

Corso di
ELETRONICA INDUSTRIALE

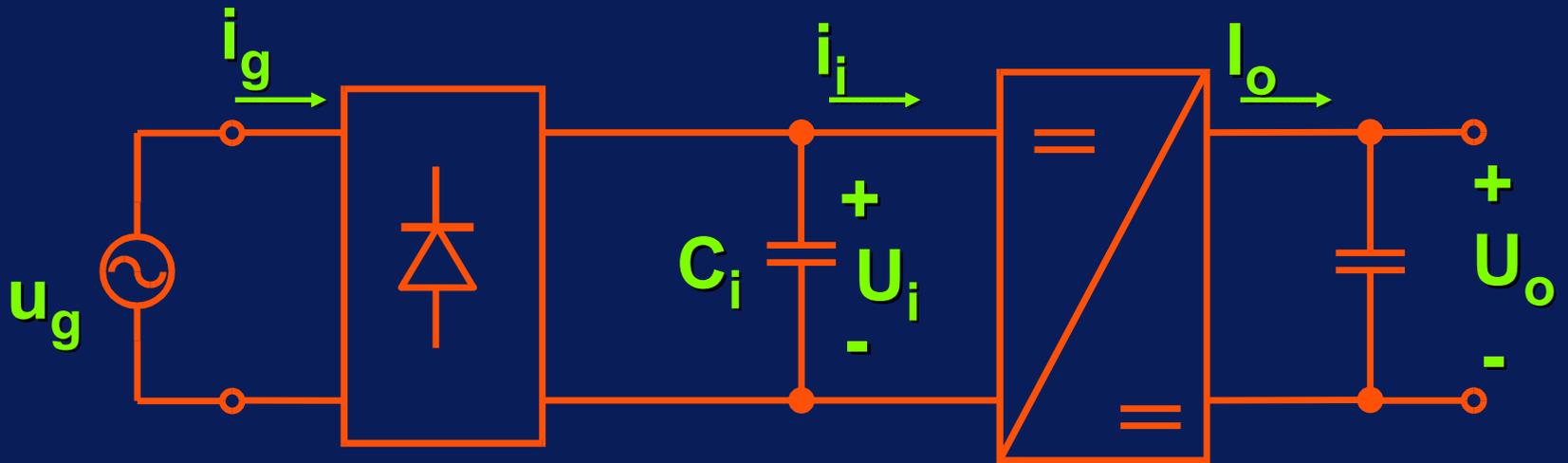
***“ Raddrizzatori con carico capacitivo.
Impatto sulla rete e filtraggio passivo ”***

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

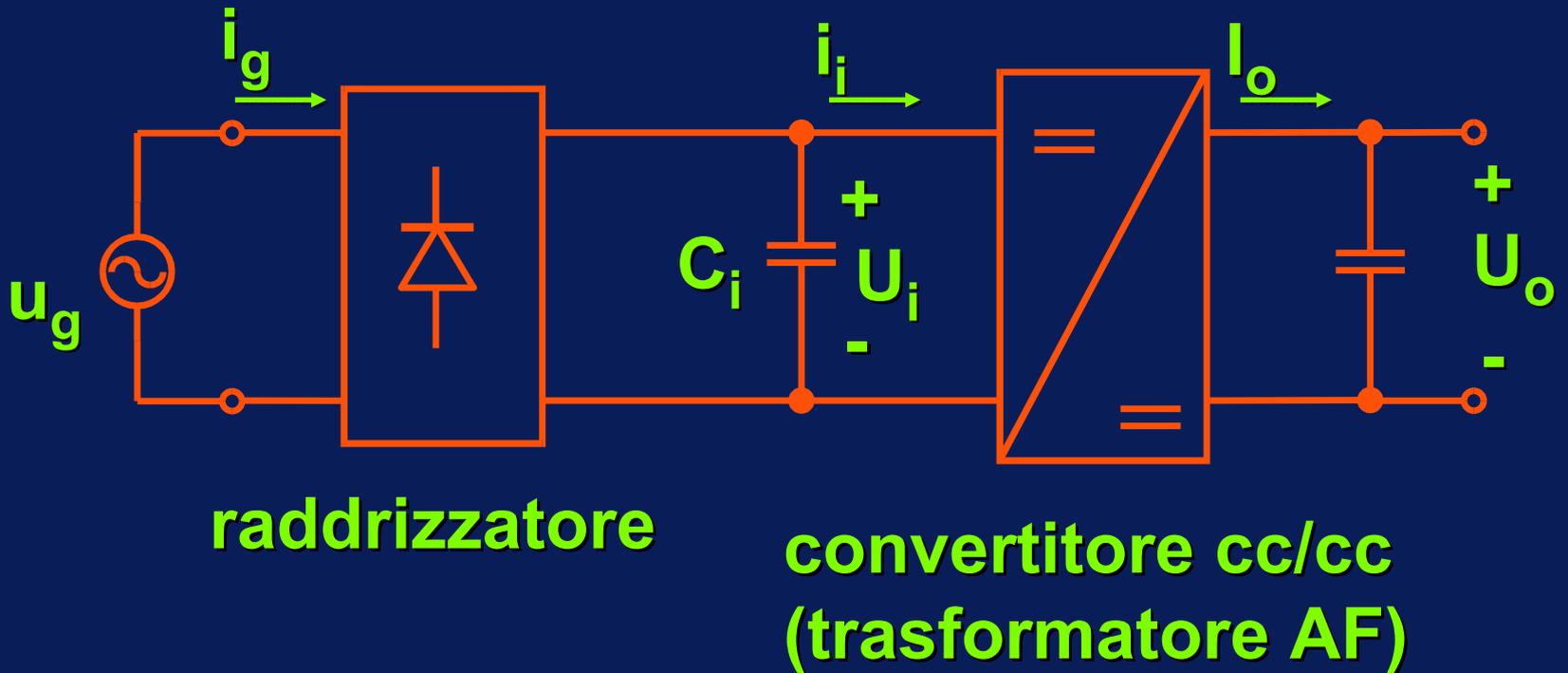
Schema generale di un alimentatore switching



raddrizzatore

**convertitore cc/cc
(trasformatore AF)**

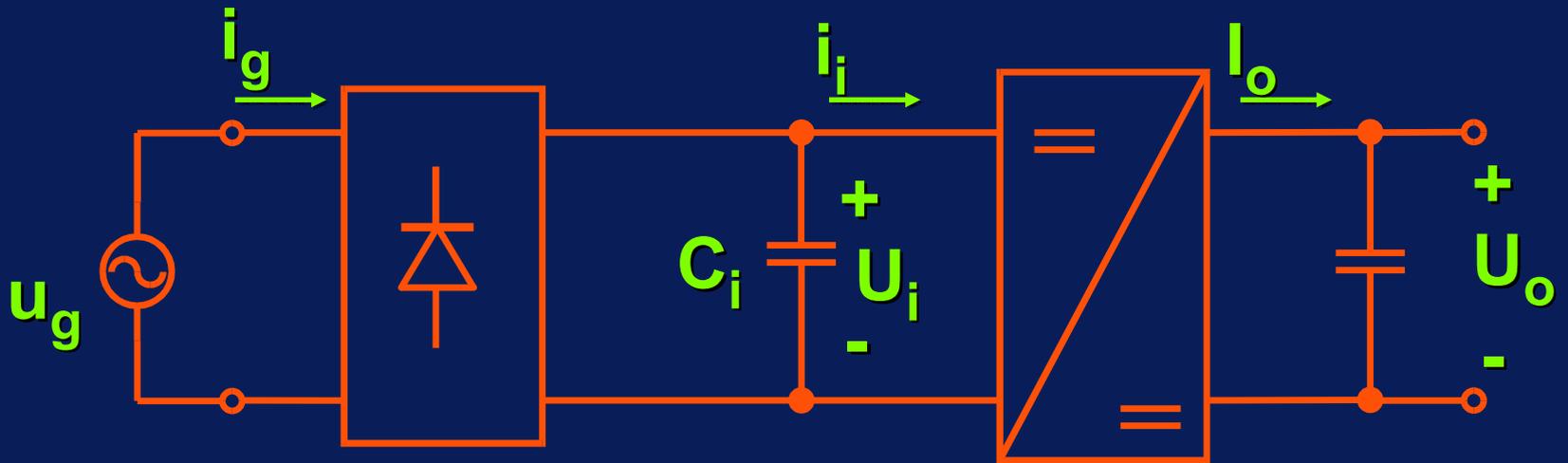
Schema generale di un alimentatore switching



$$i_i = I_i + \Delta i_i$$

I_i = componente continua
 Δi_i = componente alternata
ad AF (ripple)

Schema generale di un alimentatore switching

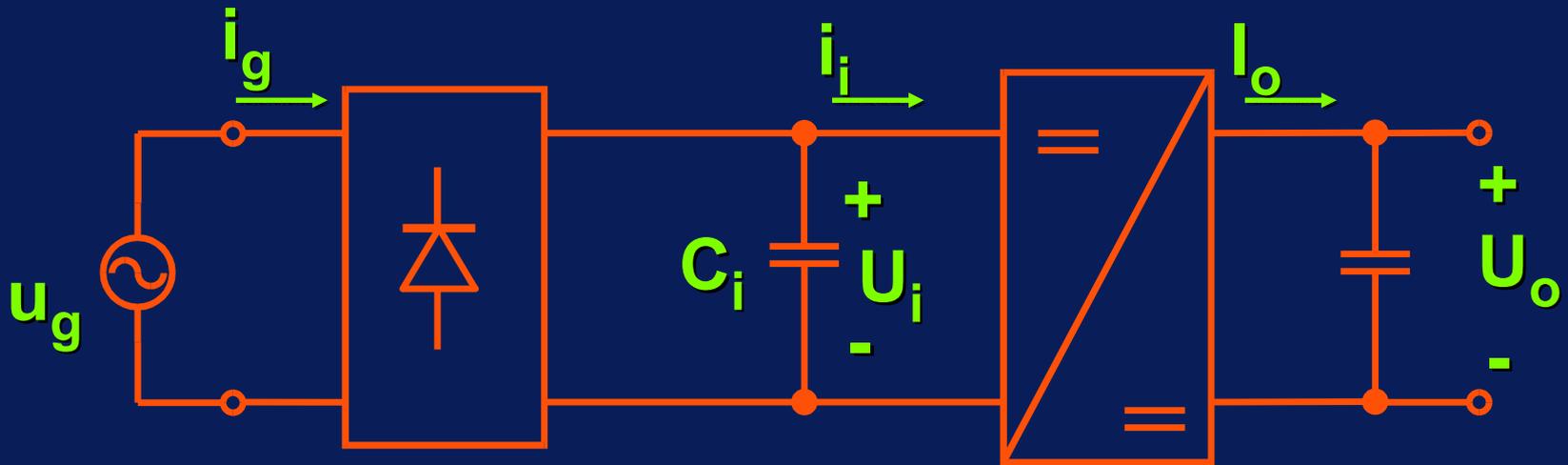


raddrizzatore

convertitore cc/cc
(trasformatore AF)

Note:

Schema generale di un alimentatore switching



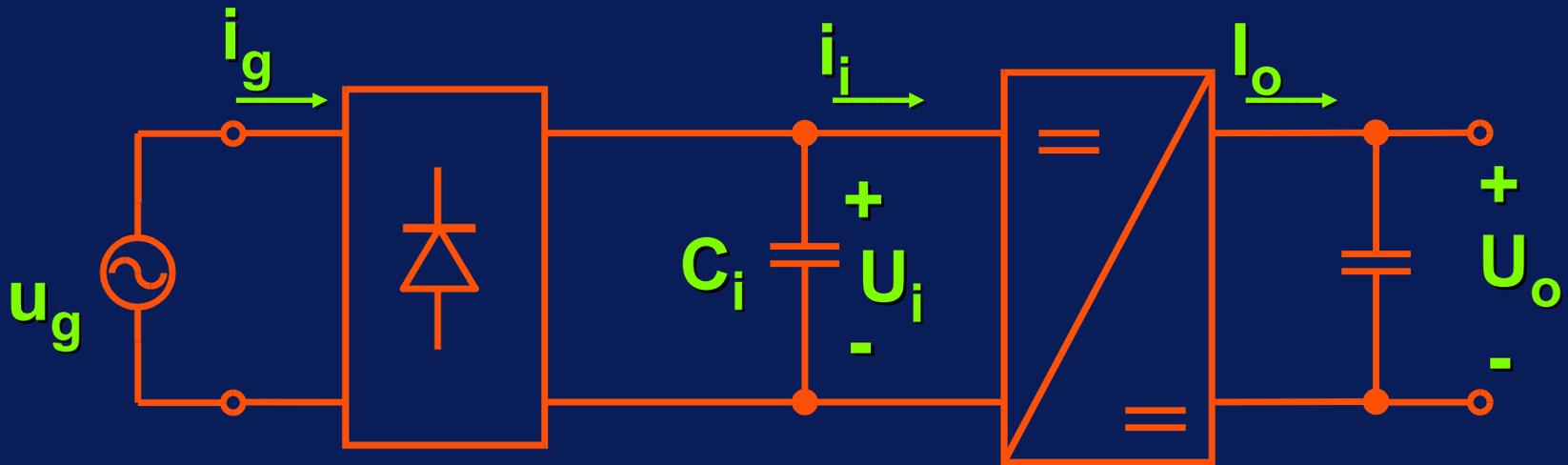
raddrizzatore

convertitore cc/cc
(trasformatore AF)

Note:

- Le componenti armoniche ad alta frequenza di i_i (Δi_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)

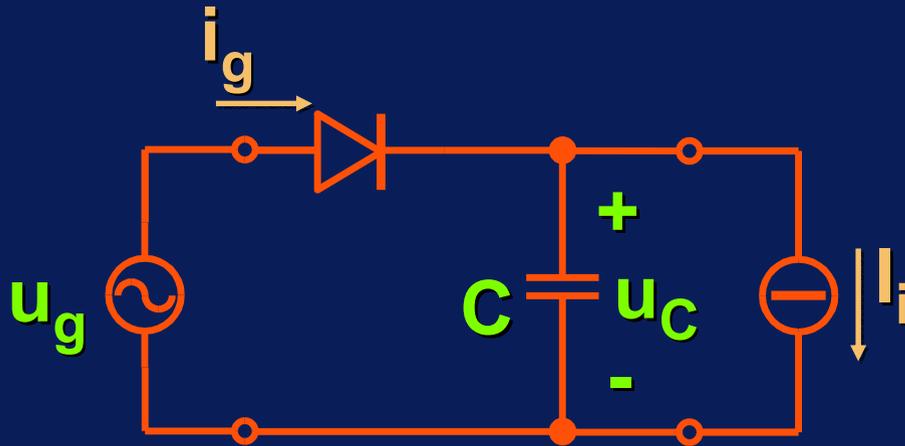
Note:

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

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

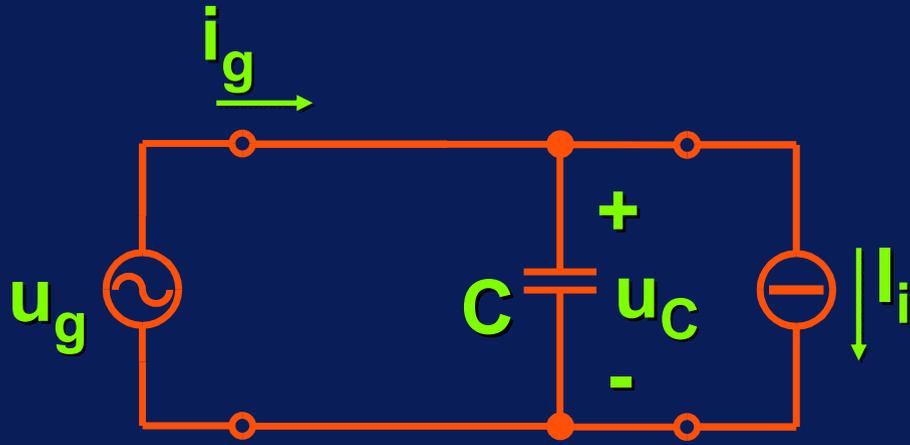
Analisi di un raddrizzatore con filtro capacitivo e carico costituito da un generatore di corrente

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

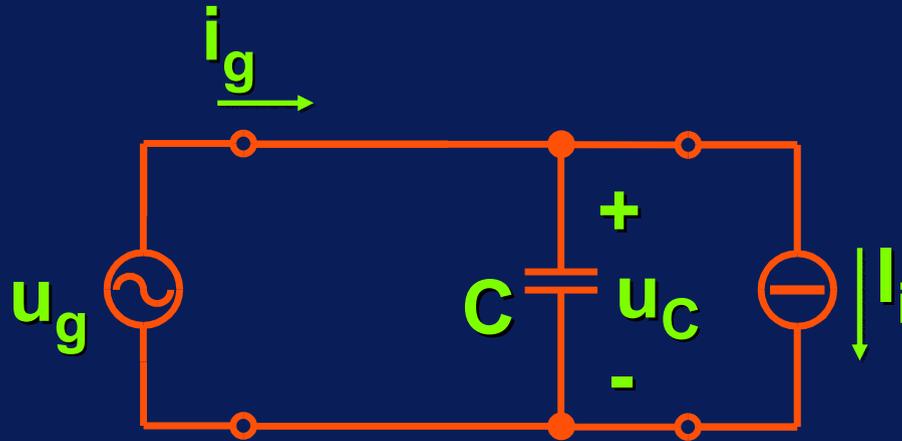


$$u_g = \hat{U}_g \cdot \sin(\omega t)$$

D on

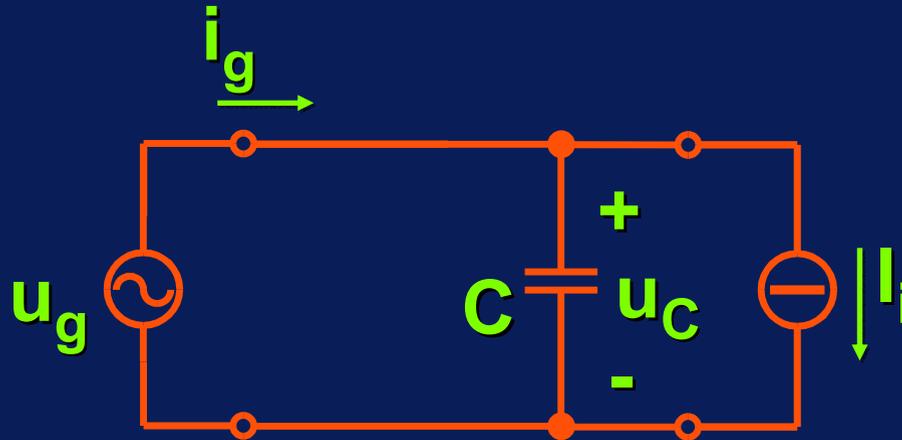


D on



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

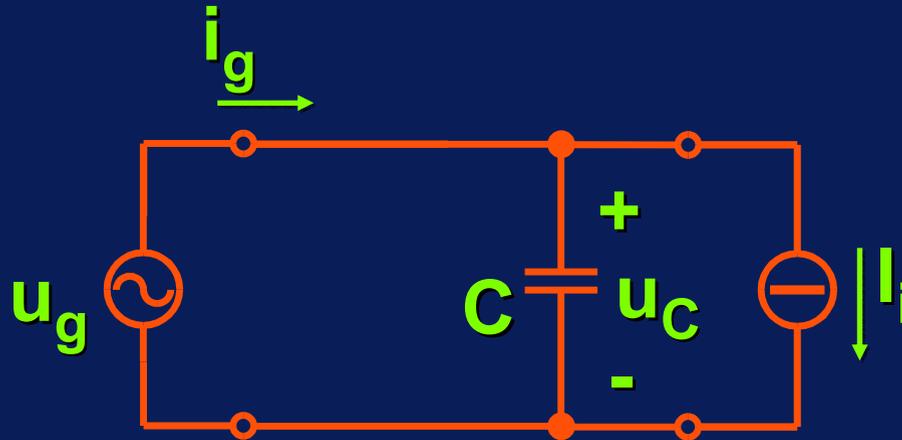
D on



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



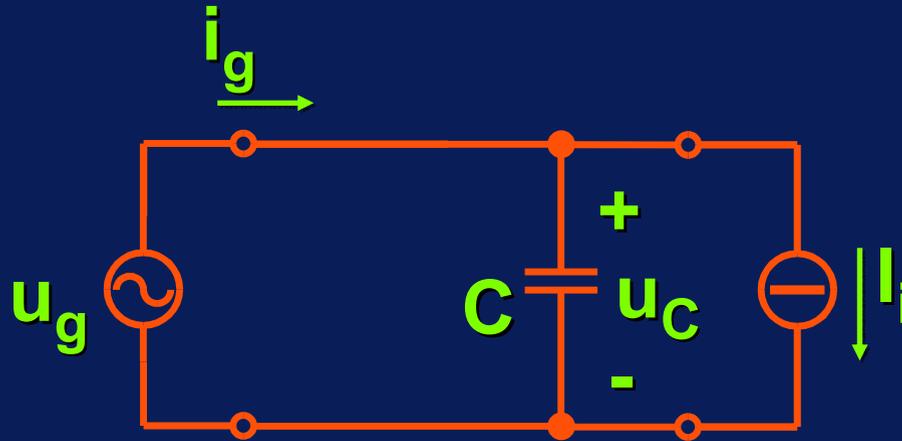
Questo modo di funzionamento inizia quando $u_g = u_C$ e termina quando $i_g = 0$

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

Condizione di fine:

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

D on



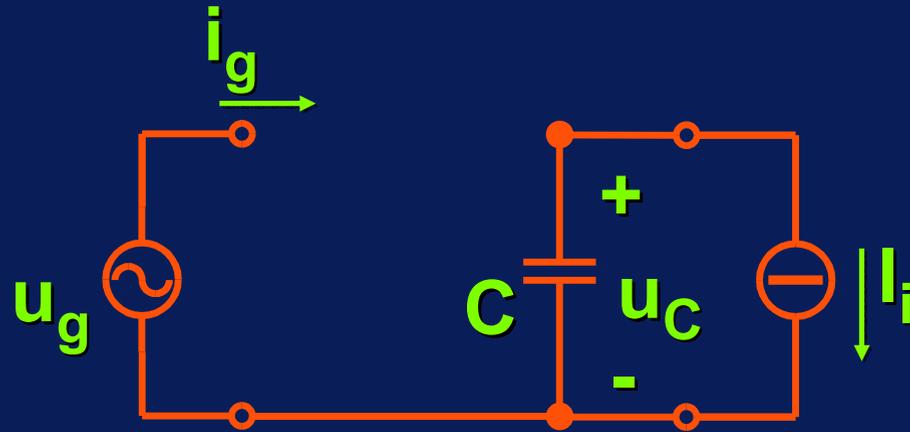
Questo modo di funzionamento inizia quando $u_g = u_C$ e termina quando $i_g = 0$

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

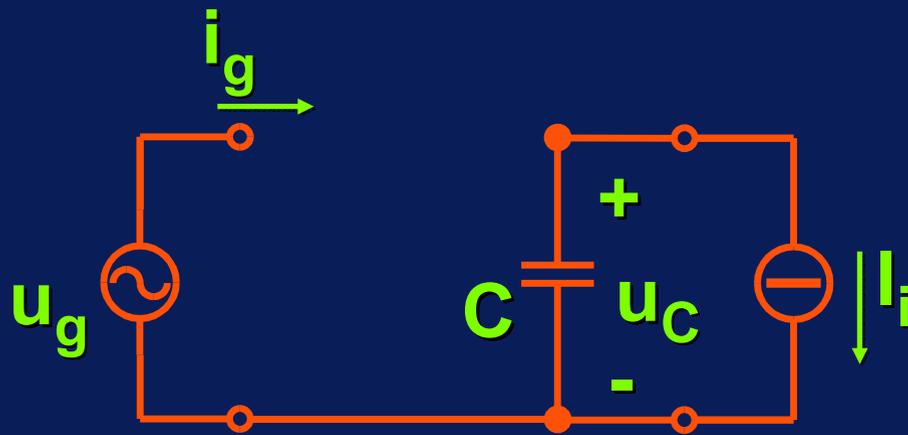
Condizione di fine:

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

D off



D off

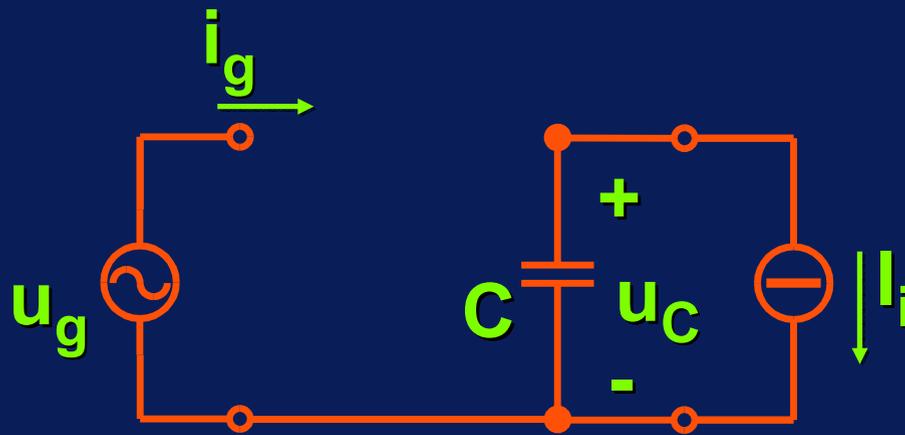


$$i_g = 0$$

$$i_C = -I_i$$

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

D off



$$i_g = 0$$

$$i_C = -I_i$$

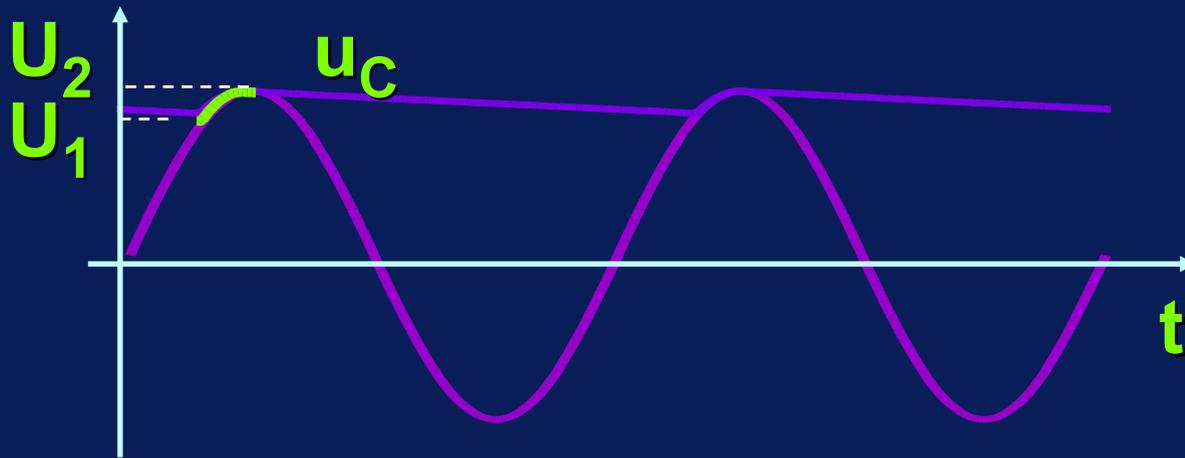
$$u_C = U_2 - \frac{I_i}{C} \cdot t$$

Condizione di fine:

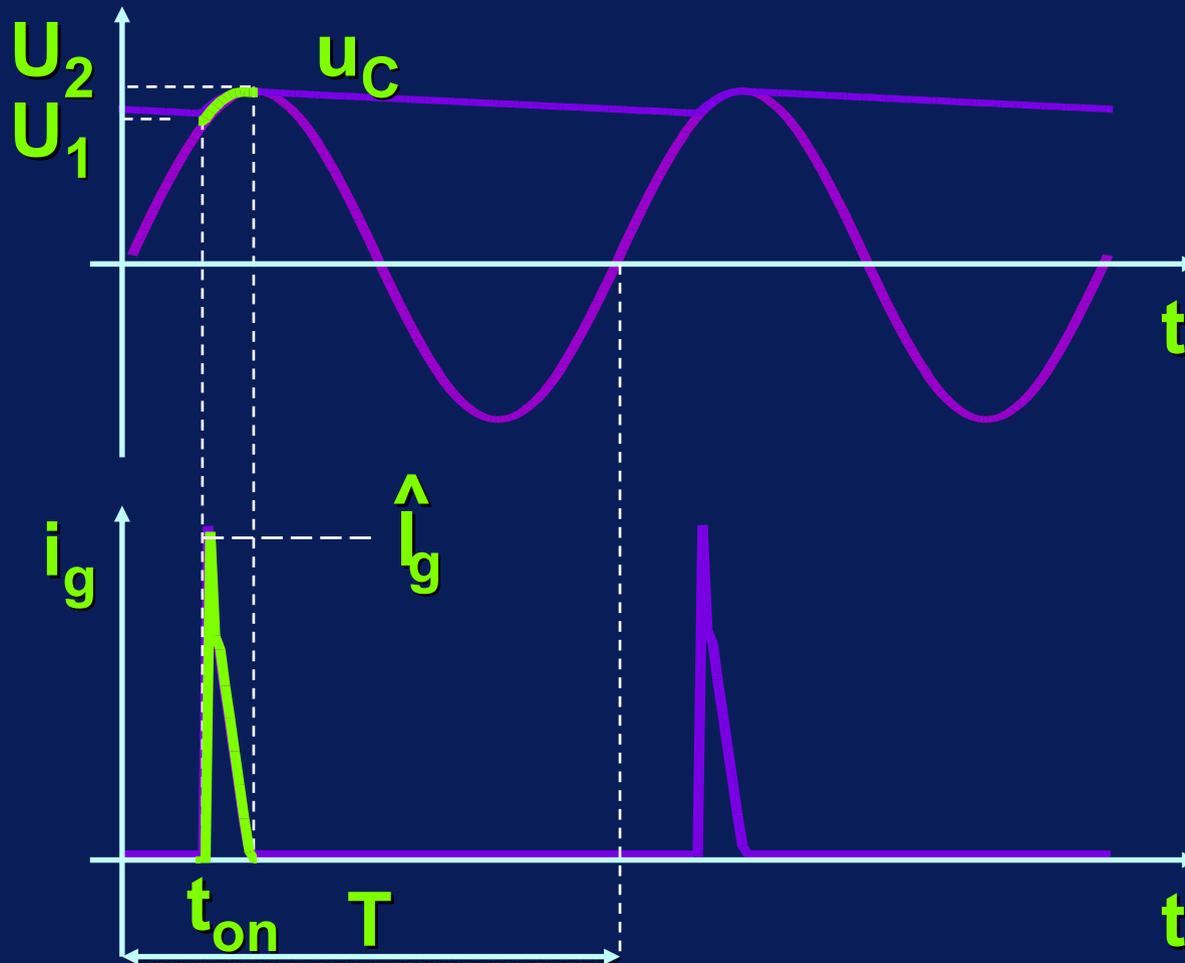
$$u_C = u_g \Rightarrow U_2 - \frac{I_i}{C} \cdot t = \hat{U}_g \sin(\omega t) \Rightarrow u_C = U_1$$

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

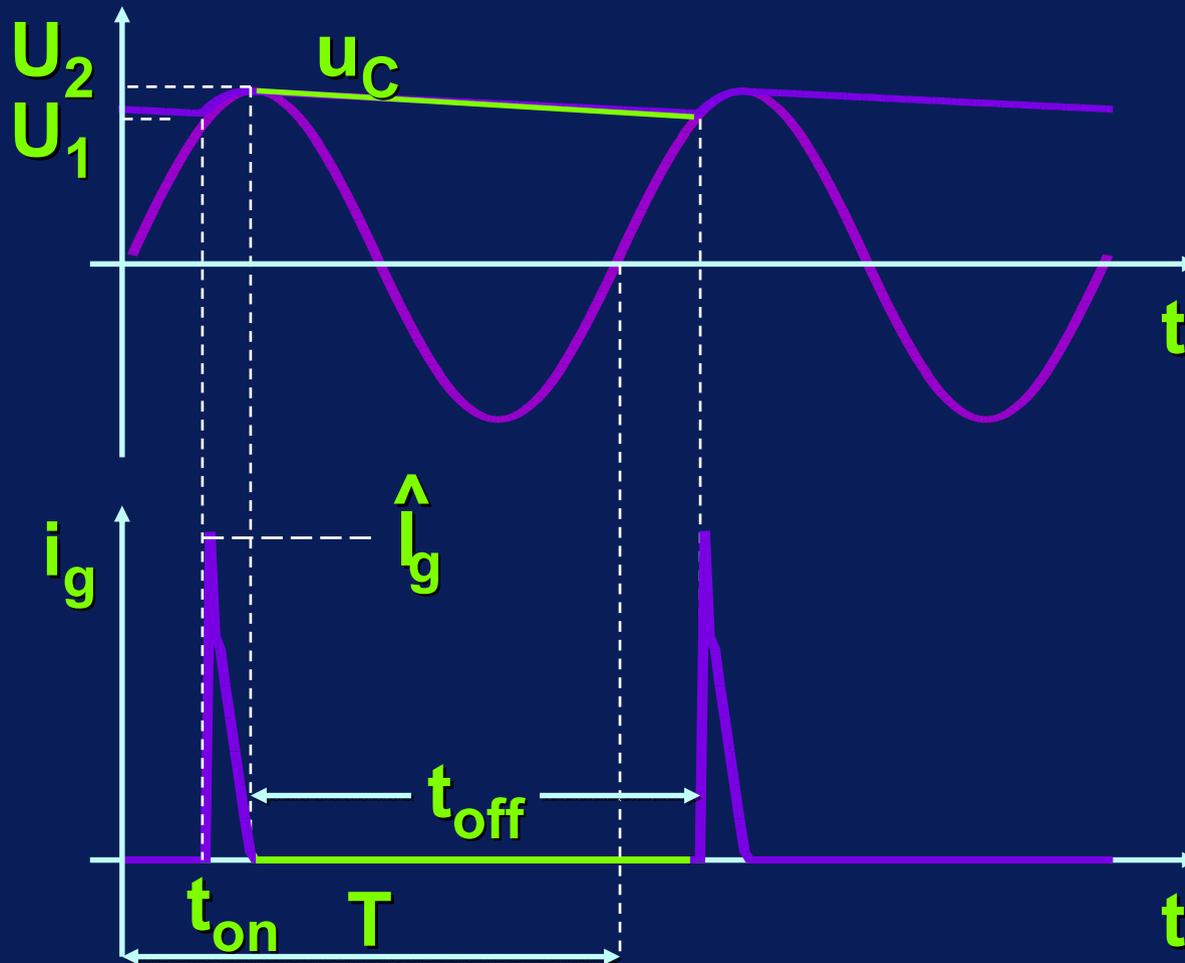
Forme d'onda durante t_{on} (D on)



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



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



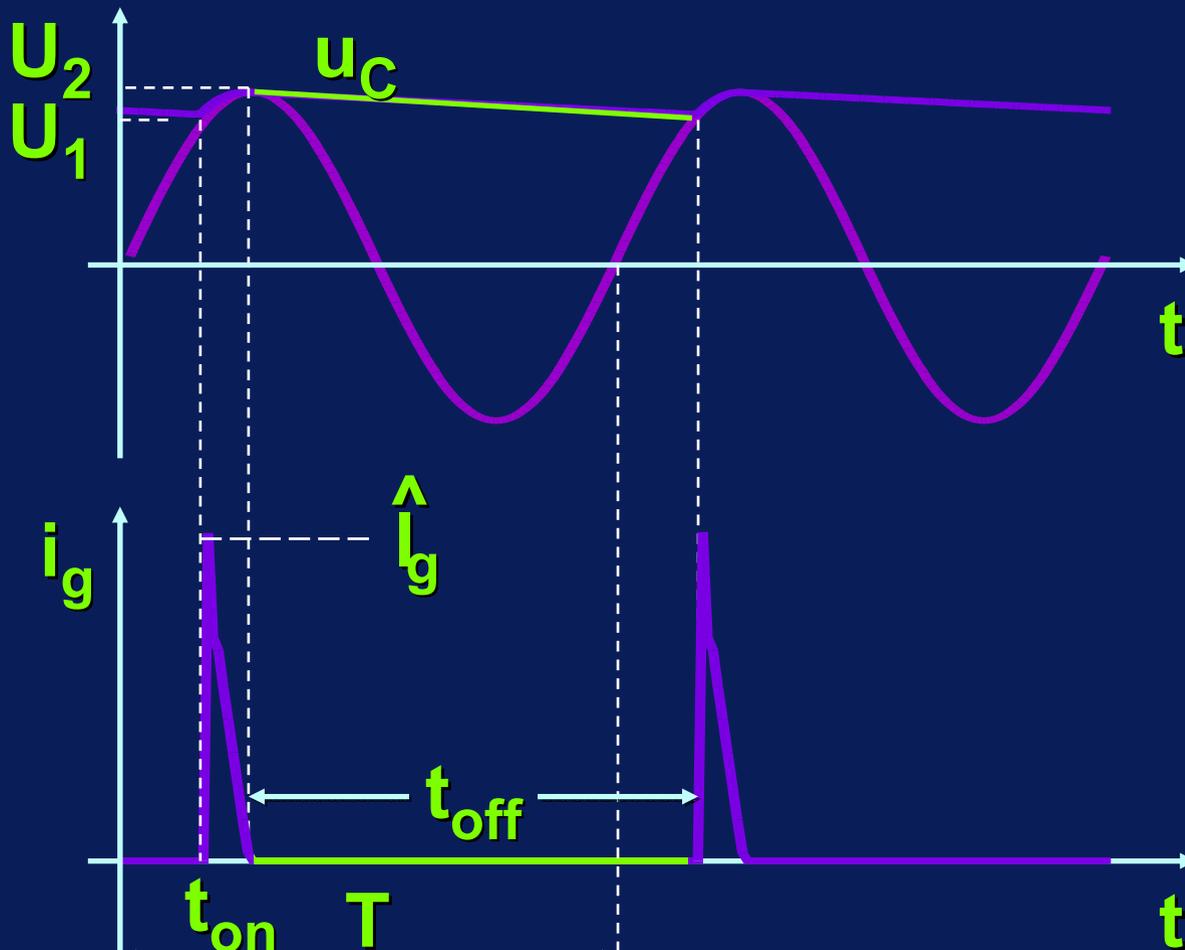
Nota

Nota

Per avere una piccola ondulazione di tensione ΔU si sceglie C grande.

Nota

Per avere una piccola ondulazione di tensione ΔU si sceglie C grande.



Nota

Per avere una piccola ondulazione di tensione ΔU 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 ΔU si sceglie C grande.

Ciò implica che:

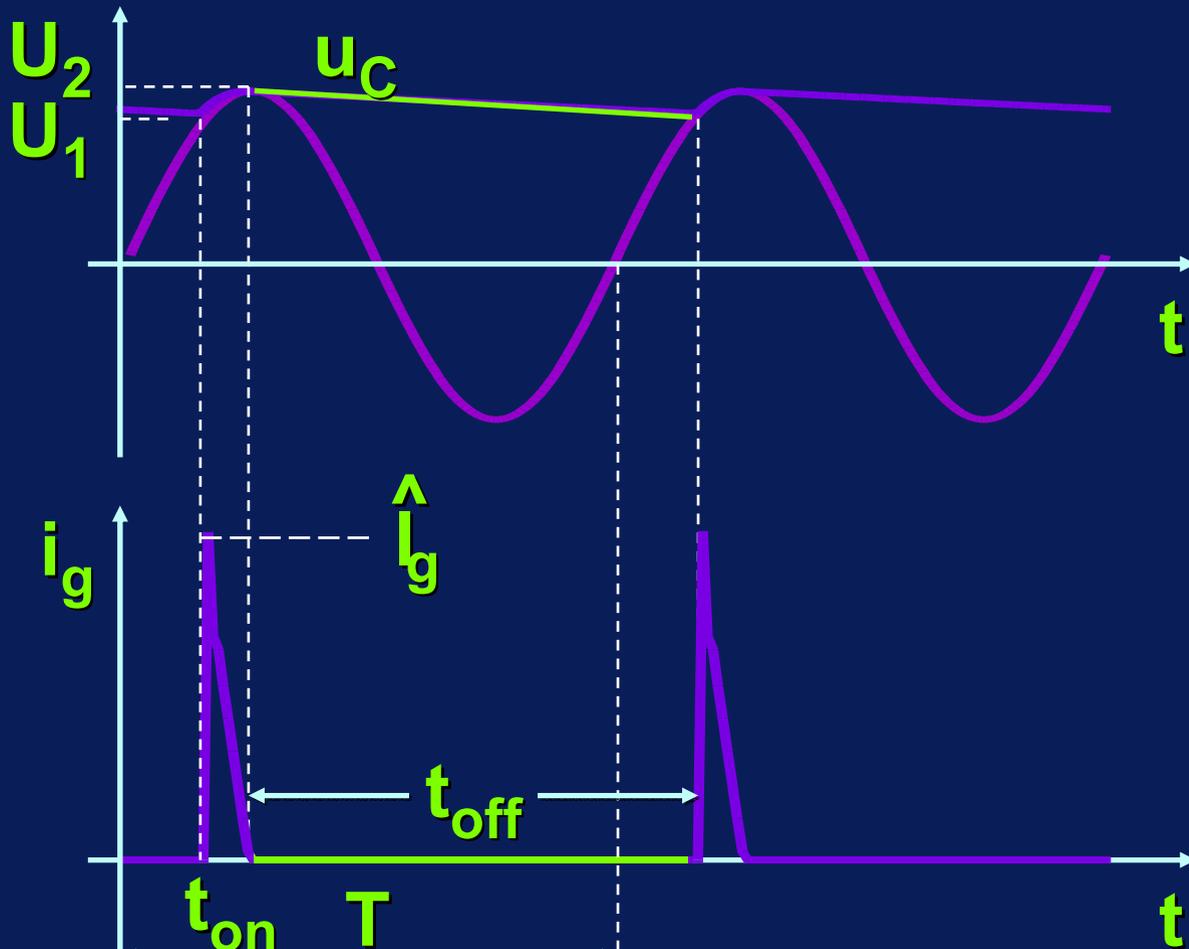
$$\omega C \hat{U}_g \gg I_i \quad (\hat{I}_g \gg I_i)$$

Allora:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_2 \cong \hat{U}_g \\ t_{\text{off}} \cong T \end{array} \right. \Rightarrow U_1 \cong \hat{U}_g - \frac{I_i}{C} \cdot T \Rightarrow \Delta U \cong \frac{I_i}{C} \cdot T$$

Nota

Una piccola ondulazione di tensione u_i (ΔU) implica elevati picchi di corrente dall'alimentazione.



Note

Una piccola ondulazione di tensione u_i (ΔU) 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 (ΔU) implica **elevati picchi di corrente** dall'alimentazione.

Infatti:

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

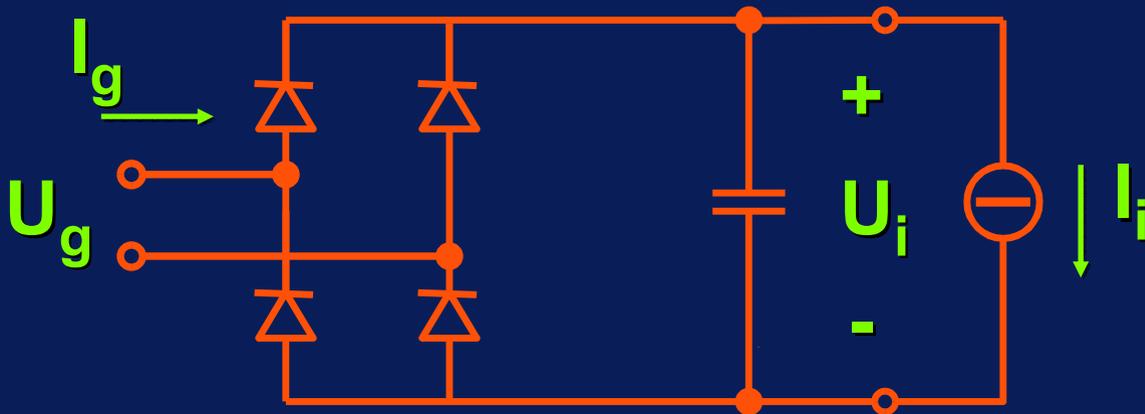
Se t_{on} é piccolo occorre un **elevato impulso di i_g** per fornire la potenza richiesta dal carico

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

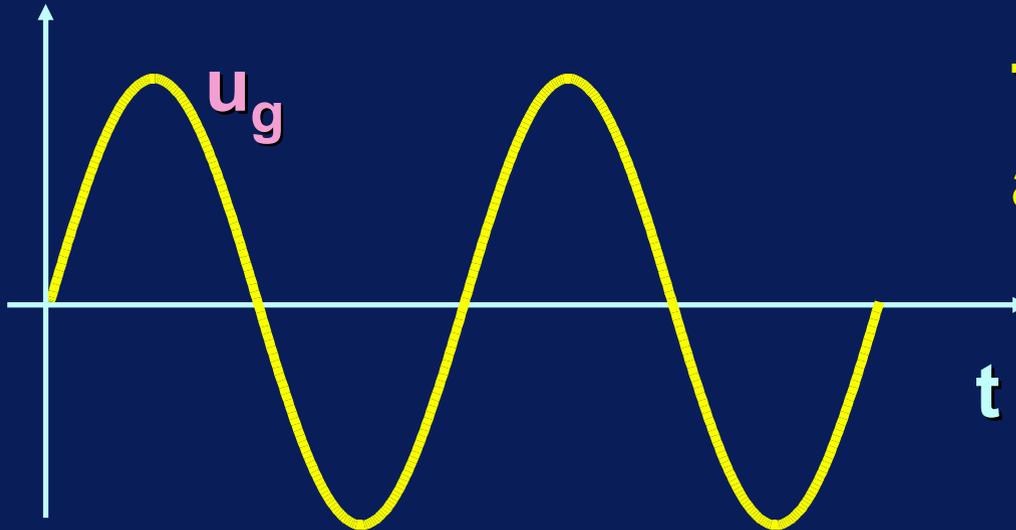


Raddrizzatore a doppia semionda

Forme d'onda tipiche

Raddrizzatore a doppia semionda

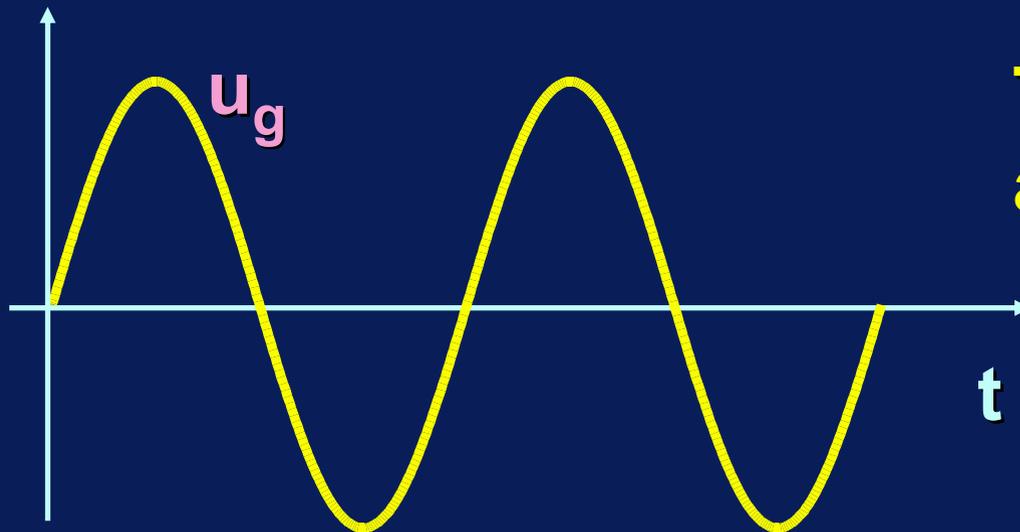
Forme d'onda tipiche



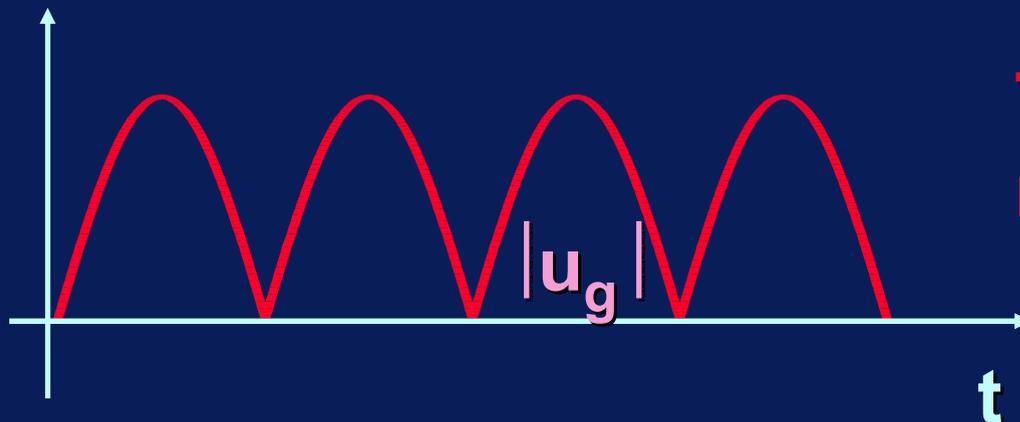
Tensione di
alimentazione

Raddrizzatore a doppia semionda

Forme d'onda tipiche



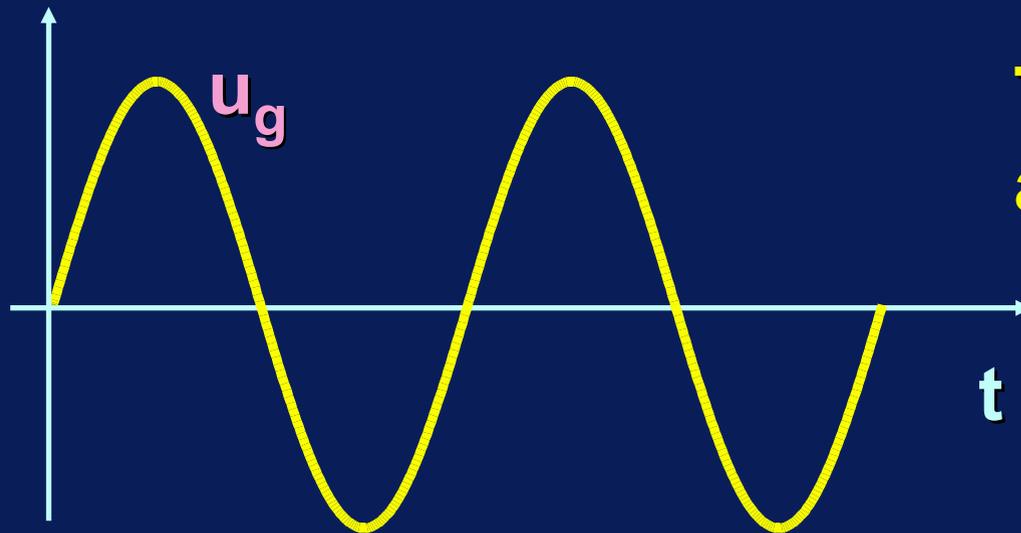
Tensione di alimentazione



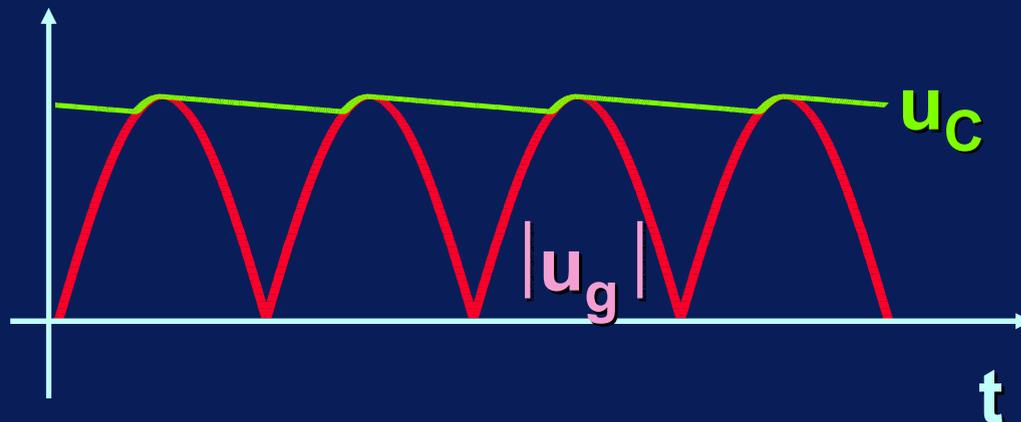
Tensione raddrizzata

Raddrizzatore a doppia semionda

Forme d'onda tipiche



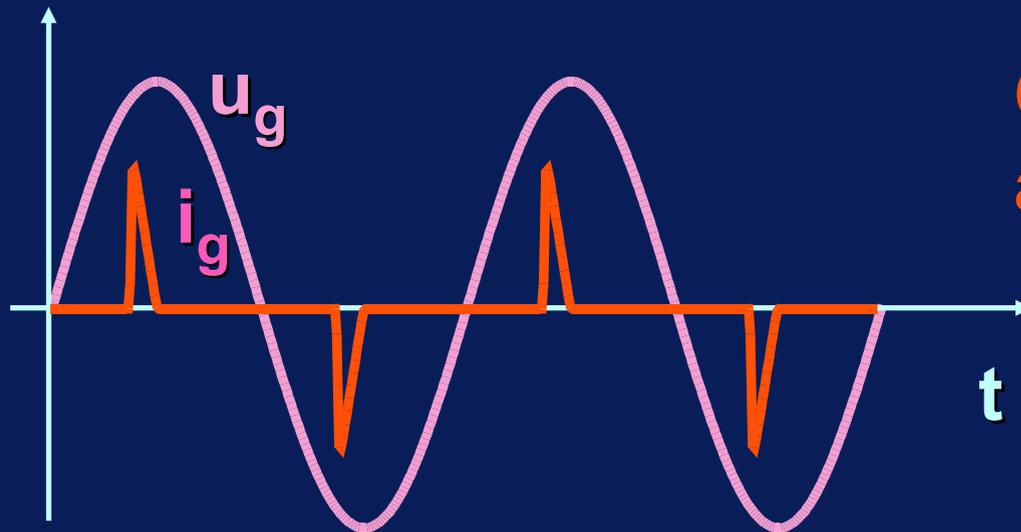
Tensione di alimentazione



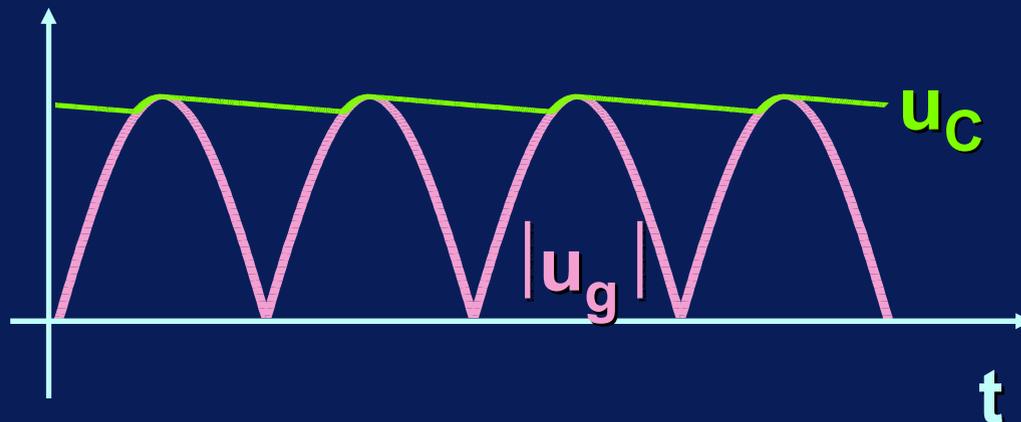
Tensione filtrata

Raddrizzatore a doppia semionda

Forme d'onda tipiche



Corrente di alimentazione



Tensione filtrata

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)

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{\text{Potenza attiva}}{\text{Potenza apparente}} \begin{matrix} \longrightarrow \text{consumo} \\ \searrow \text{dimensionamento} \end{matrix}$$

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

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

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)

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

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

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

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:

$$\cos \varphi_1 \cong 1 \Rightarrow$$

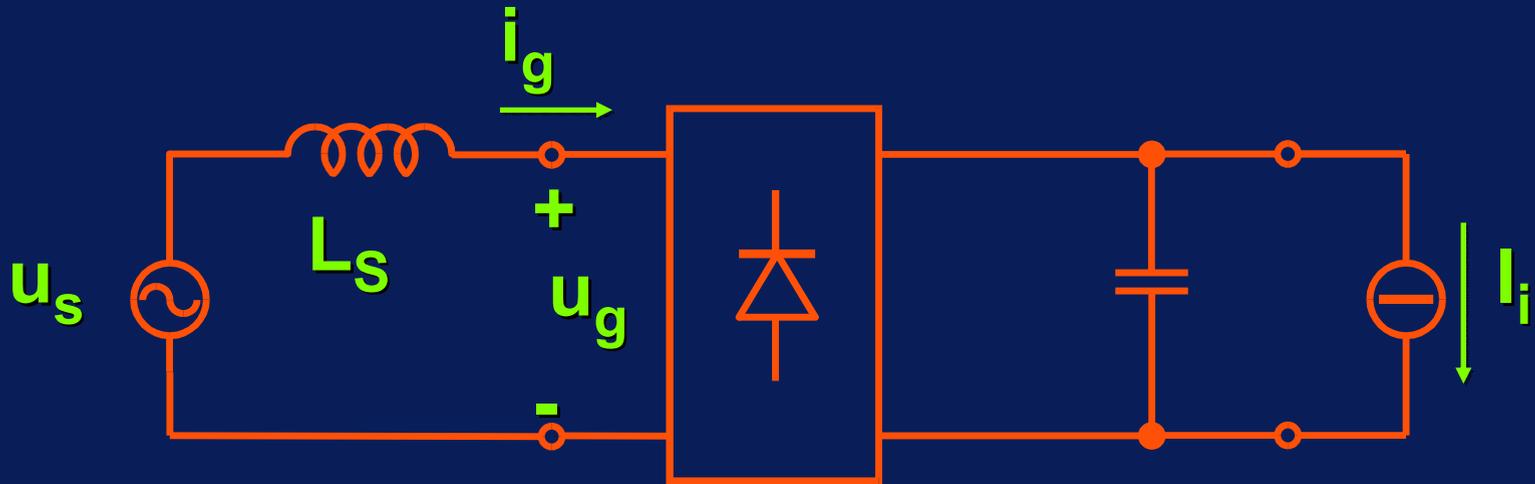
$$PF \cong \frac{1}{\sqrt{1 + (\text{THD})^2}}$$

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

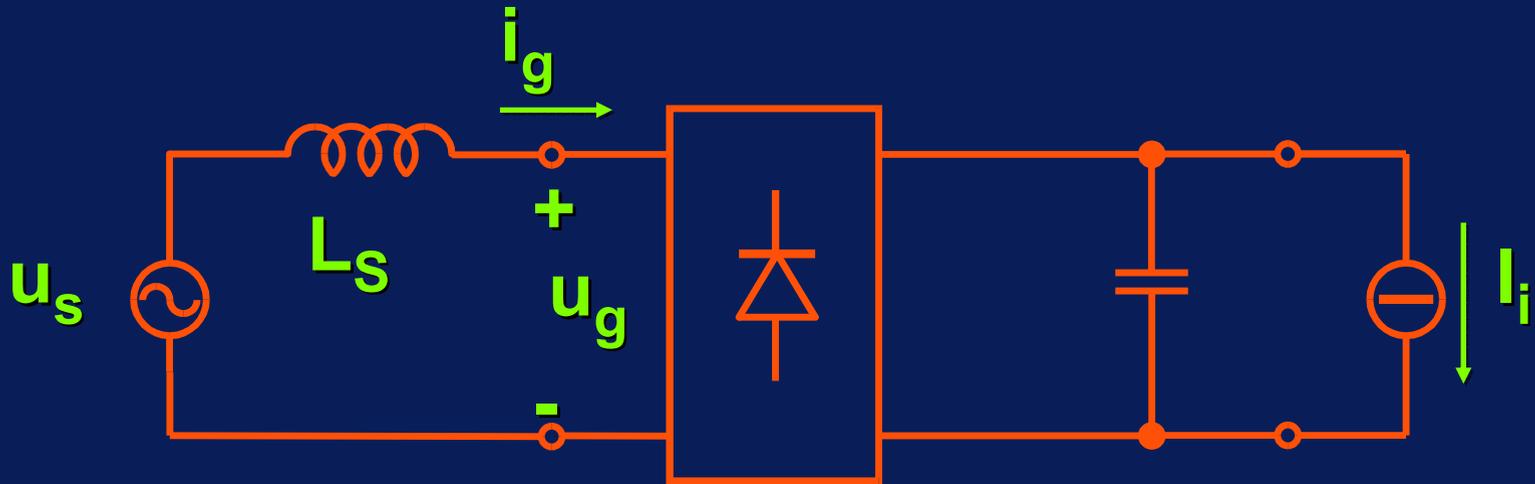
Distorsione di tensione

(Effetto dell'induttanza di linea)

Distorsione di tensione (Effetto dell'induttanza di linea)



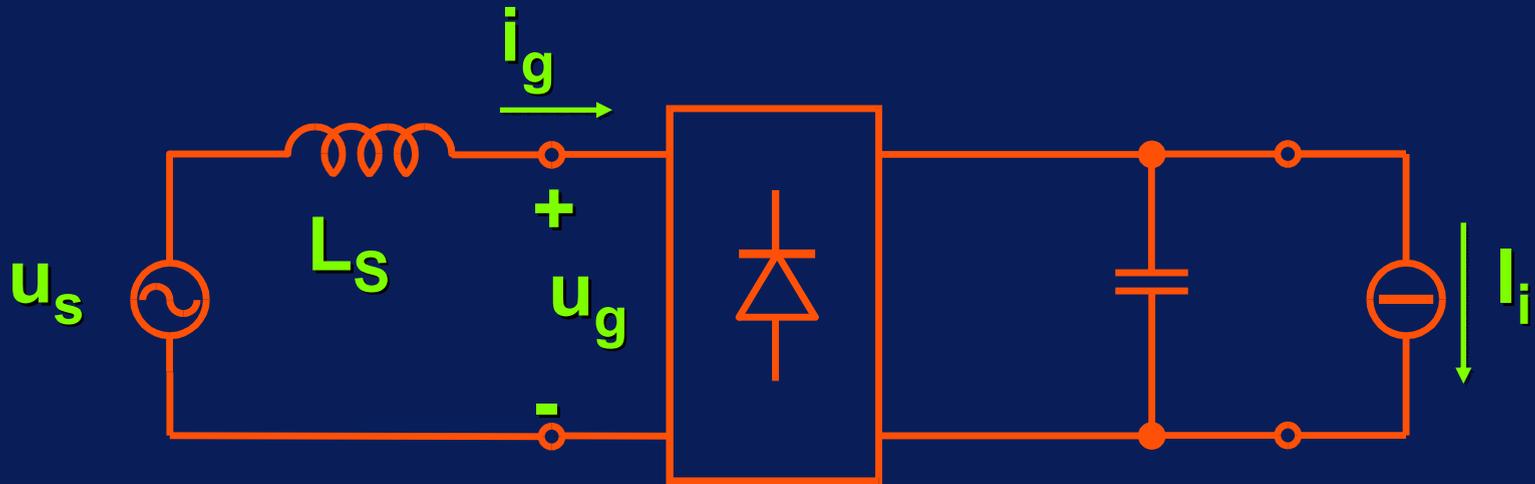
Distorsione di tensione (Effetto dell'induttanza di linea)



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)

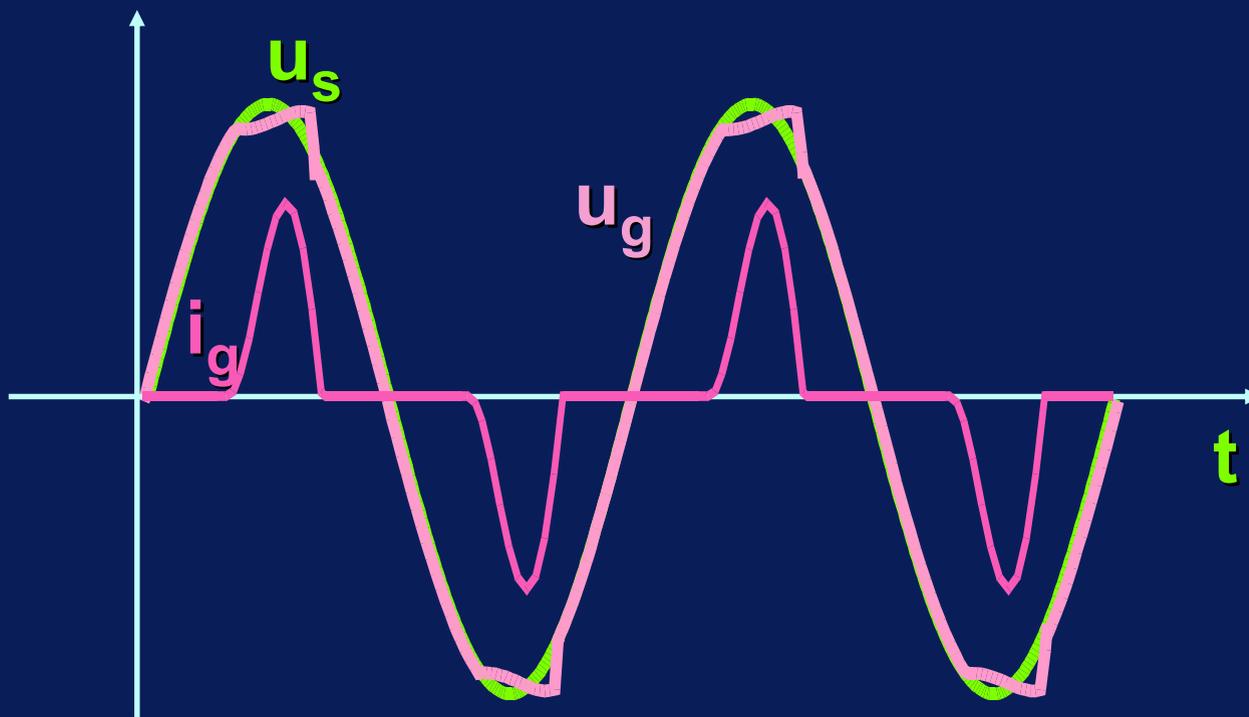


Tenendo conto dell'induttanza di linea si ha:

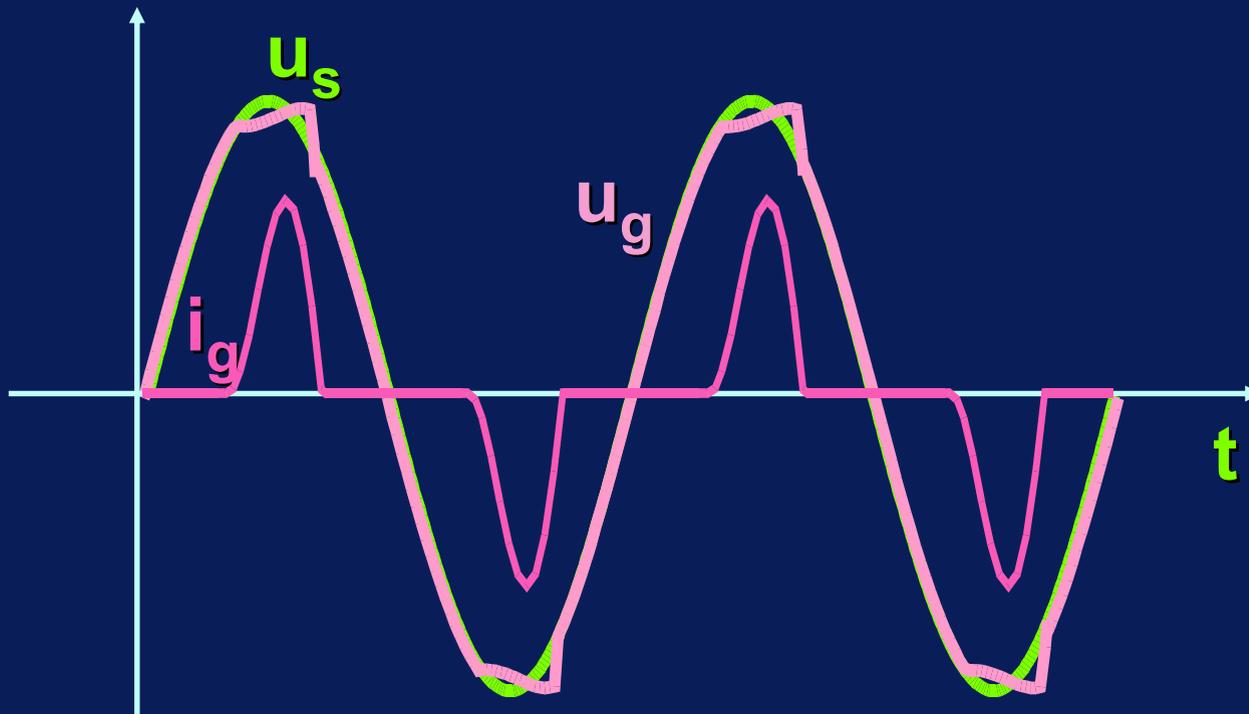
$$u_g = u_s - L_s \cdot \frac{di_g}{dt}$$

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)**

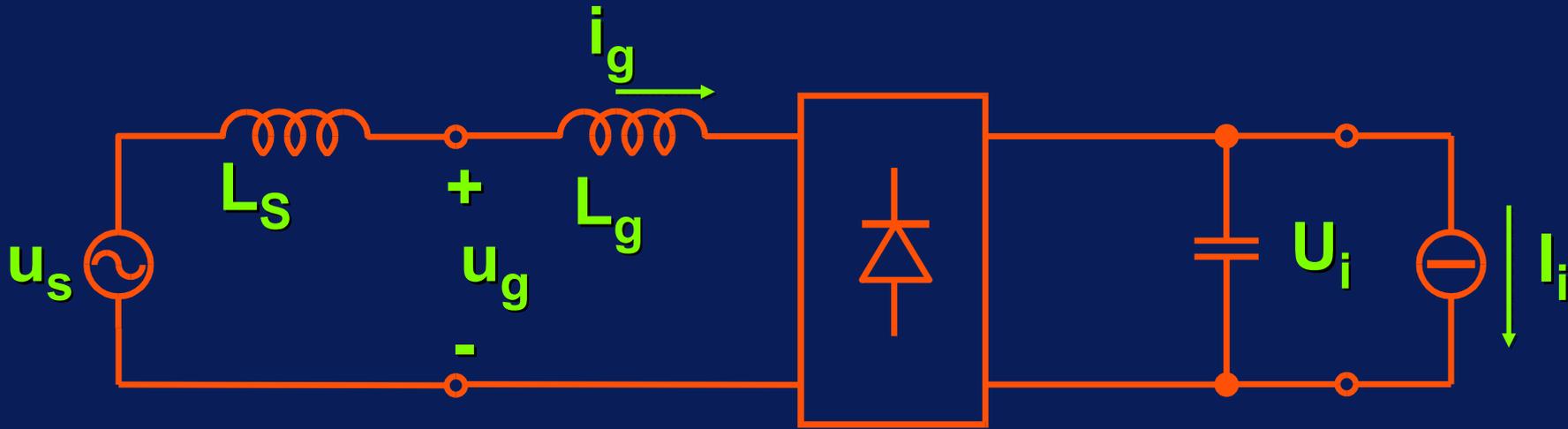
Soluzioni:

Filtri passivi

Controllo attivo del Power Factor (PFC)

Filtri passivi

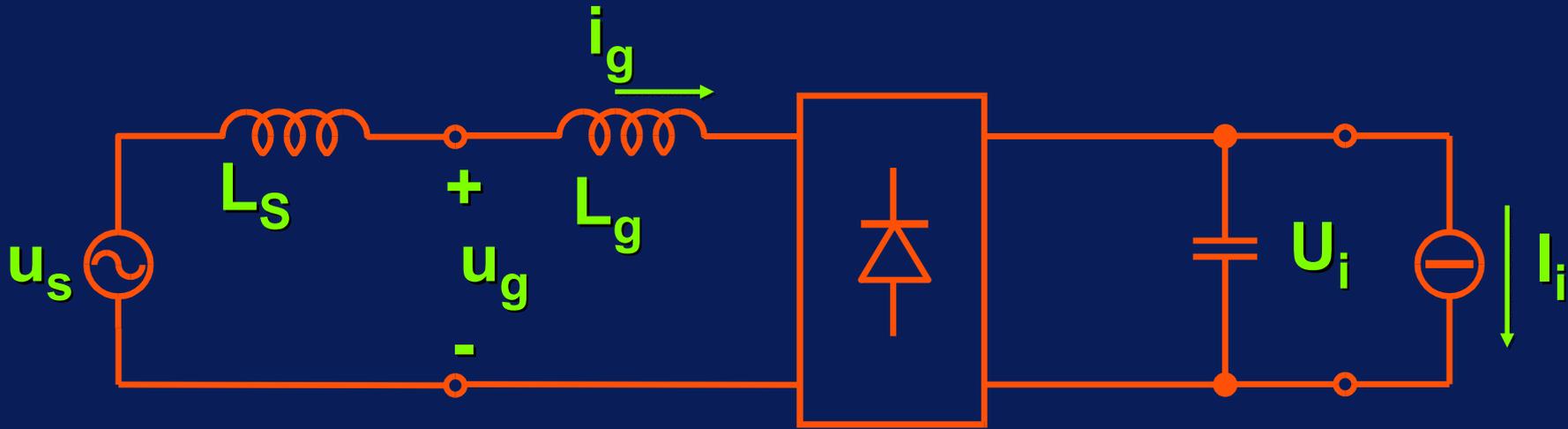
Filtri passivi



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

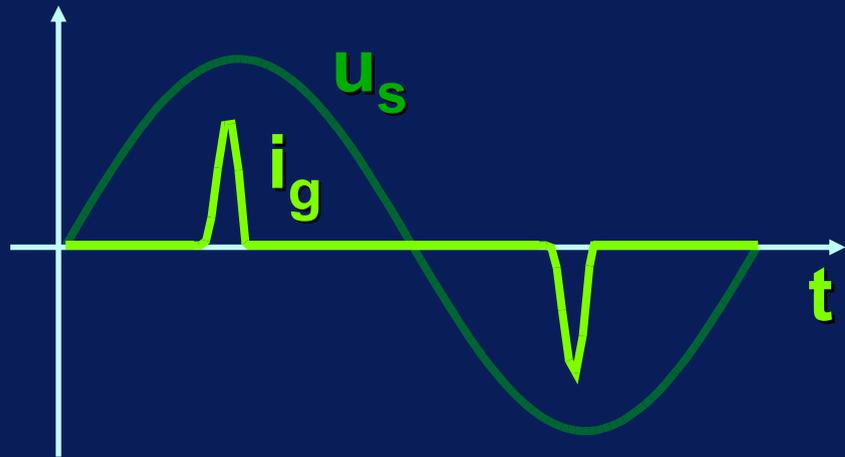
Il più semplice filtro passivo è costituito da un'induttanza all'ingresso del convertitore

Filtri passivi

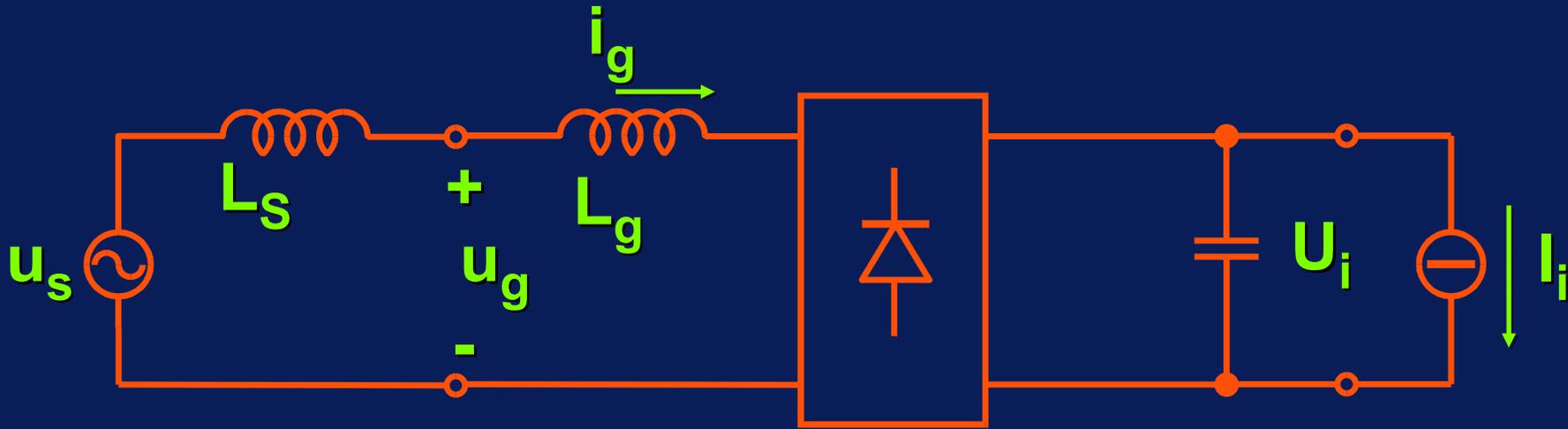


$$L_s = 0.2\text{mH}$$

$$L_g = 0$$



Filtri passivi



$$L_s = 0.2\text{mH}$$

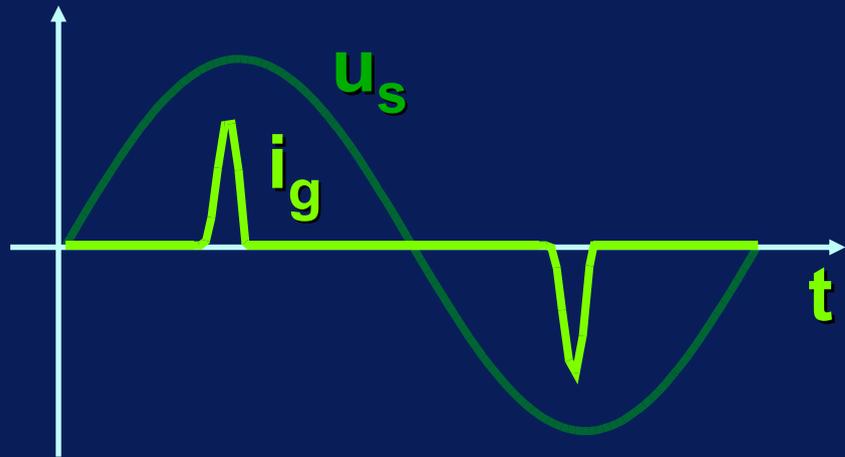
$$L_g = 0$$

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

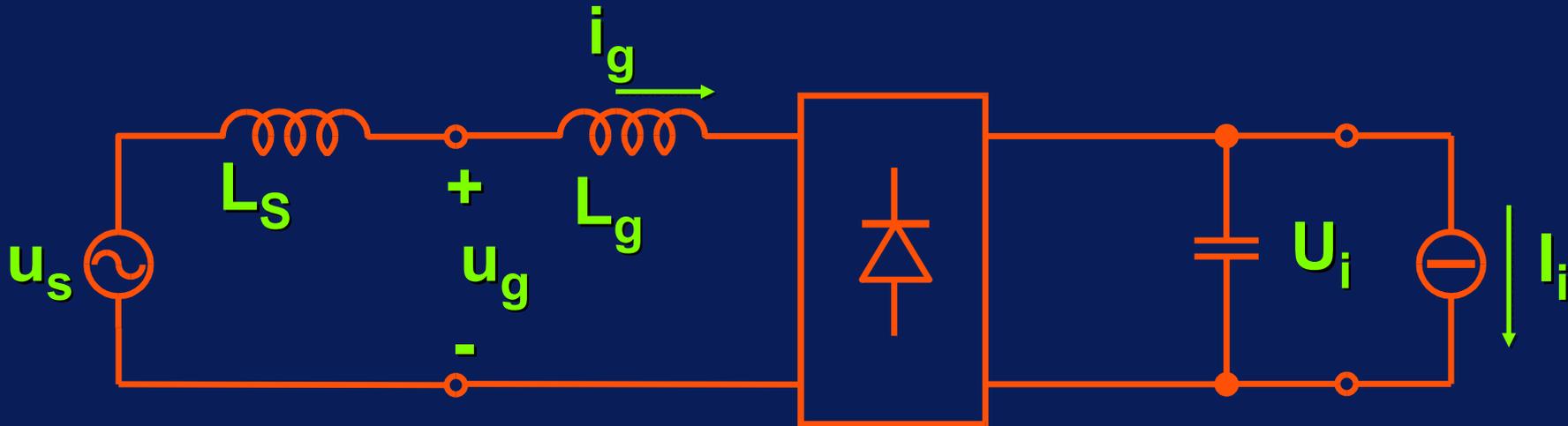
$$\text{THD}(i_g) = 180\%$$

$$\text{PF} = 0.48$$

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



Filtri passivi



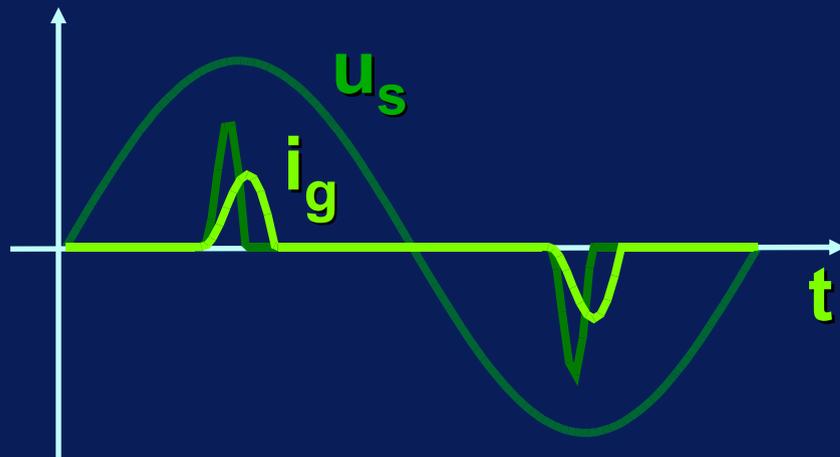
$$L_s = 0.2\text{mH} \quad L_g = 1.8\text{mH}$$

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

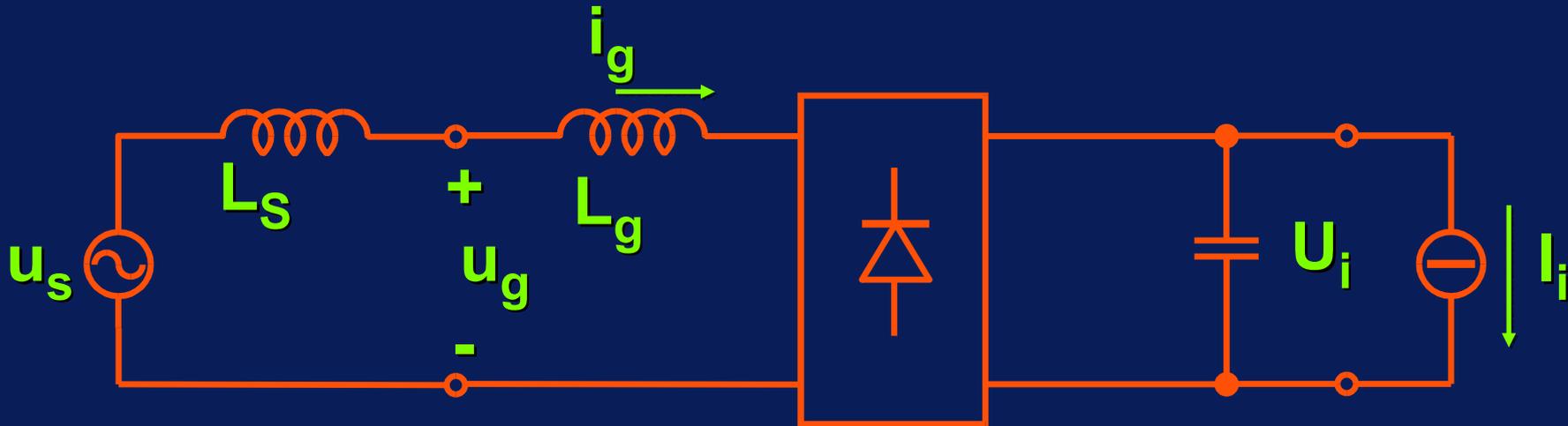
$$\text{THD}(i_g) = 147\%$$

$$\text{PF} = 0.56$$

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



Filtri passivi



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

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

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

$$\text{PF} = 0.7$$

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

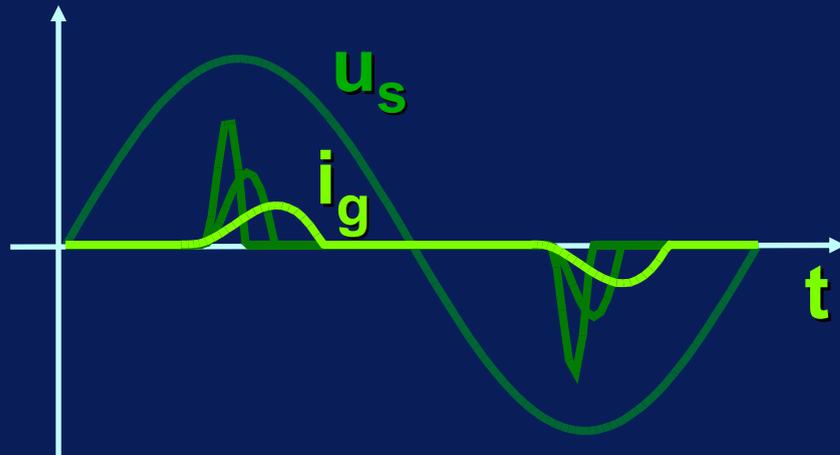


Tabella comparativa

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**