong 1 \Rightarrow \text{PF} \cong \frac{1}{\sqrt{1 + (\text{THD})^2}}$$

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

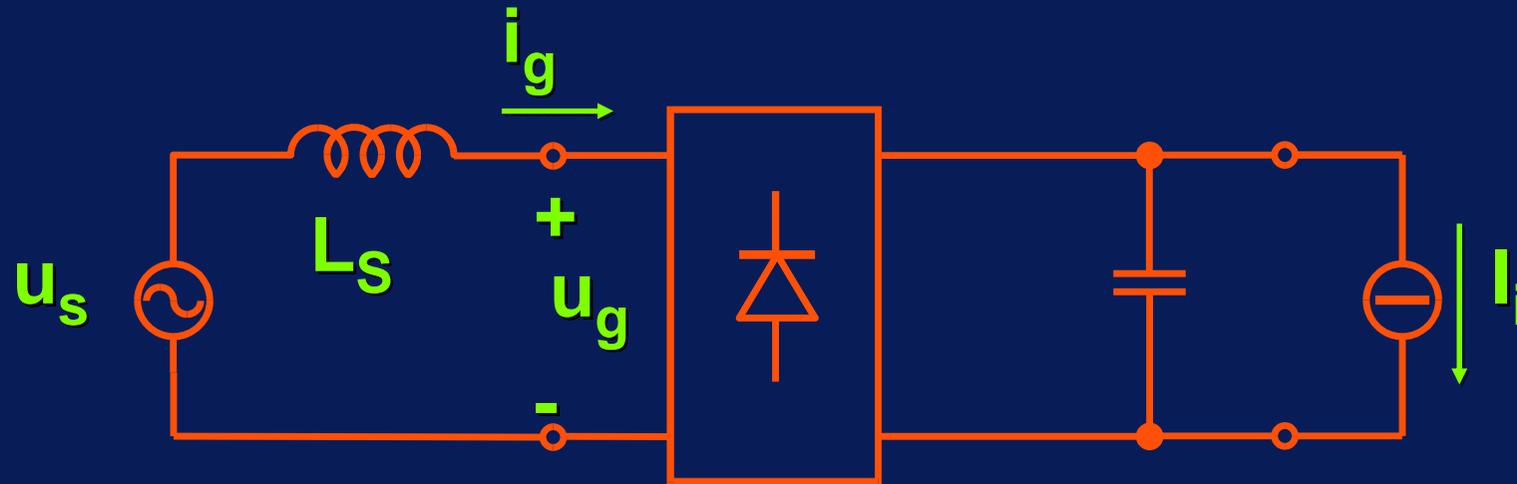
# **Distorsione di tensione**

## **(Effetto dell'induttanza di linea)**

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



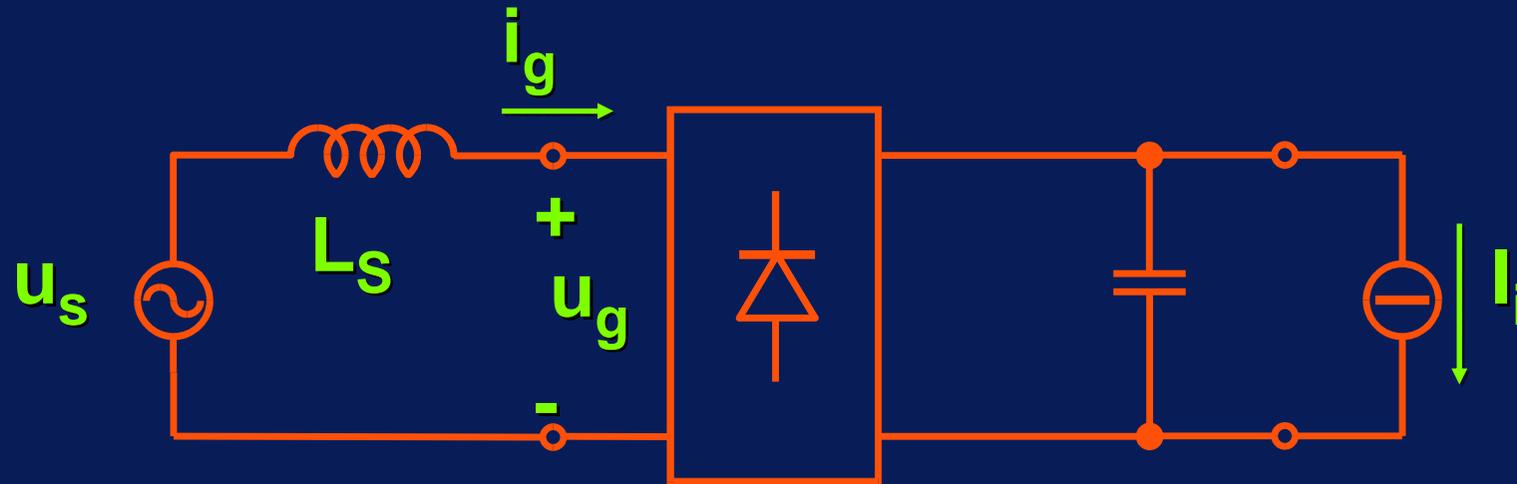
# Distorsione di tensione (Effetto dell'induttanza di linea)



Tenendo conto dell'induttanza di linea si ha:

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

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

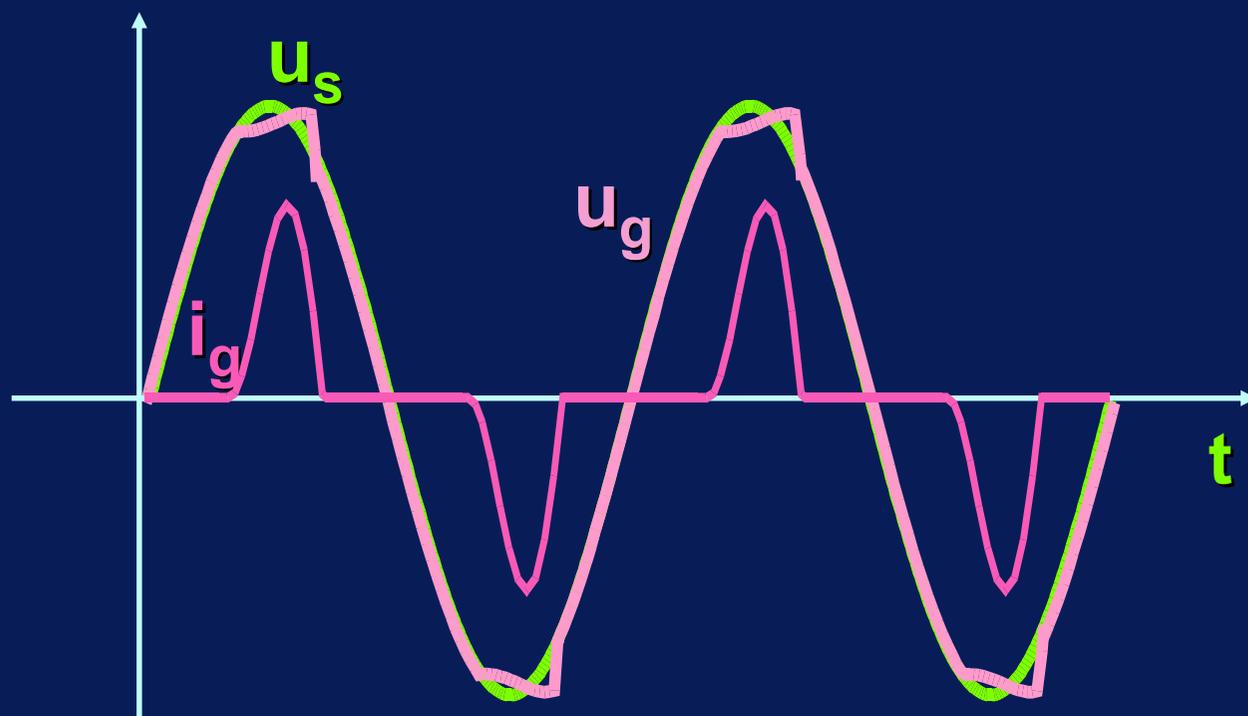


Tenendo conto dell'induttanza di linea si ha:

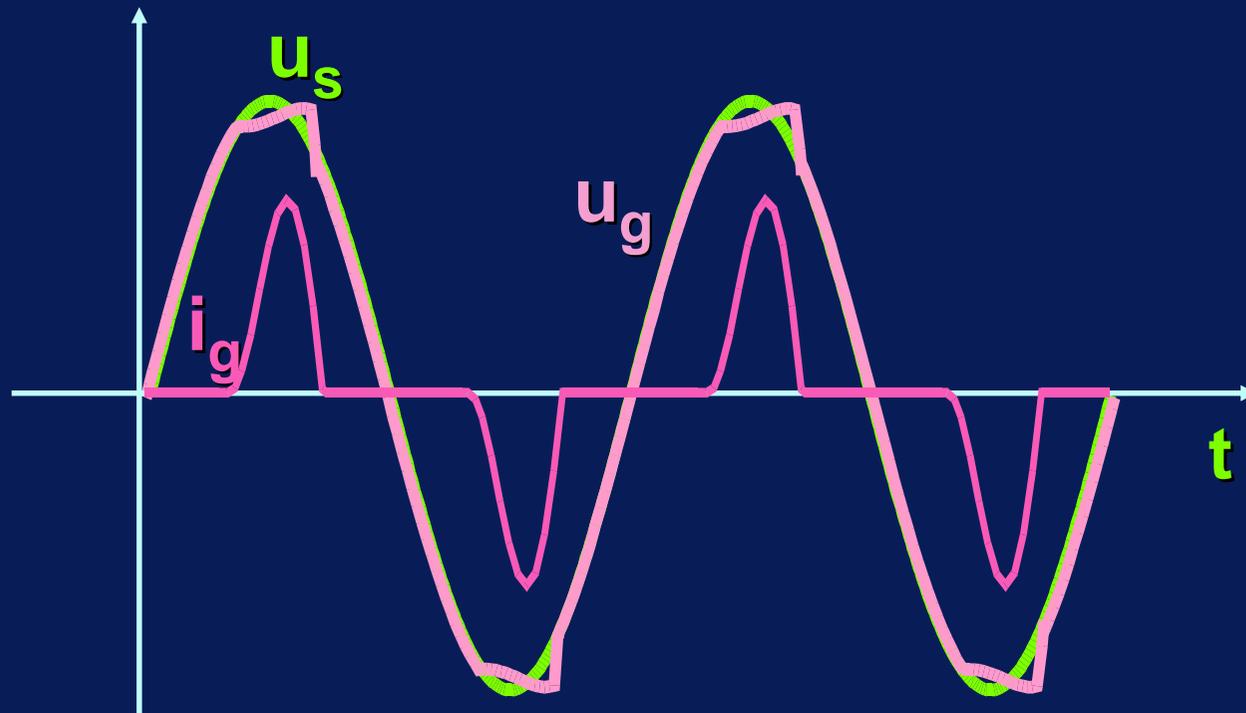
$$u_g = u_s - L_s \cdot \frac{di_g}{dt}$$

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

# Schiacciamento di tensione



# 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)

# 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:

# 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**

# Normative

Tendono a limitare THD e ad incrementare PF

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

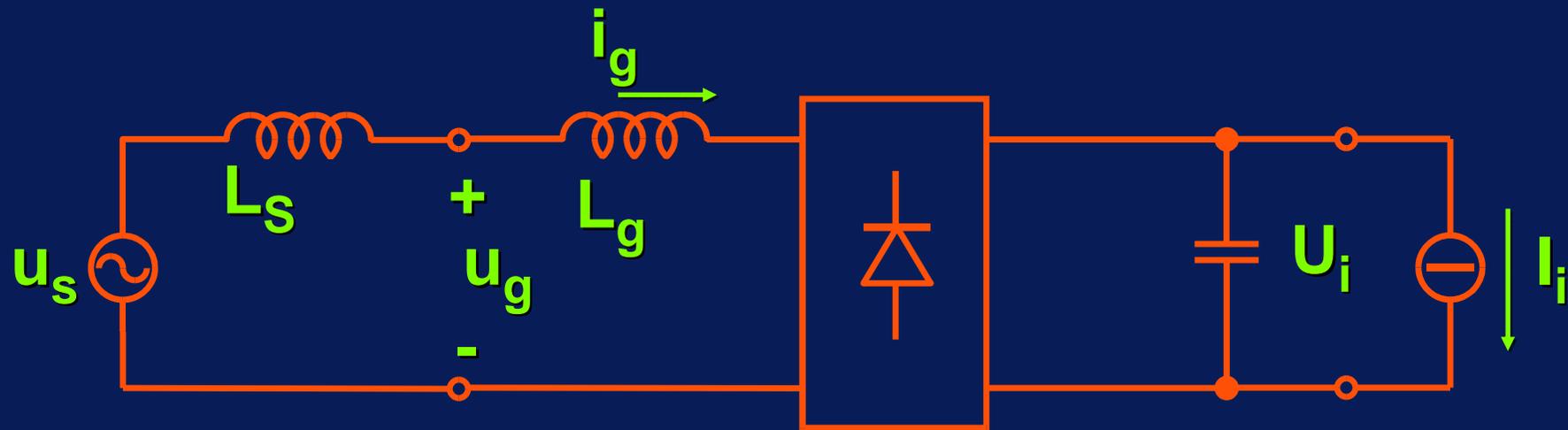
## Soluzioni:

Filtri passivi

Controllo attivo del Power Factor (PFC)

# Filtri passivi

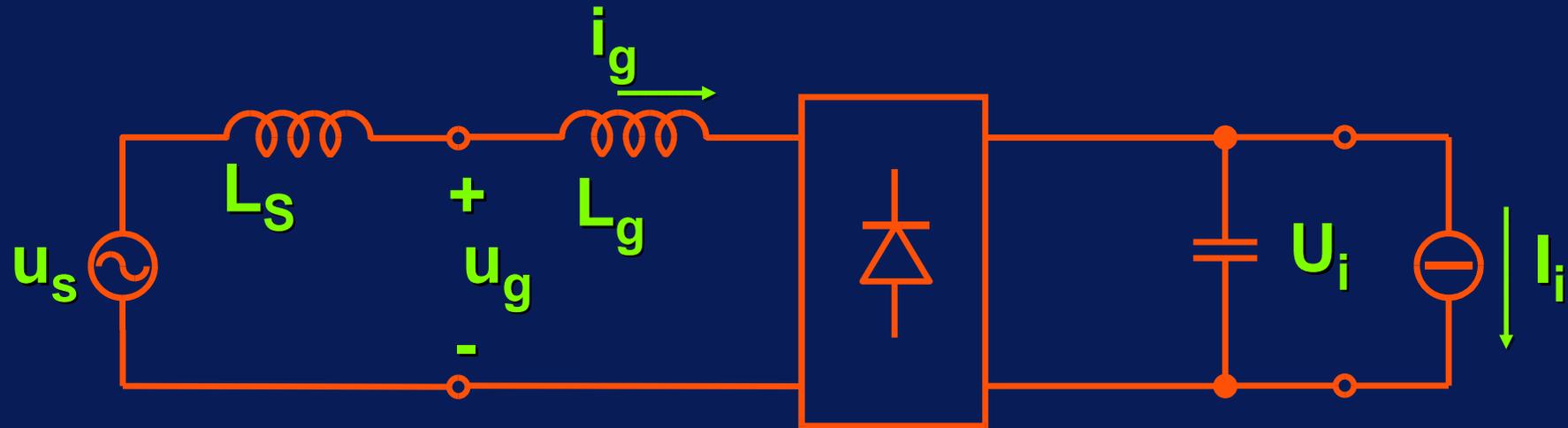
## Filtri passivi



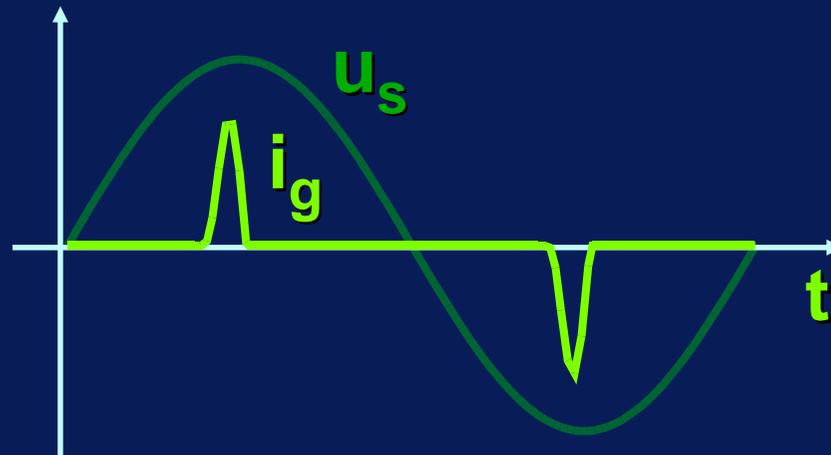
$$L_s = 0.2\text{mH} \quad L_g = 0$$

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

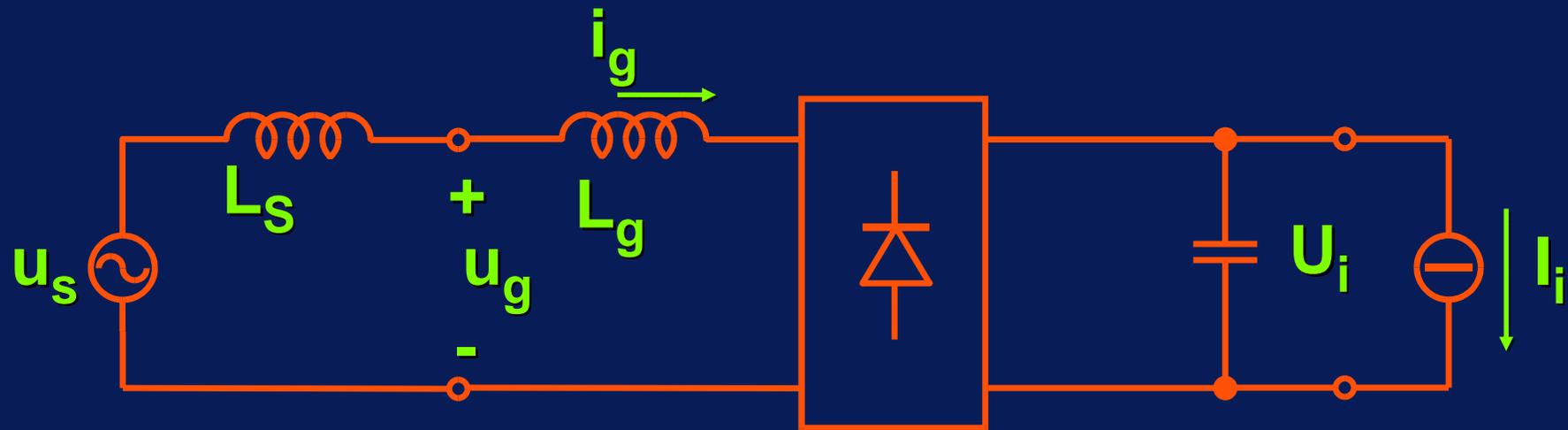
# Filtri passivi



$$L_s = 0.2\text{mH} \quad L_g = 0$$



# Filtri passivi



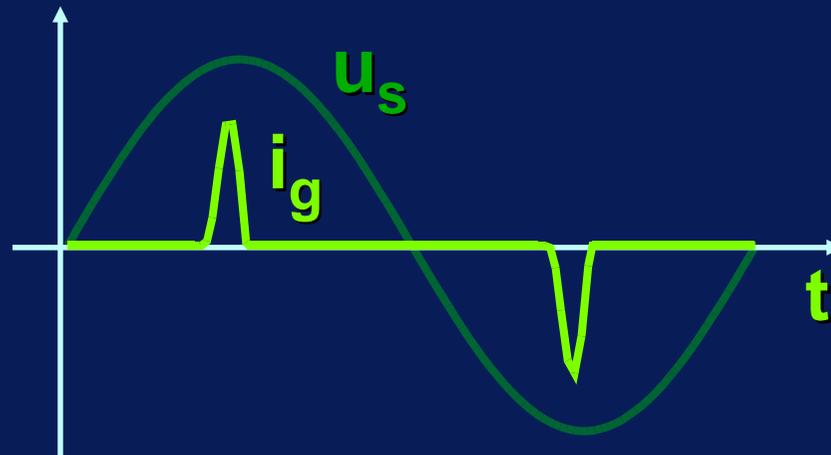
$$L_s = 0.2\text{mH} \quad L_g = 0$$

$$\text{THD}(u_g) = 0.3\%$$

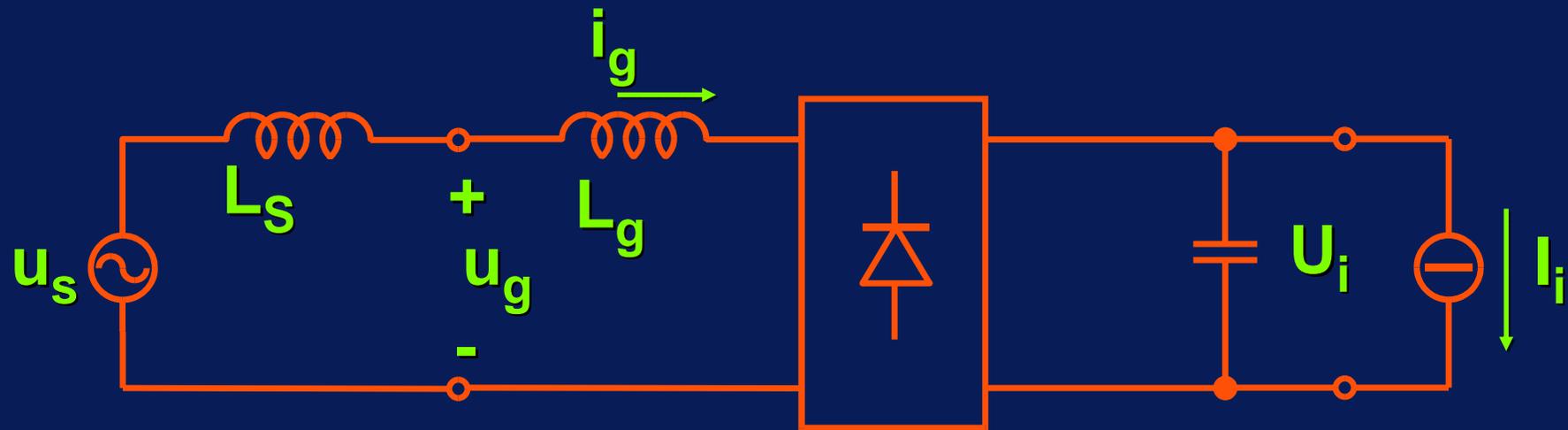
$$\text{THD}(i_g) = 180\%$$

$$\text{PF} = 0.48$$

$$U_i = 324\text{V}$$



# Filtri passivi



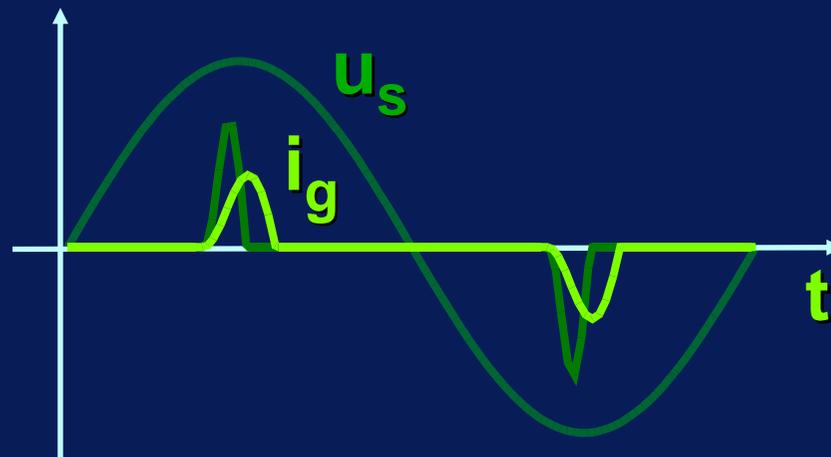
$$L_s = 0.2\text{mH} \quad L_g = 1.8\text{mH}$$

$$\text{THD}(u_g) = 0.2\%$$

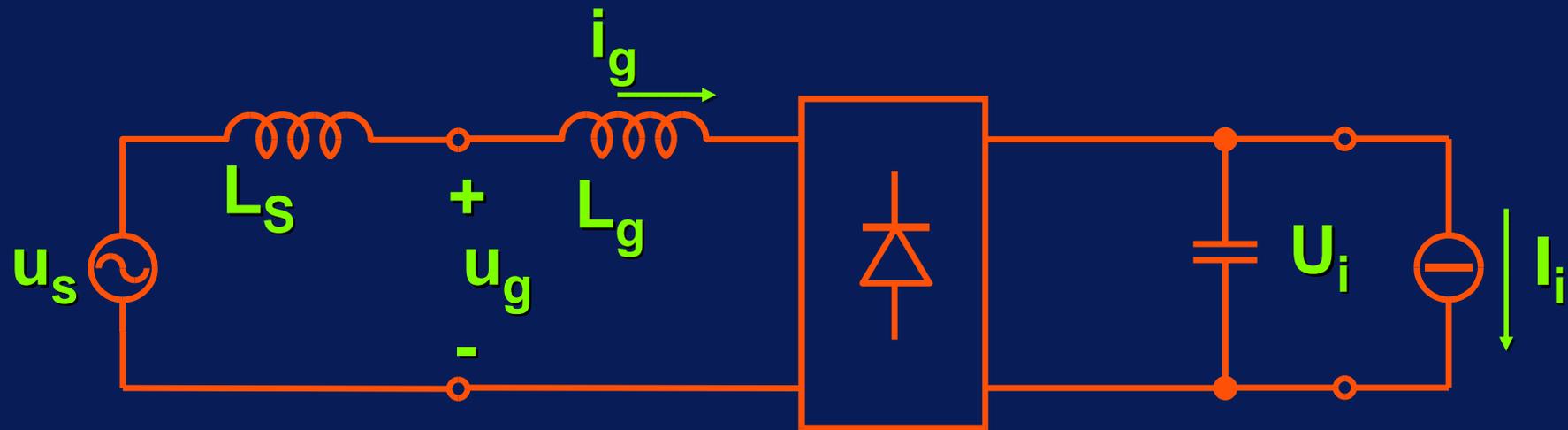
$$\text{THD}(i_g) = 147\%$$

$$\text{PF} = 0.56$$

$$U_i = 320\text{V}$$



# Filtri passivi



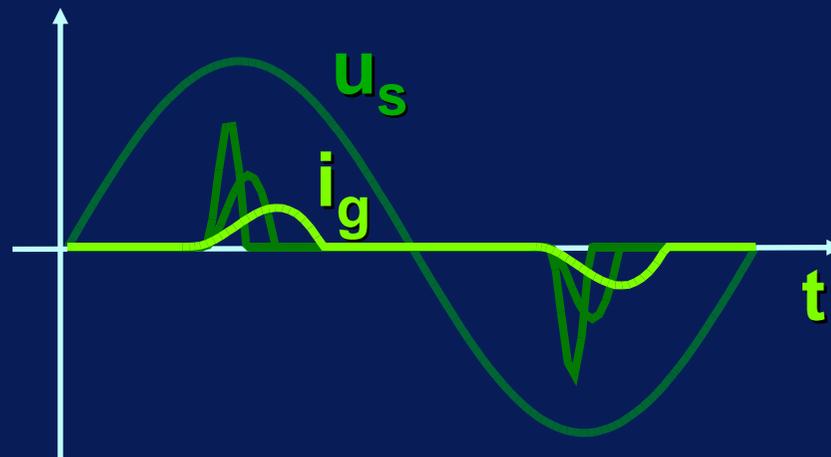
$$L_s = 0.2\text{mH} \quad L_g = 19.8\text{mH}$$

$$\text{THD}(u_g) = 0.1\%$$

$$\text{THD}(i_g) = 95\%$$

$$\text{PF} = 0.7$$

$$U_i = 306\text{V}$$



# 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**