

Corso di
ELETTRONICA INDUSTRIALE

***“Normative europee sulle
armoniche in rete.
Power Factor Correctors”***

Argomenti trattati

- **Cenni sulle normative relative all'impatto armonico dei carichi**
- **Dispositivi per la correzione del fattore di potenza (Power Factor Correctors, PFC)**
- **Struttura di un PFC tipo Boost**
- **Dimensionamento del filtro di uscita di un PFC**
- **PFC di tipo flyback**

Limiti Normativi

- **L'Unione Europea (UE) si è dotata di norme armonizzate al fine di garantire l'uniformità delle caratteristiche dei prodotti immessi nel mercato europeo**
- **Tra queste, le EN 61000-3 limitano l'impatto armonico dei carichi, definendo i valori massimi della distorsione di tensione e/o corrente ammessa**
- **Normative simili vengono applicate in altri mercati (USA, Giappone)**

IEC 1000-3-2

Carichi con corrente nominale <16 A / fase

A: carichi generici

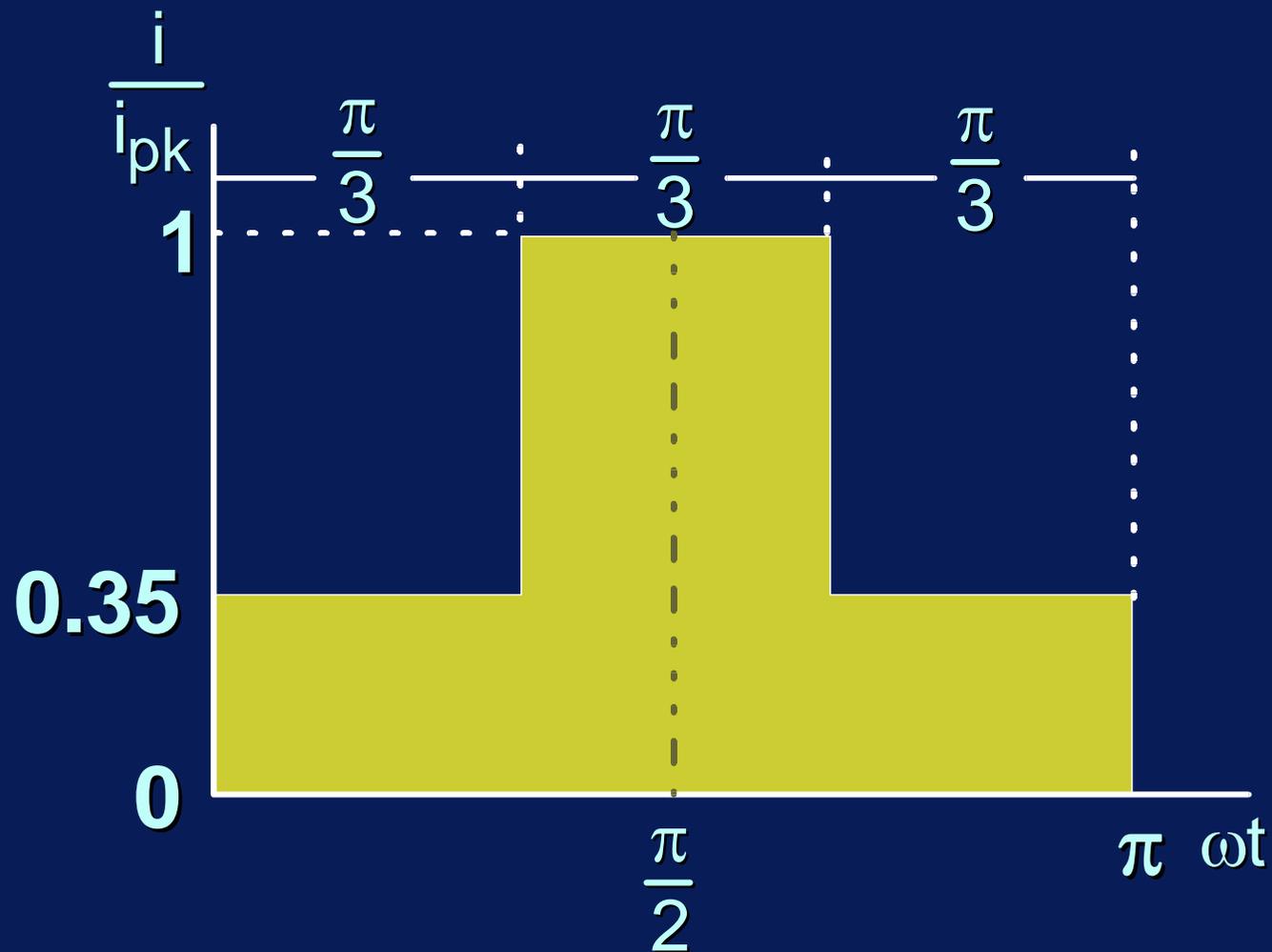
B: macchine utensili portatili

C: sistemi d'illuminazione

D: carichi che assorbono correnti con forme d'onda "speciali"

Per ogni classe vengono definiti i valori massimi (relativi o assoluti) delle correnti armoniche ammesse

Forma d'onda "speciale"



Sono in classe D i carichi la cui corrente (in valore assoluto) permane entro l'area evidenziata per oltre il 95% del tempo

LIMITI per le Classi A e B

Ordine delle armoniche	Classe A	Classe B
Dispari	[A]	[A]
3	2.30	3.45
5	1.14	1.71
7	0.77	1.155
9	0.40	0.60
11	0.33	0.495
13	0.21	0.315
$15 \leq n \leq 39$	$2.25/n$	$3.375/n$
Pari		
2	1.08	1.62
4	0.43	0.645
6	0.30	0.45
$8 \leq n \leq 40$	$1.84/n$	$2.76/n$

LIMITI per la Classe C (> 25 W)

Ordine delle armoniche	Valore massimo espresso come percentuale della componente fondamentale della corrente di ingresso
n	
2	2
3	$30 \times \lambda$
5	10
7	7
9	5
$11 \leq n \leq 39$	3

λ è il fattore di potenza

LIMITI per la Classe D

Ordine delle armoniche	$75 \text{ W} < P < 600 \text{ W}$ [mA/W]	$P > 600 \text{ W}$ [A]
n		
3	3.4	2.30
5	1.9	1.14
7	1.0	0.77
9	0.5	0.40
11	0.35	0.33
13	0.296	0.21
$15 \leq n \leq 39$	$3.85/n$	$2.25/n$

Nessuna limitazione per apparecchi con $P < 75 \text{ W}$

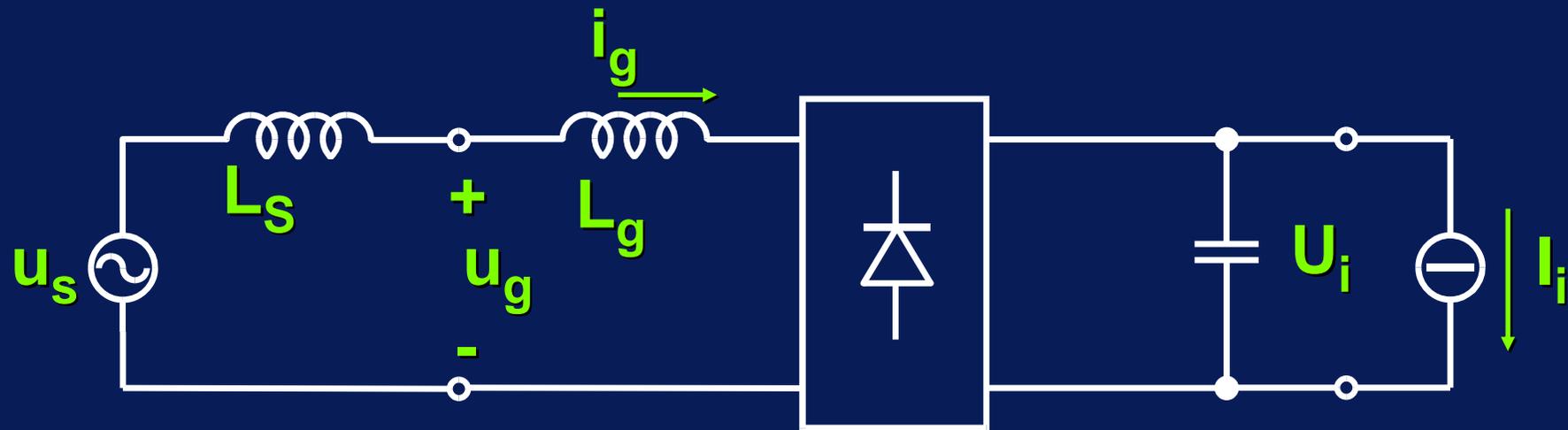
NOTE

- I carichi vanno compensati individualmente
- La classe D è la più penalizzata (limiti espressi in termini relativi alla fondamentale per $P < 600 \text{ W}$)
- Può essere conveniente adottare metodi correttivi per rientrare in classe A (limiti espressi in termini assoluti)

Motivazioni delle normative

- **diffusione crescente dei carichi distorcenti**
- **peggiore utilizzazione delle reti (basso fattore di potenza)**
- **sovraccarico del filo neutro (sistemi trifase con carichi distorcenti monofase)**
- **distorsione della tensione di rete**
 - **errori di misura**
 - **interventi delle protezioni**
 - **malfunzionamento dei carichi**

Corrente assorbita da un raddrizzatore



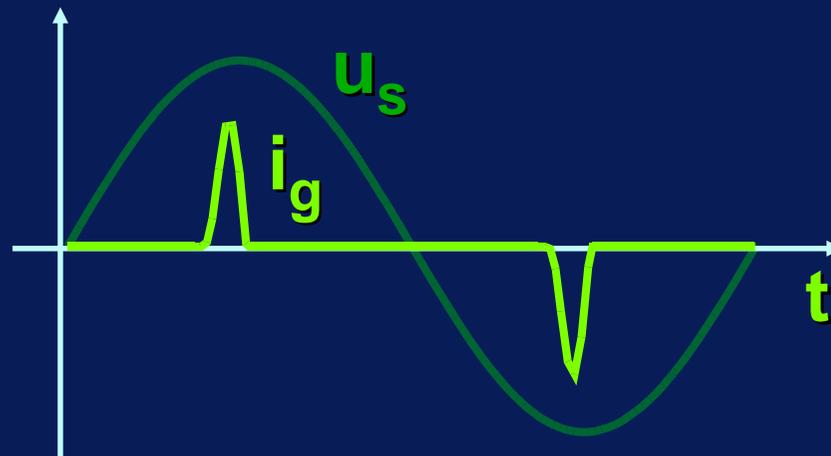
$$L_s = 0.2\text{mH} \quad L_g = 0$$

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

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

$$\text{PF} = 0.48$$

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



Dispositivi di correzione attiva del fattore di potenza

PFC - Power Factor Correctors

PFP - Power Factor Pre-regulators

- Assorbono dalla rete a c.a. una corrente poco distorta ed erogano una tensione continua pre-regolata (precisione limitata)
- Gli schemi non isolati tipicamente forniscono una tensione continua di valore elevato (centinaia di V)

**NOTA: Fattore di potenza di un
carico resistivo**

NOTA: Fattore di potenza di un carico resistivo

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{R I^2}{UI} = \frac{R I}{U}$$

NOTA: Fattore di potenza di un carico resistivo

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{R I^2}{U I} = \frac{R I}{U}$$

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}$$

NOTA: Fattore di potenza di un carico resistivo

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{RI^2}{UI} = \frac{RI}{U}$$

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{U_n^2}{R^2}}$$

NOTA: Fattore di potenza di un carico resistivo

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{RI^2}{UI} = \frac{RI}{U}$$

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{U_n^2}{R^2}} = \frac{1}{R} \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2}$$

NOTA: Fattore di potenza di un carico resistivo

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{RI^2}{UI} = \frac{RI}{U}$$

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{U_n^2}{R^2}} = \frac{1}{R} \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2} = \frac{U}{R}$$

NOTA: Fattore di potenza di un carico resistivo

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{RI^2}{UI} = \frac{RI}{U}$$

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{U_n^2}{R^2}} = \frac{1}{R} \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2} = \frac{U}{R}$$



Per un carico resistivo **PF = 1** anche se la tensione è deformata

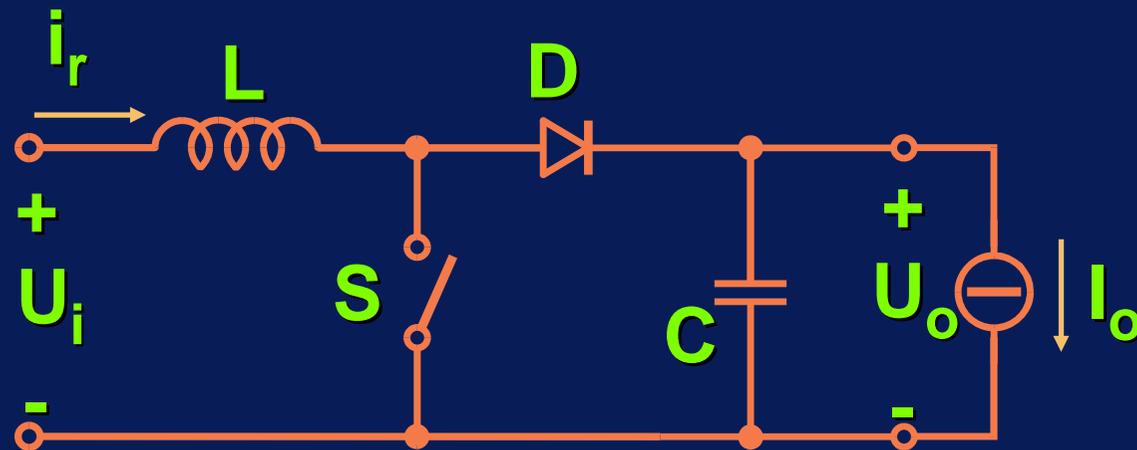
Controllo dei PFC

Obiettivo del controllo di un PFC (o PFP) è di imprimere i_g proporzionale a u_g (carico resistivo equivalente), così da ottenere **PF = 1**

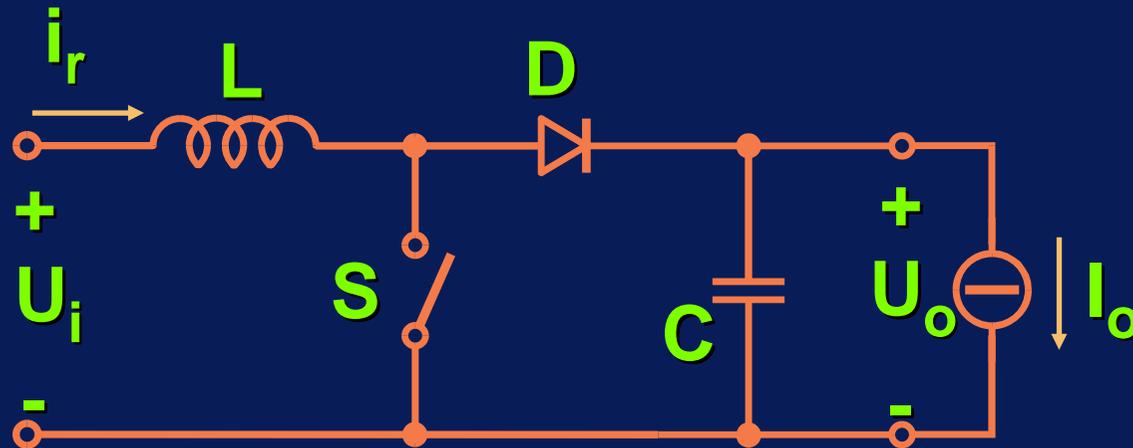
Vantaggi

- conformità alle norme
- migliore utilizzazione dei componenti (minimi stress di corrente e tensione)

Convertitore cc/cc di tipo Boost



Convertitore cc/cc di tipo Boost

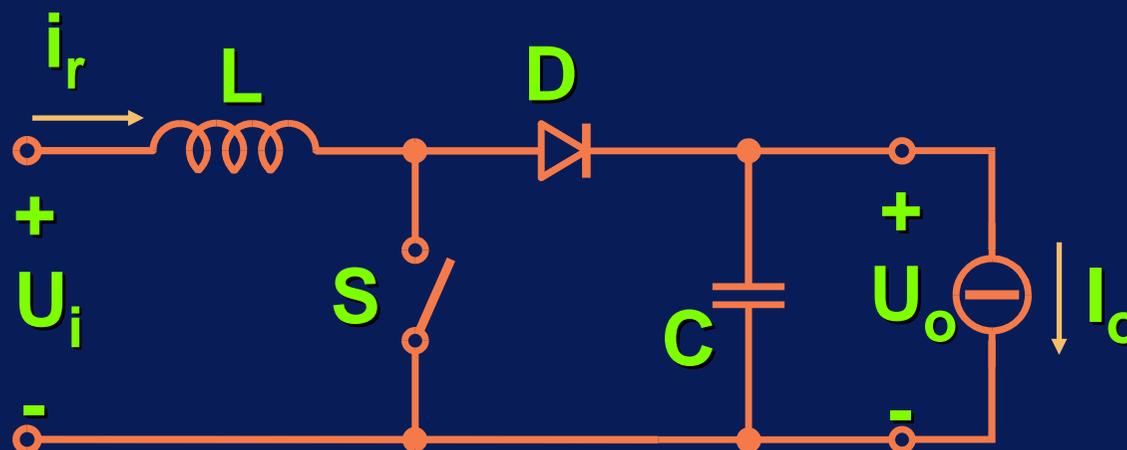


Funzionamento CCM

$$M = \frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{1 - \delta}$$

$\delta = \text{duty cycle}$

Convertitore cc/cc di tipo Boost

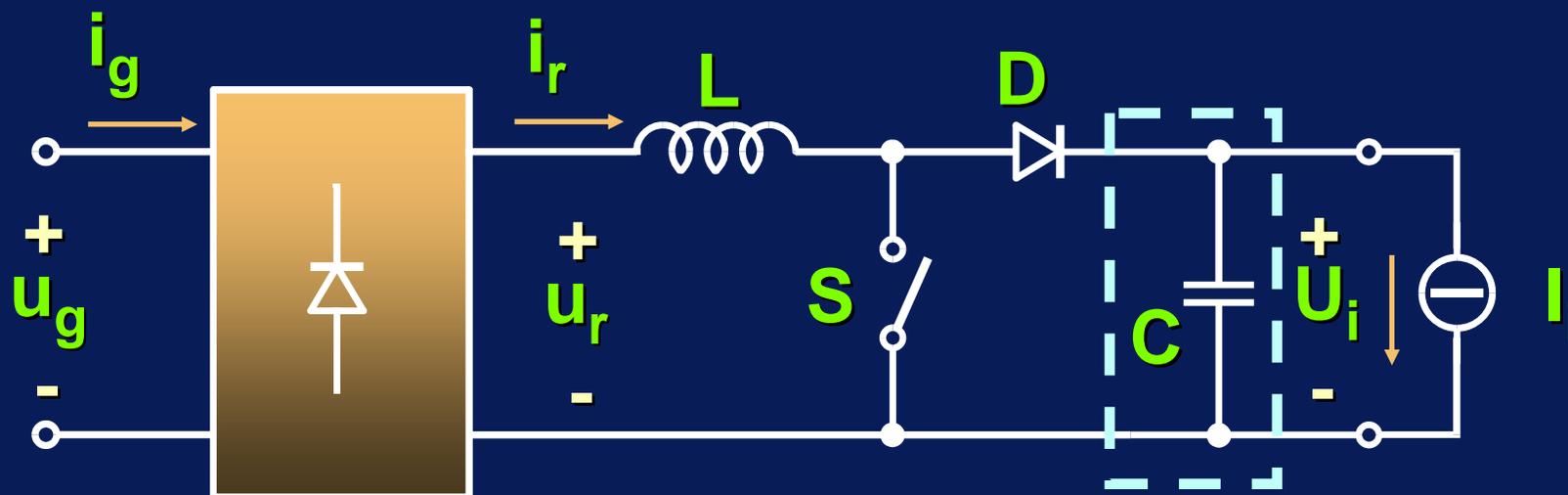


Funzionamento CCM

$$M = \frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{1 - \delta} \quad \delta = \text{duty cycle}$$

La topologia boost è idonea all'impiego nei PFC perchè consente di mantenere costante la tensione d'uscita anche per ampie variazioni della tensione d'ingresso ($0 < U_i < U_{i\max}$)

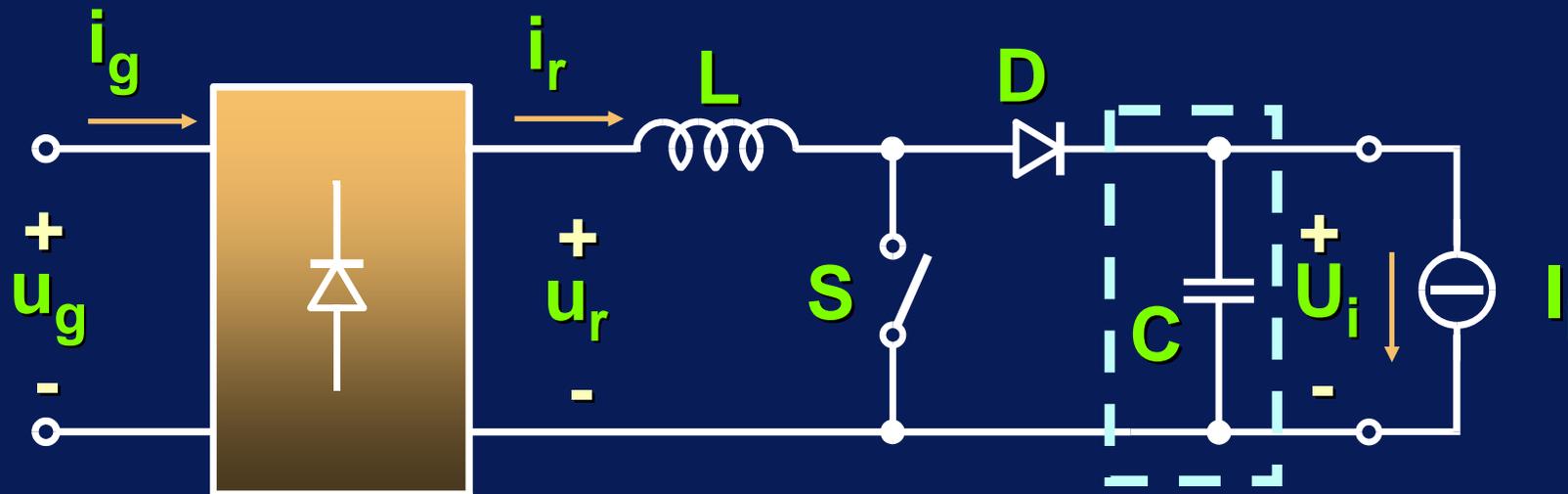
PFC Boost



**Raddrizzatore
a doppia semionda**

Filtro

PFC Boost

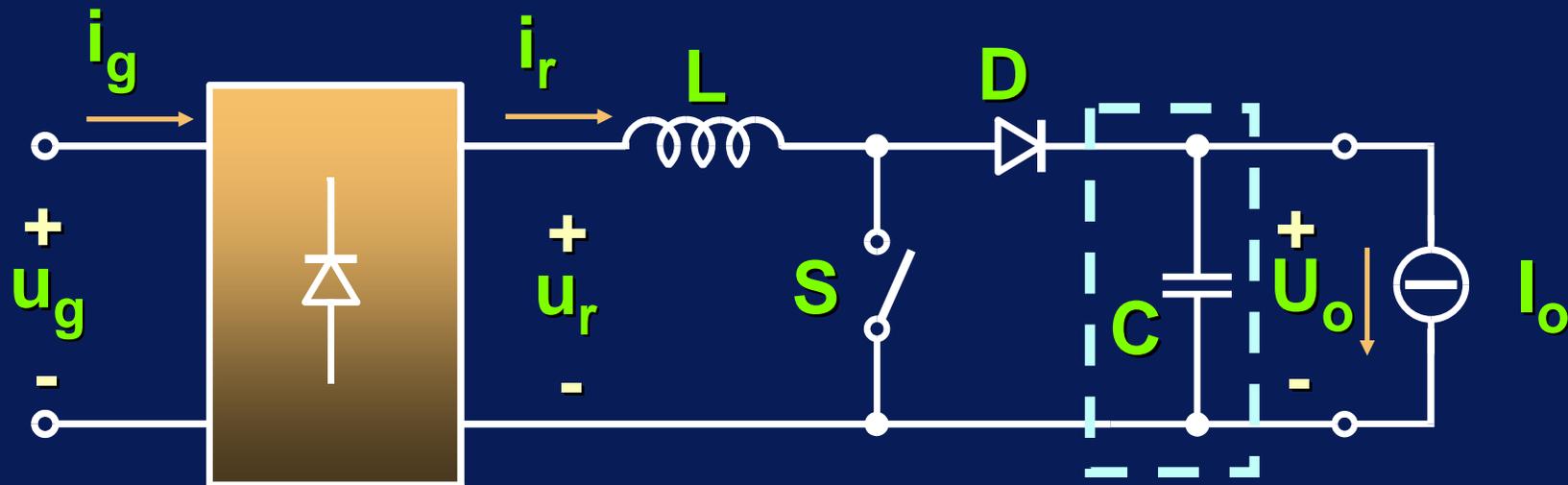


**Raddrizzatore
a doppia semionda**

Filtro

La corrente assorbita è filtrata dall'induttanza L ,
quindi le armoniche in AF non inquinano la rete

PFC Boost

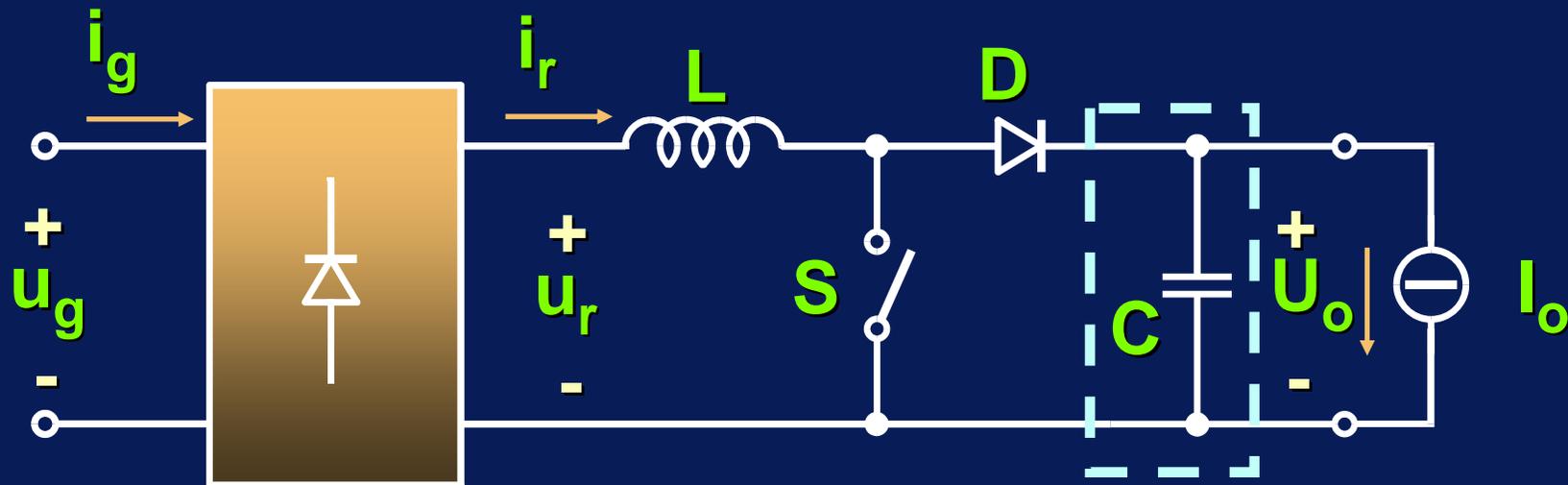


**Raddrizzatore
a doppia semionda**

Filtro

Se $i_r > 0$ in ogni istante (funzionamento CCM)
allora il raddrizzatore a diodi conduce sempre

PFC Boost



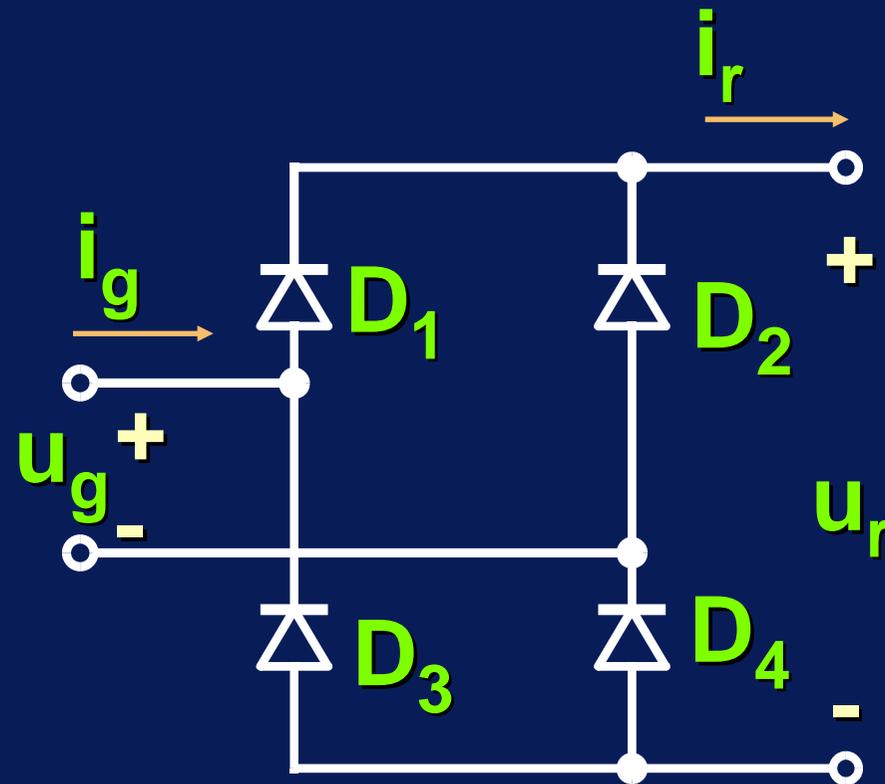
**Raddrizzatore
a doppia semionda**

Filtro

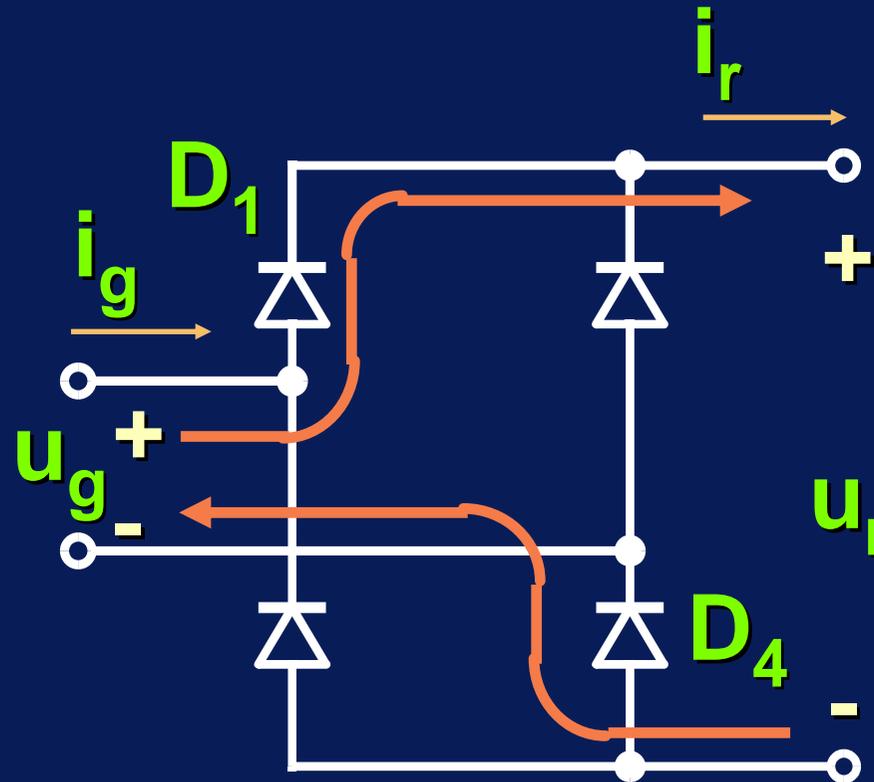
Se $i_r > 0$ in ogni istante (funzionamento CCM)
allora il raddrizzatore a diodi conduce sempre

➔ $u_r = |u_g|$

Funzionamento del raddrizzatore a doppia semionda

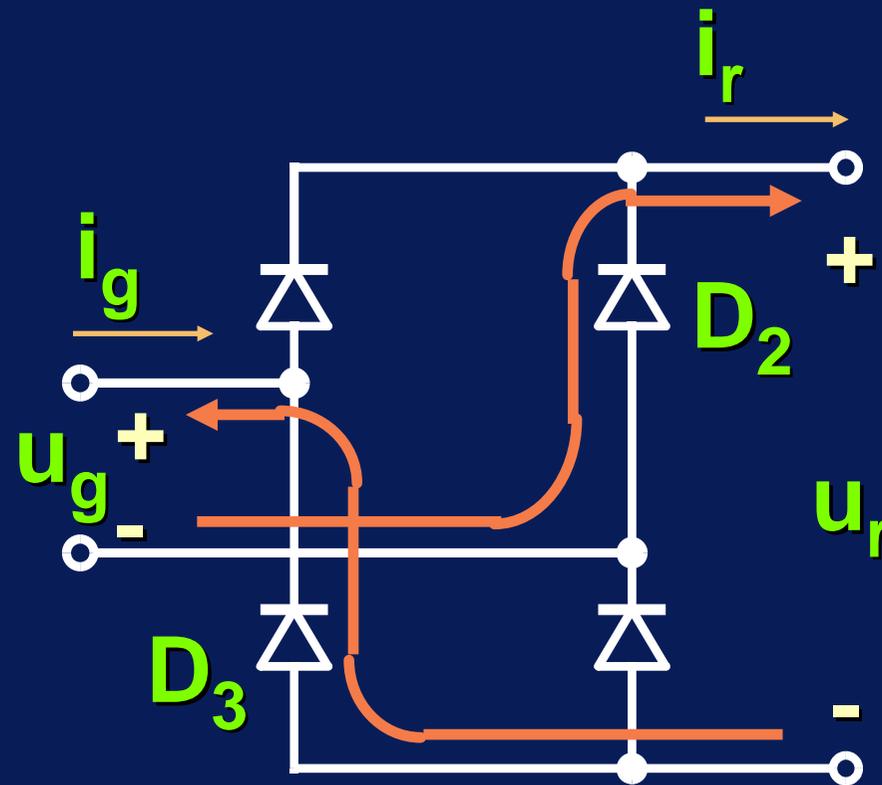


Funzionamento del raddrizzatore a doppia semionda



$u_g > 0 \rightarrow D_1 \text{ e } D_4 \text{ on} \rightarrow u_r = u_g \text{ e } i_g = i_r$

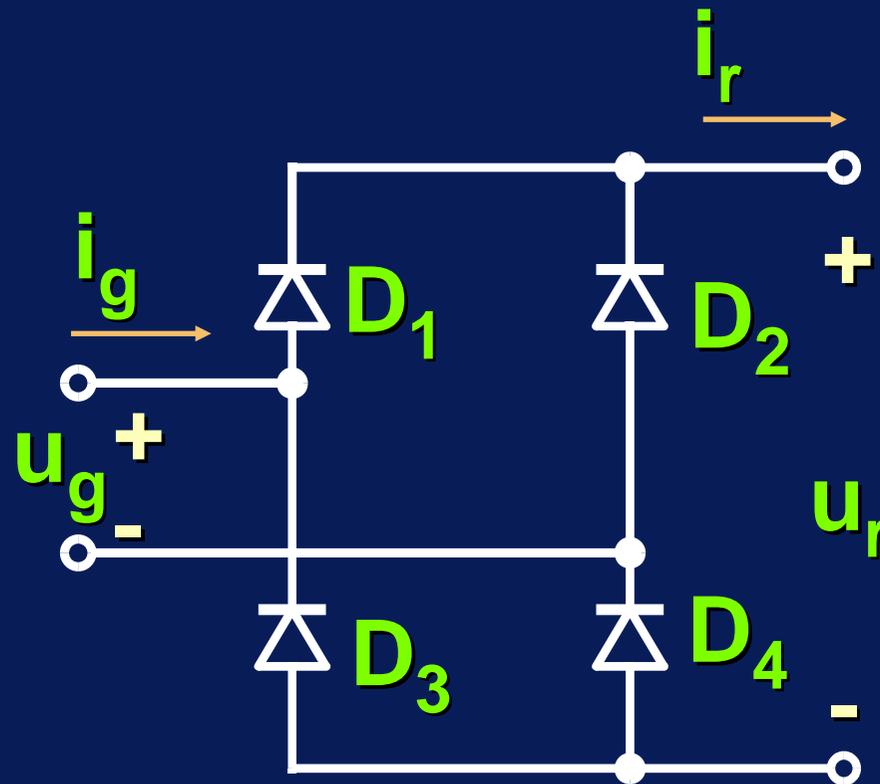
Funzionamento del raddrizzatore a doppia semionda



$u_g > 0 \Rightarrow D_1 \text{ e } D_4 \text{ on} \Rightarrow u_r = u_g \text{ e } i_g = i_r$

$u_g < 0 \Rightarrow D_2 \text{ e } D_3 \text{ on} \Rightarrow u_r = -u_g \text{ e } i_g = -i_r$

Funzionamento del raddrizzatore a doppia semionda

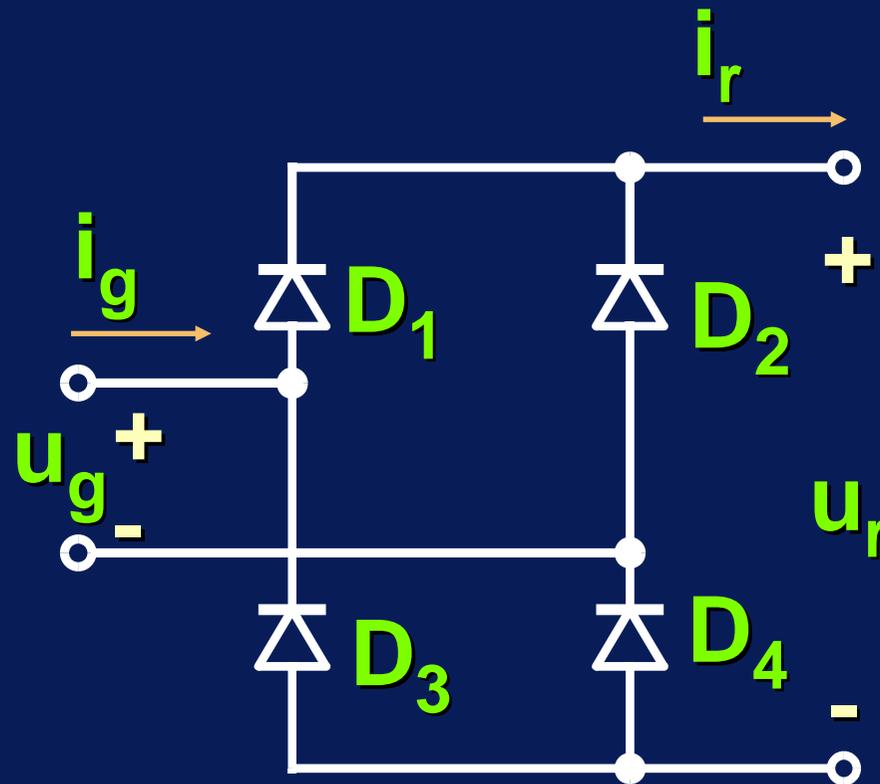


$u_g > 0$ \Rightarrow D_1 e D_4 on

$u_g < 0$ \Rightarrow D_2 e D_3 on

$$u_r = |u_g|$$

Funzionamento del raddrizzatore a doppia semionda



$u_g > 0$ \Rightarrow D_1 e D_4 on

$u_g < 0$ \Rightarrow D_2 e D_3 on

$$u_r = |u_g|$$

$$i_g = i_r \operatorname{sign}(u_g)$$

Funzionamento del raddrizzatore a doppia semionda

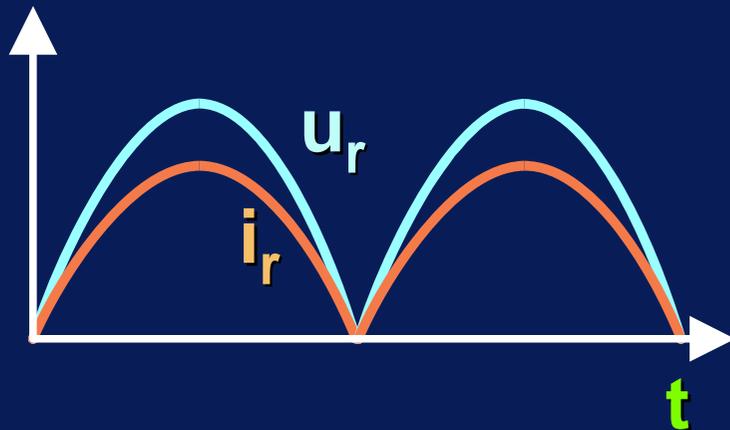
Funzionamento del raddrizzatore a doppia semionda

Se $i_r > 0$: $i_g = i_r \text{ sign}(u_g)$ $u_r = |u_g| = u_g \text{ sign}(u_g)$

Funzionamento del raddrizzatore a doppia semionda

Se $i_r > 0$: $i_g = i_r \text{ sign}(u_g)$ $u_r = |u_g| = u_g \text{ sign}(u_g)$

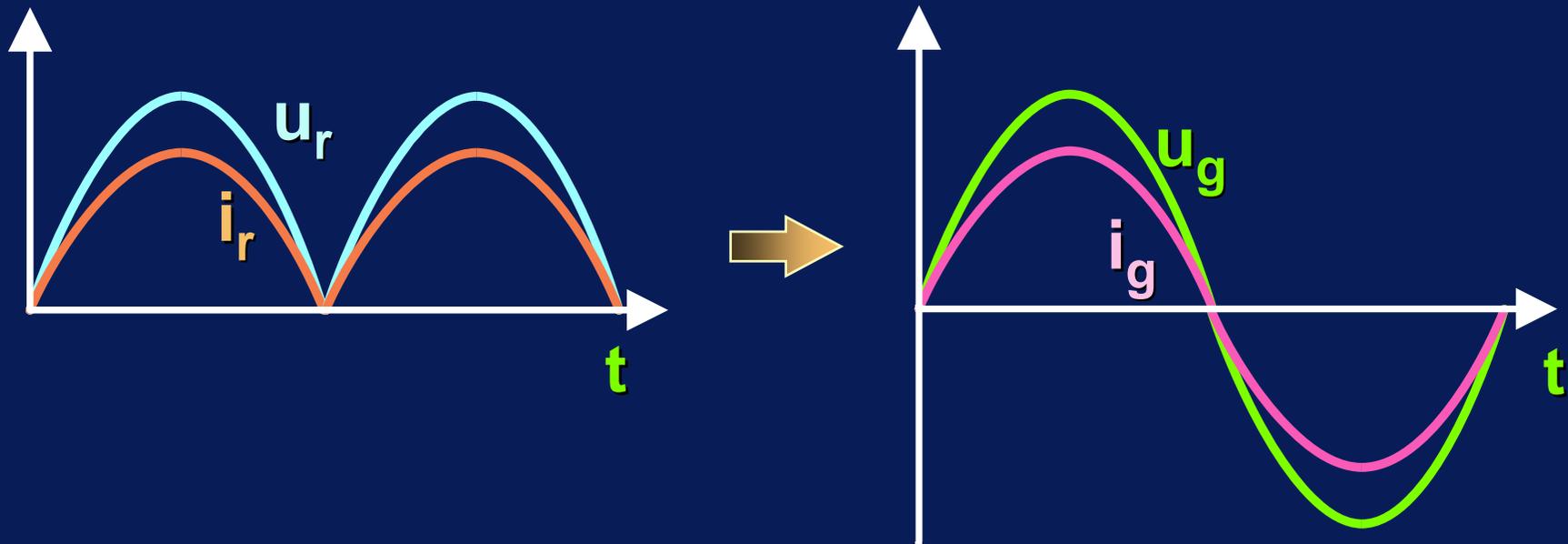
Quindi se: $i_r = \frac{u_r}{R_{eq}}$



Funzionamento del raddrizzatore a doppia semionda

Se $i_r > 0$: $i_g = i_r \text{ sign}(u_g)$ $u_r = |u_g| = u_g \text{ sign}(u_g)$

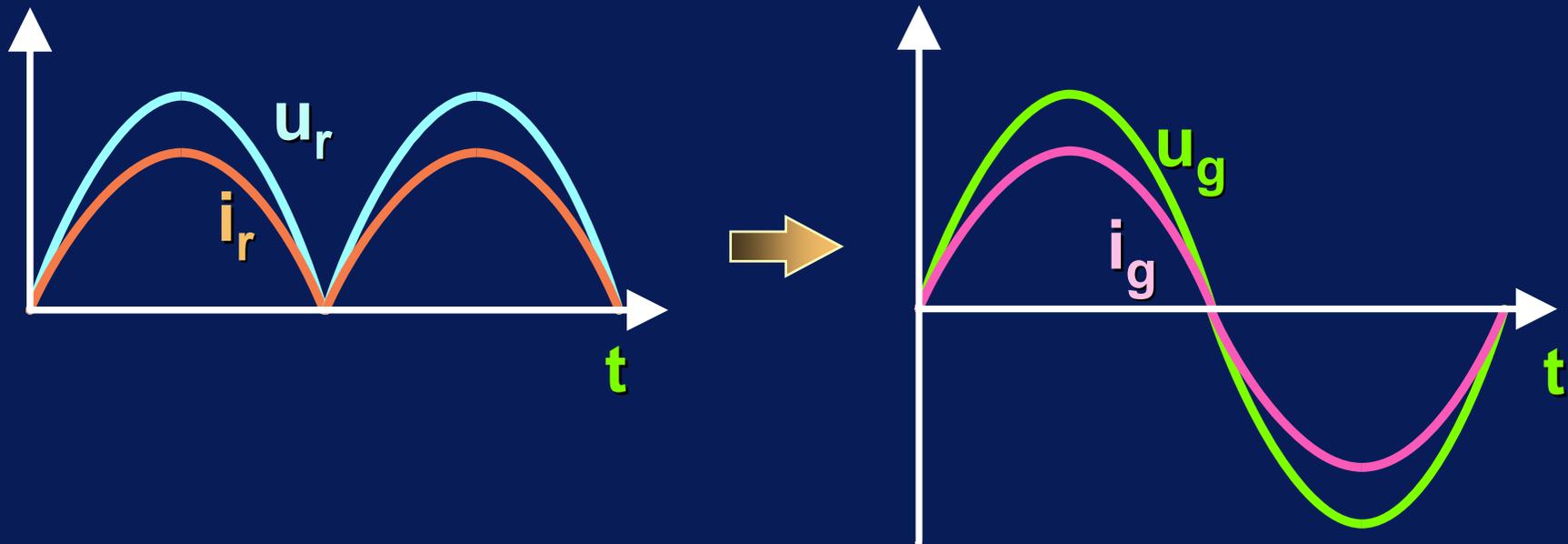
Quindi se: $i_r = \frac{u_r}{R_{eq}} \Rightarrow i_g = \frac{u_g}{R_{eq}}$



Funzionamento del raddrizzatore a doppia semionda

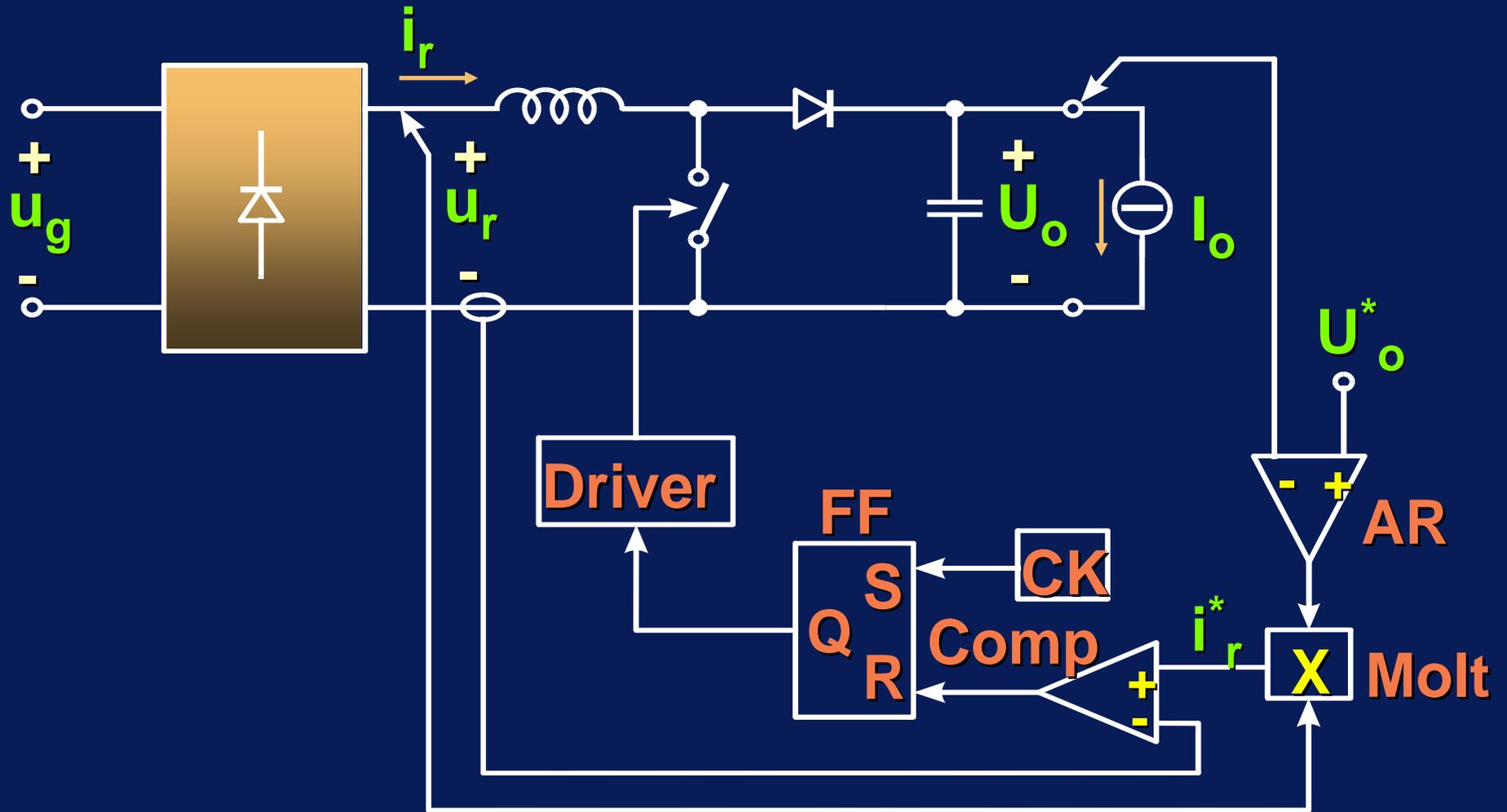
Il controllo del PFC viene realizzato in modo
da mantenere i_r proporzionale ad u_r

$$i_r = \frac{u_r}{R_{eq}} \quad \Rightarrow \quad i_g = \frac{u_g}{R_{eq}}$$

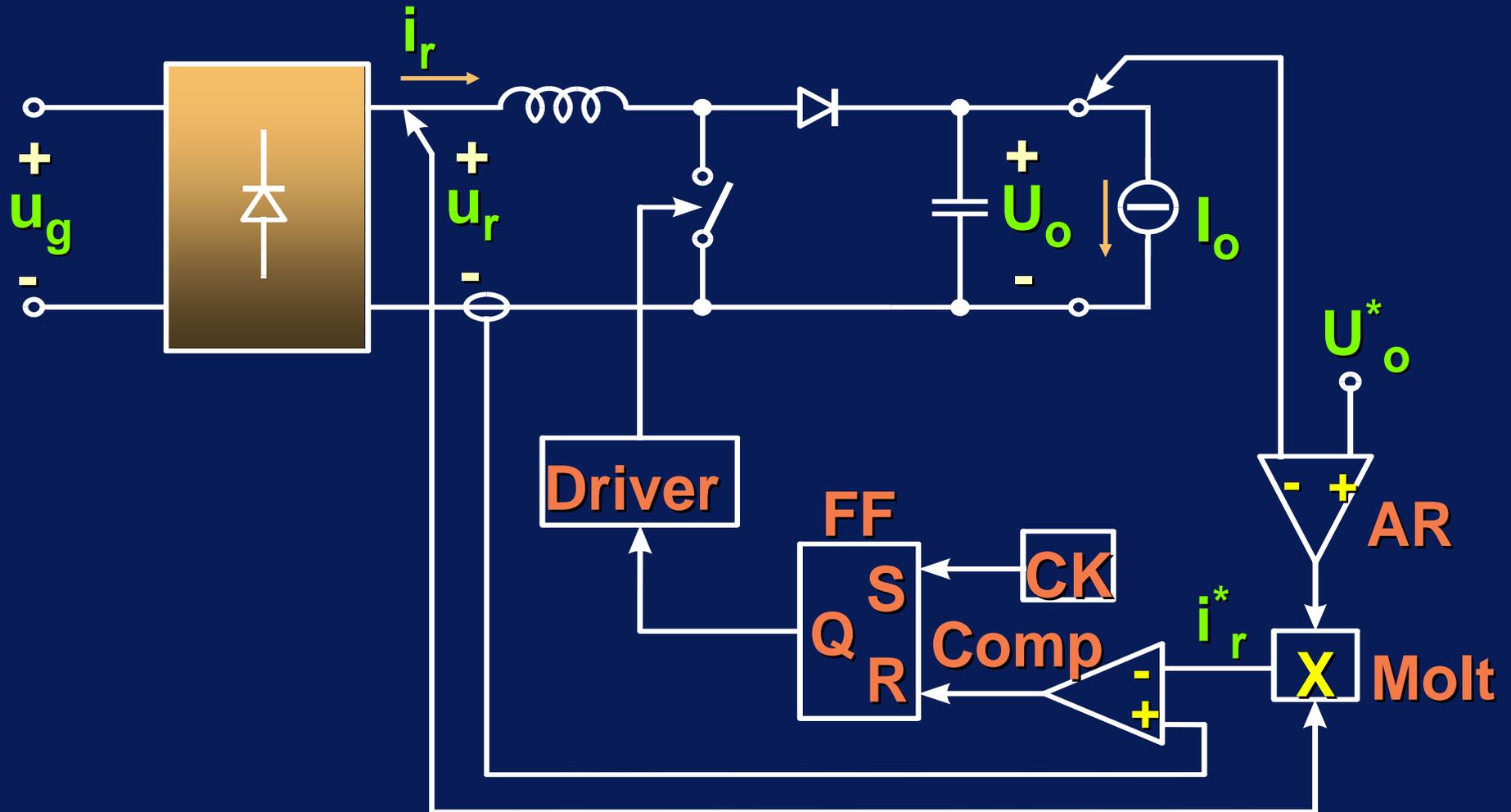


Schema del controllo (CCM)

Schema del controllo (CCM)

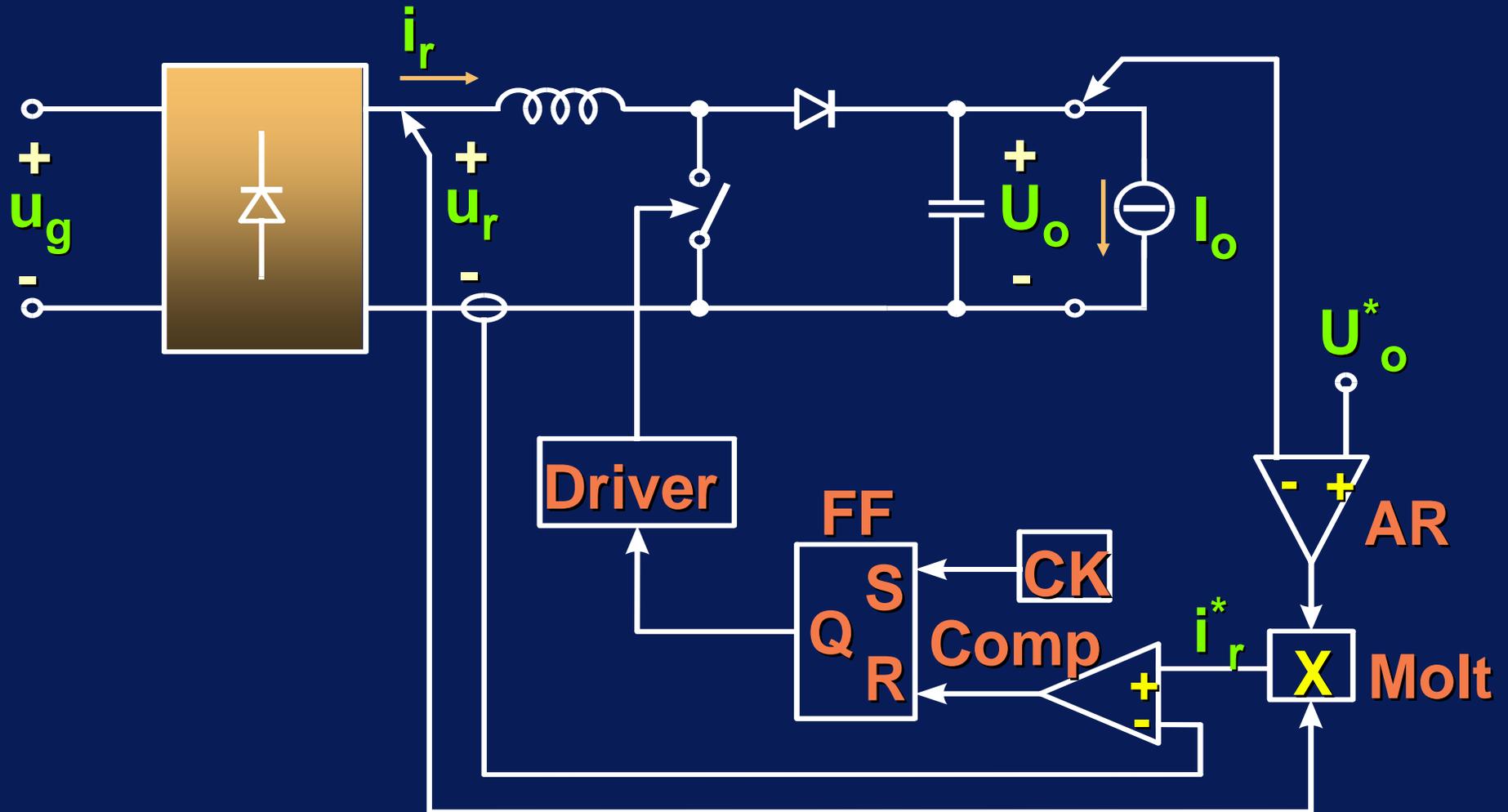


Schema del controllo (CCM)



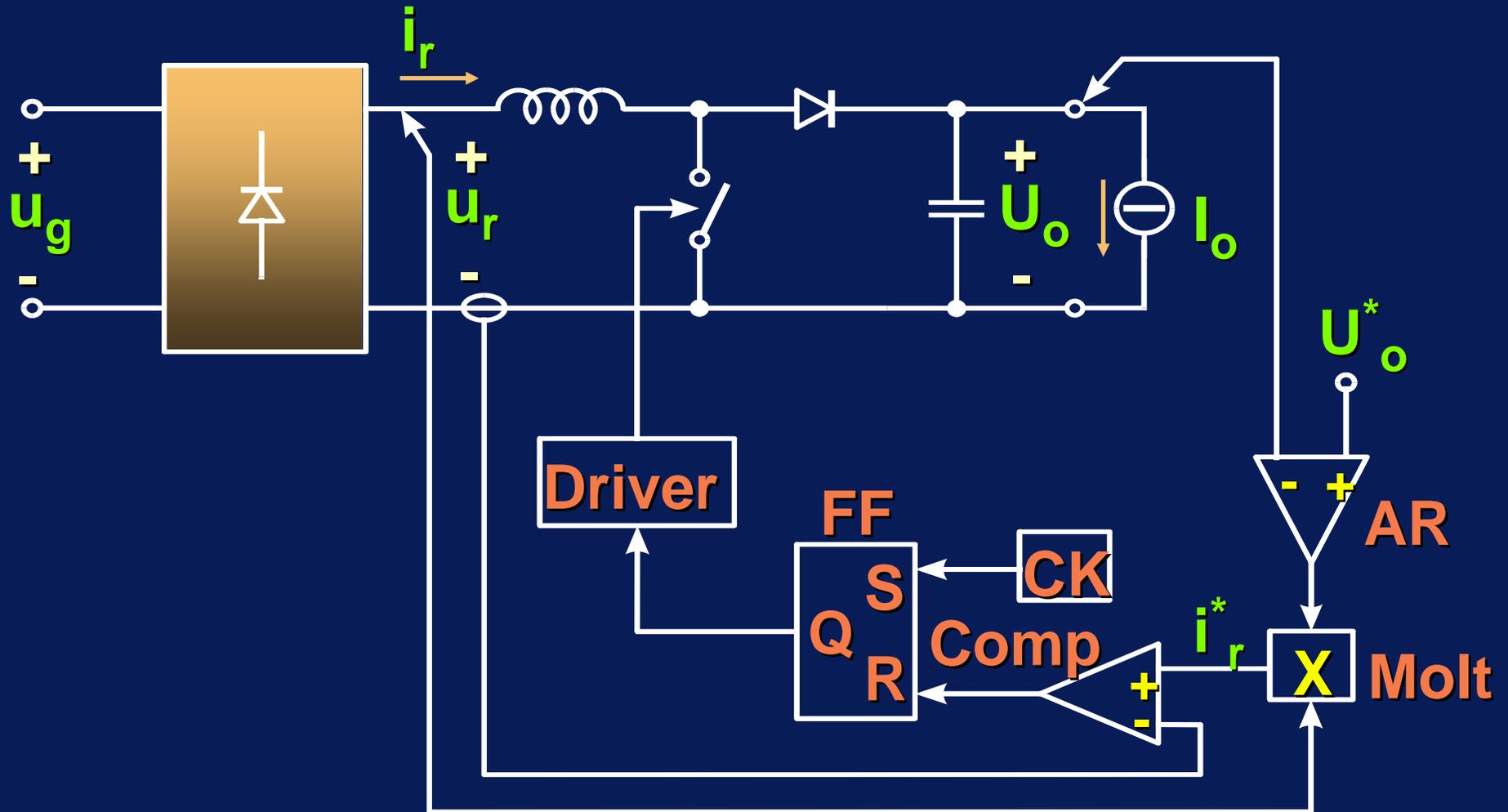
Il controllo è del tipo di corrente di picco

Schema del controllo (CCM)



La forma d'onda del riferimento di corrente è determinata dalla tensione raddrizzata

Schema del controllo (CCM)



L'ampiezza del riferimento di corrente è imposta dal regolatore di tensione per ottenere $U_o = U_o^*$

LIMITE:

Poichè il convertitore è di tipo boost, si ha che $U_o > \max (u_r)$

LIMITE:

Poichè il convertitore è di tipo boost, si ha che $U_o > \max (u_r)$



**Il convertitore cc/cc a valle del PFC
deve includere un trasformatore
abbassatore di tensione**

Simulazione numerica del funzionamento di un PFC boost

Tensione di ingresso $U_g = 260 \text{ Vrms}$

Tensione di uscita $U_o = 450 \text{ V}$

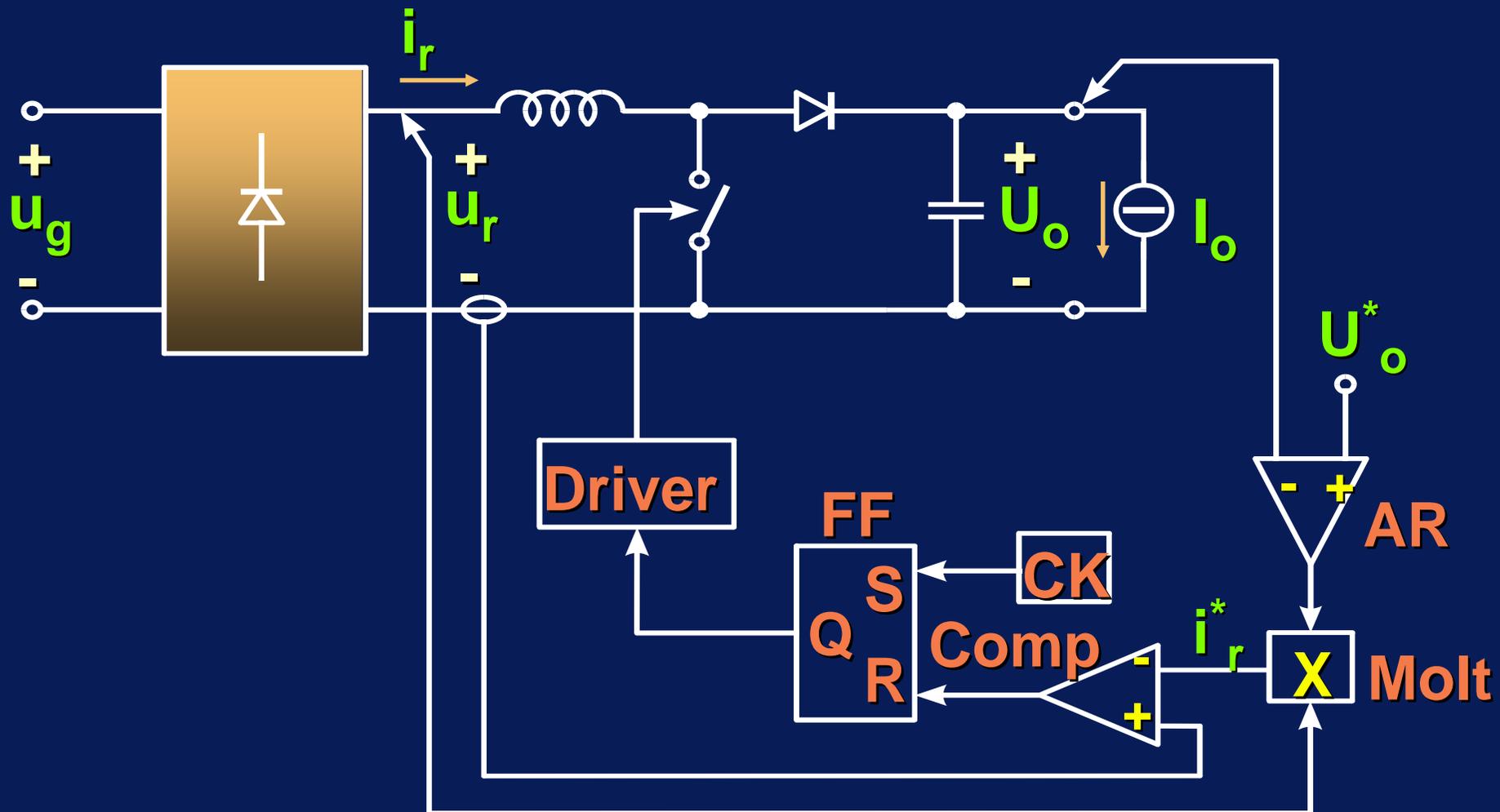
Corrente di uscita $I_o = 100 \text{ A}$

Frequenza di commutazione $f_s = 5 \text{ kHz}$

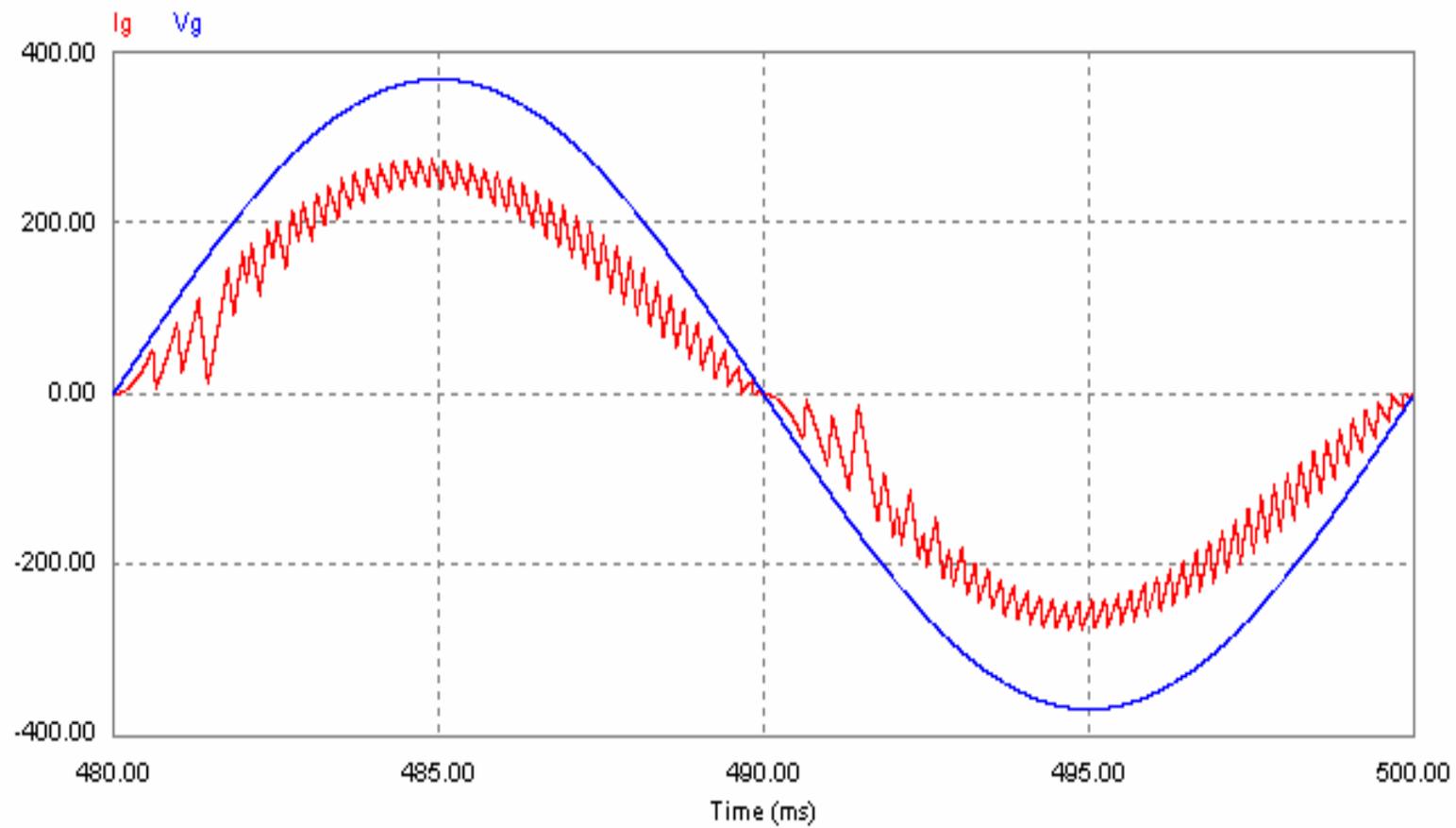
Induttanza $L = 400 \mu\text{H}$

Capacità $C = 7 \text{ mF}$

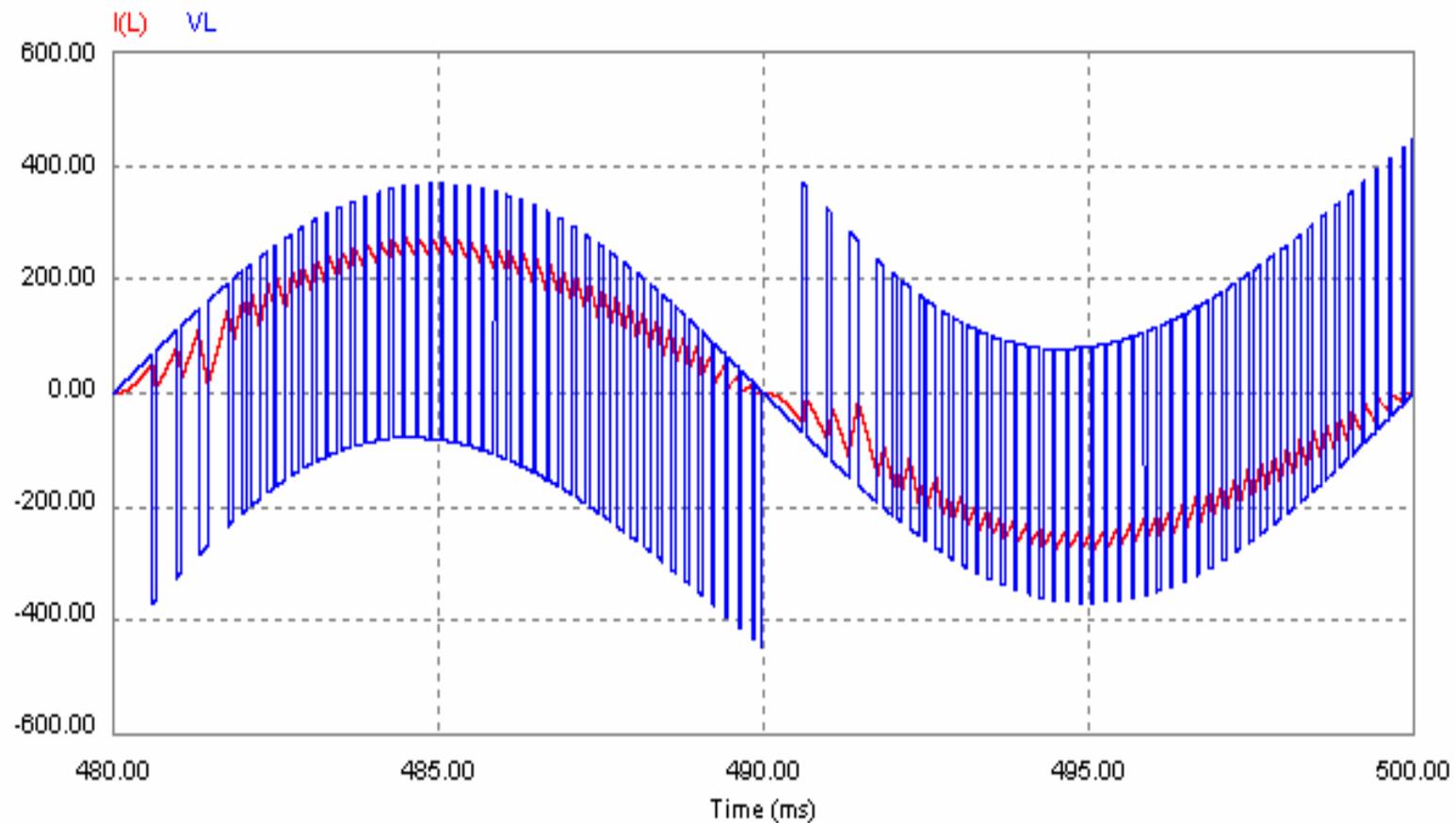
Nel circuito simulato, l'induttore e' posto a monte del raddrizzatore per ridurre la sezione del nucleo.
In quel caso la misura di tensione a monte dell'induttanza deve essere raddrizzata prima di essere inviata al controllo.



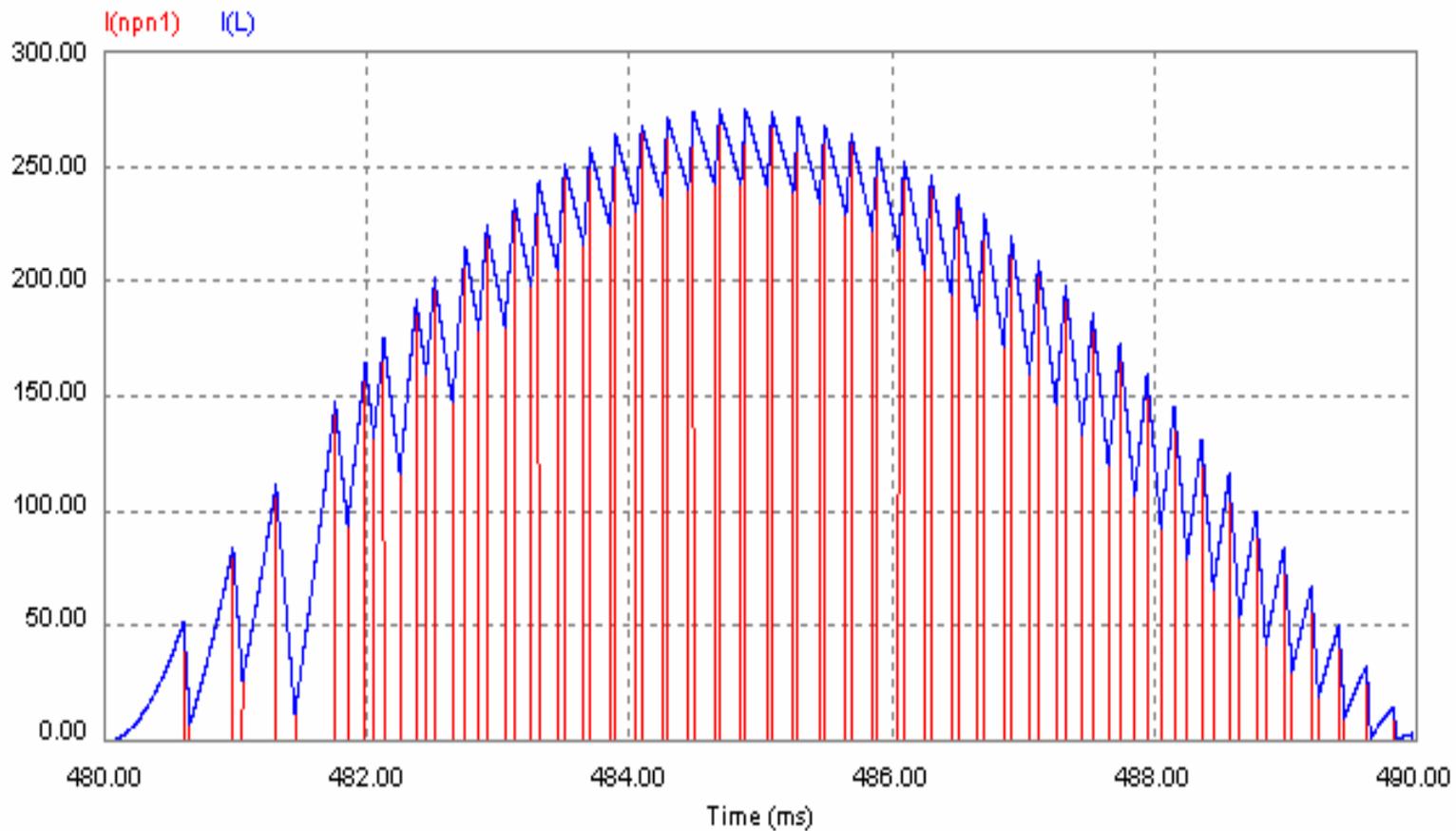
Tensione e corrente di alimentazione



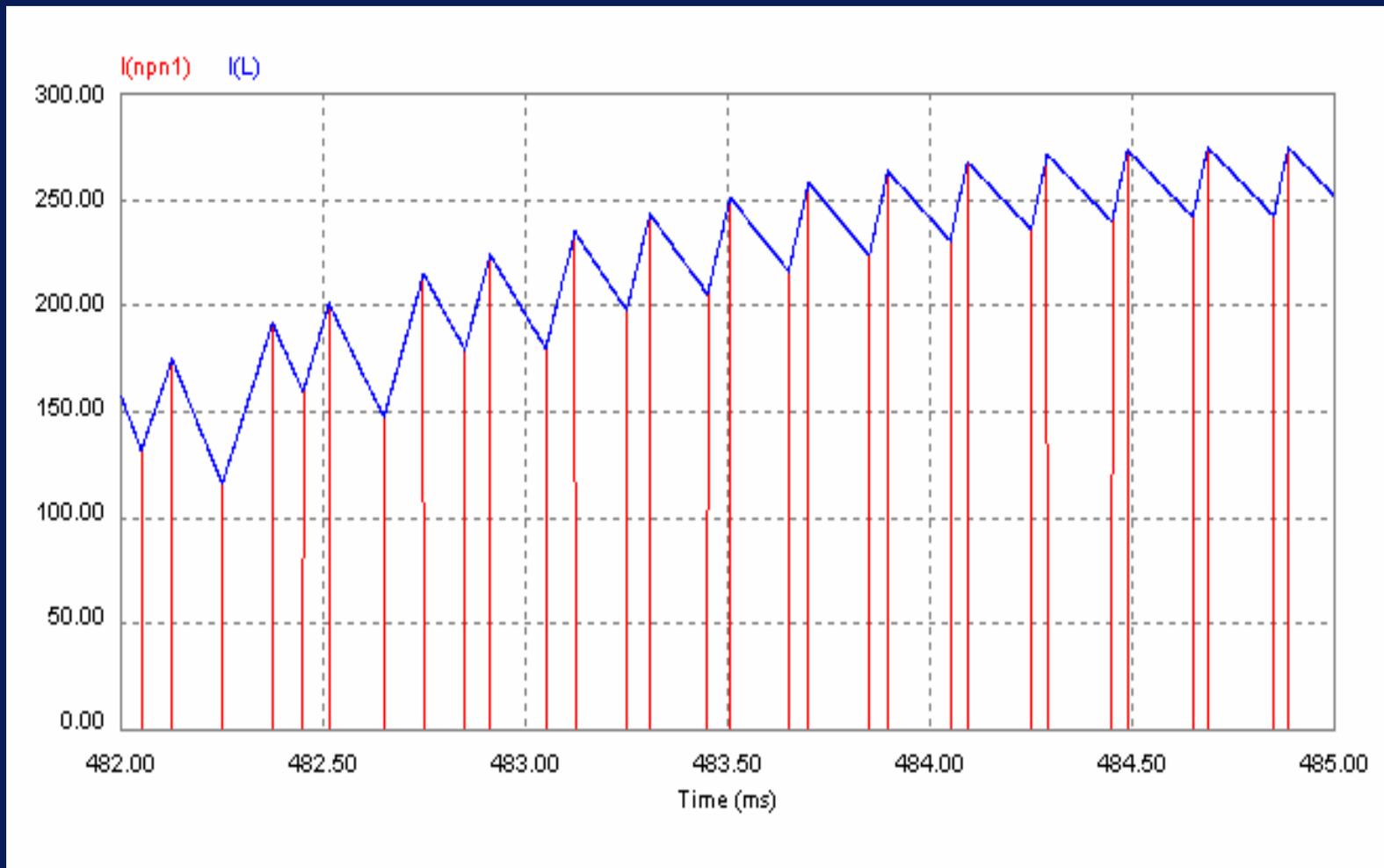
Tensione e corrente sull'induttanza L



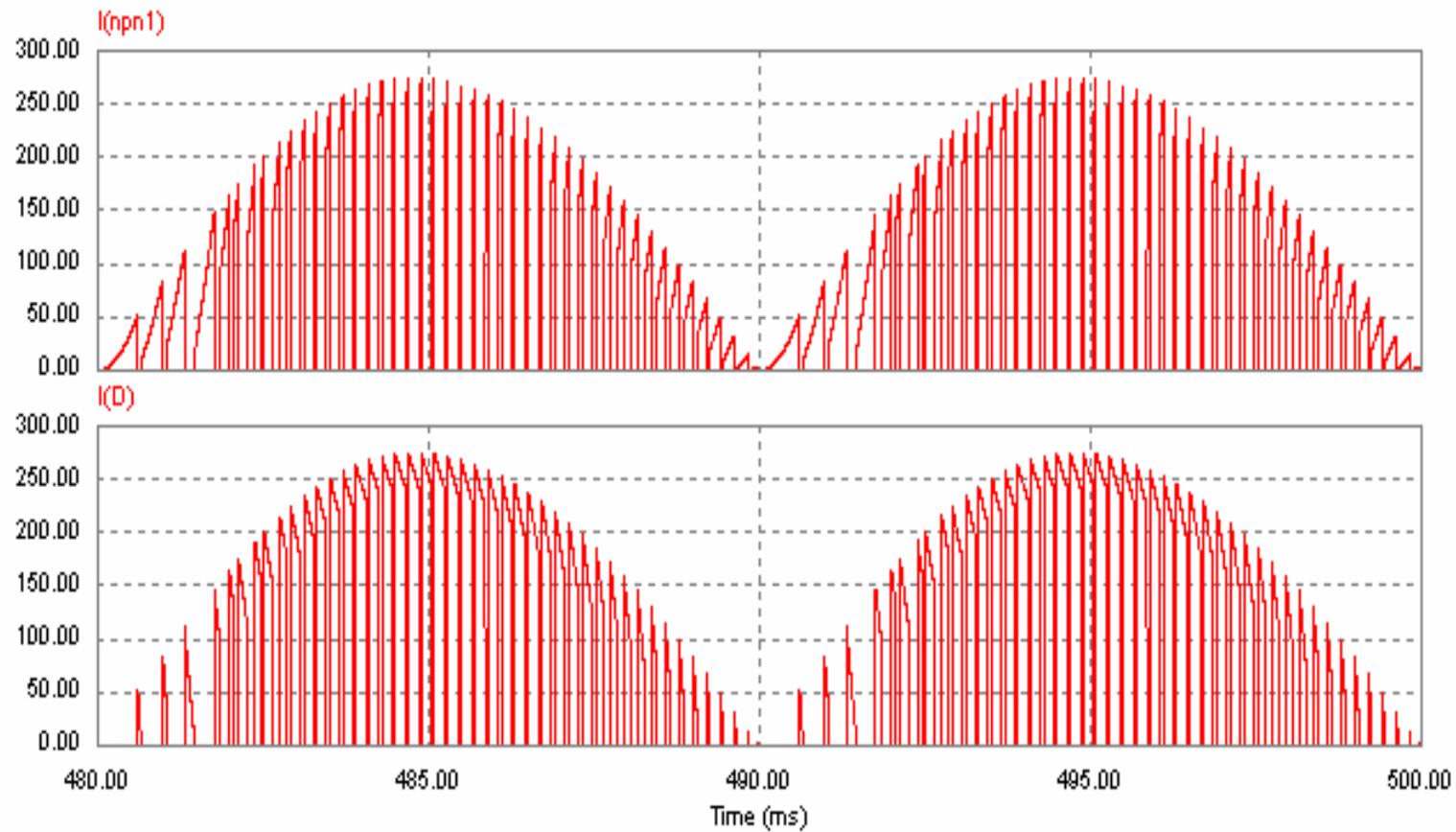
Correnti sullo switch e sull'induttanza L



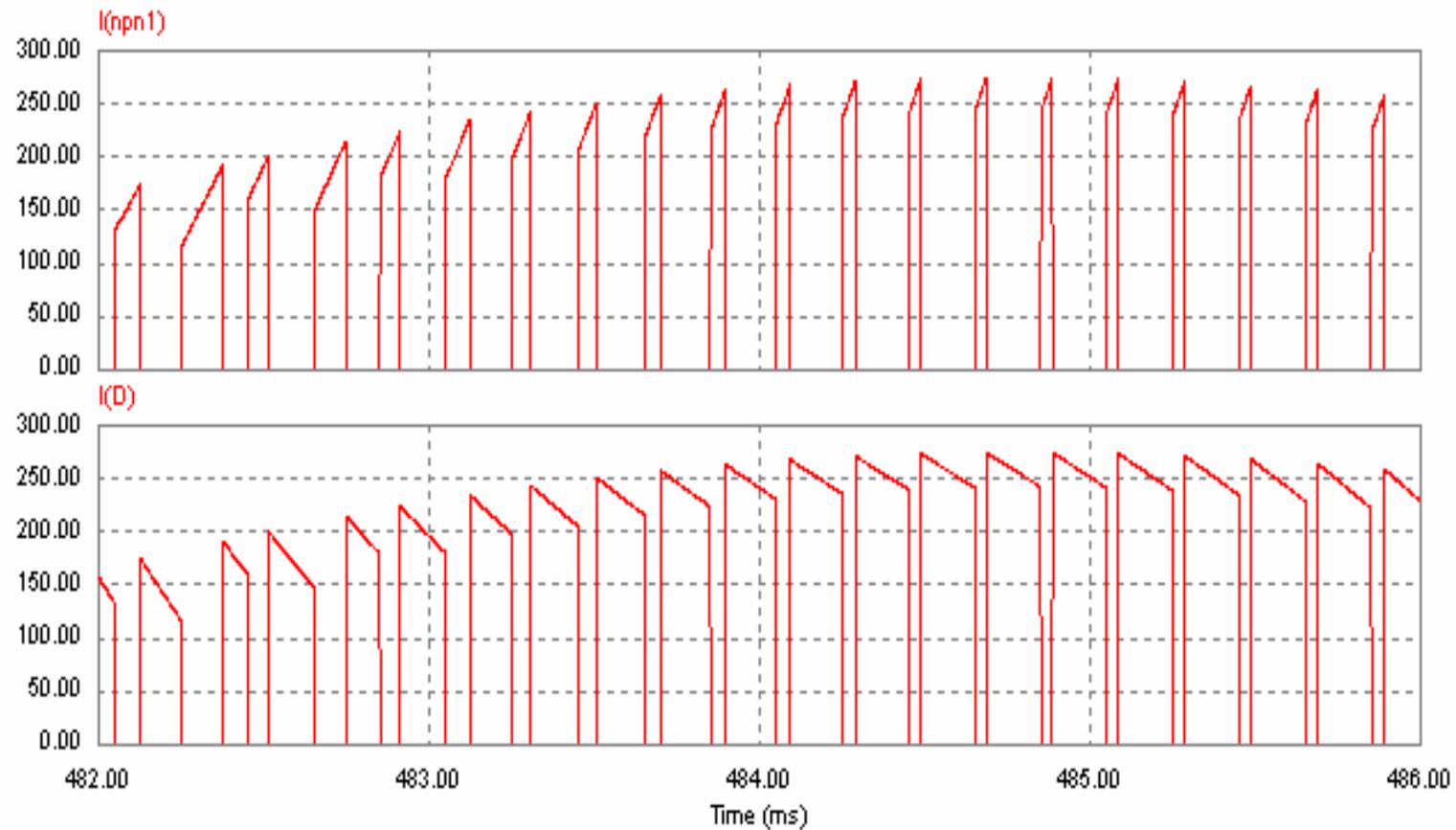
Correnti sullo switch e sull'induttanza L espansa



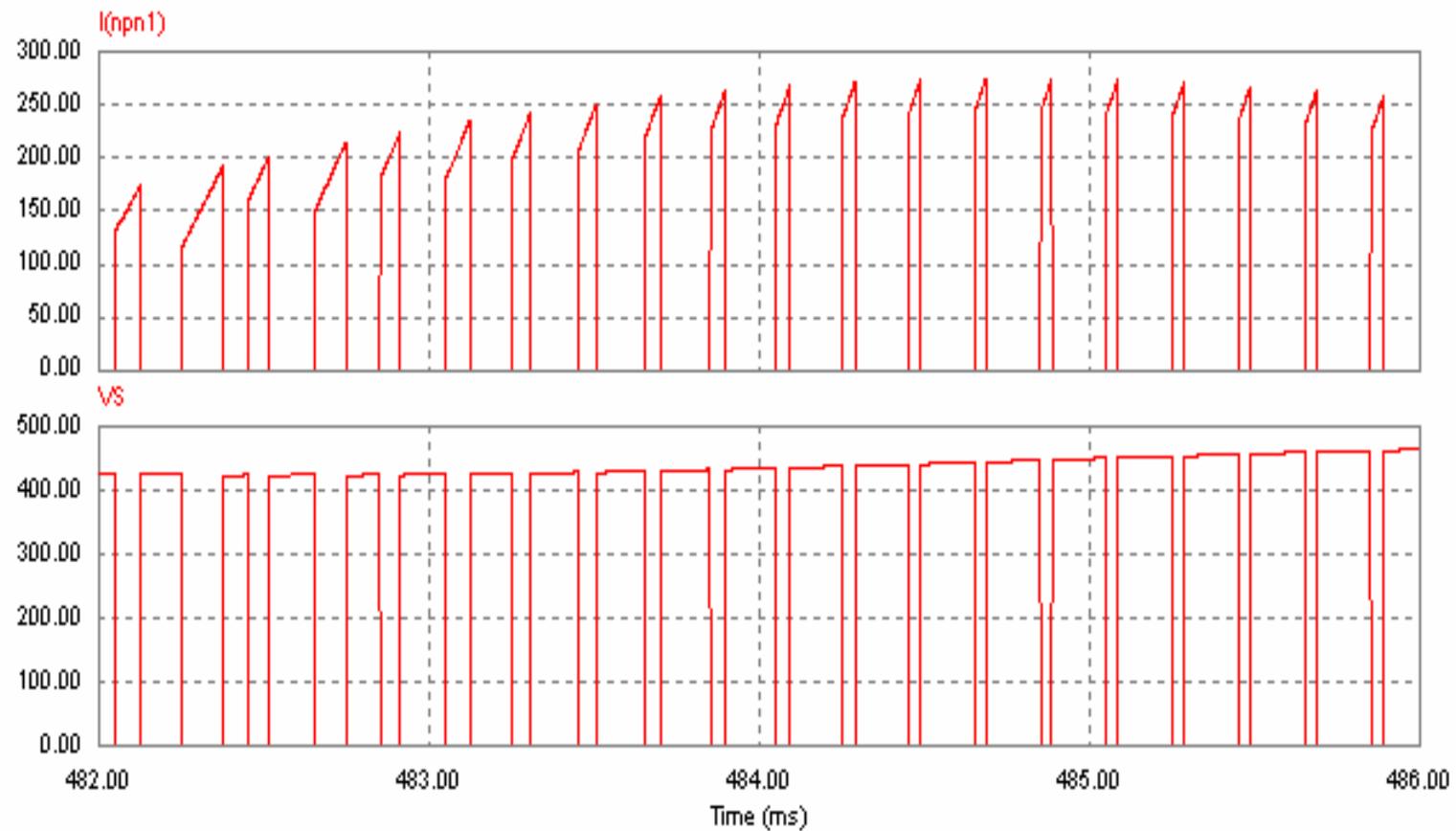
Correnti su switch e diodo



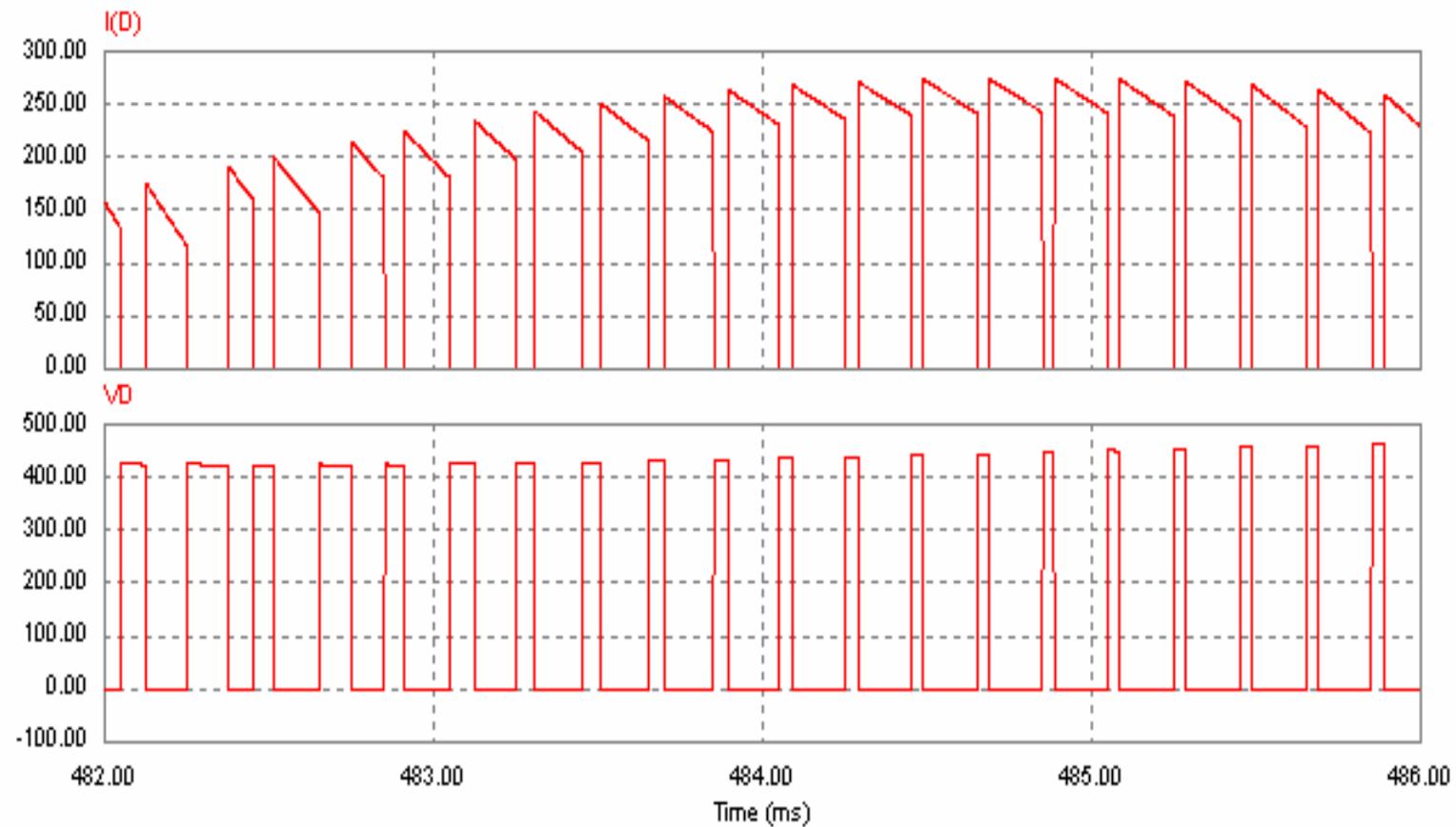
Correnti su switch e diodo espanse



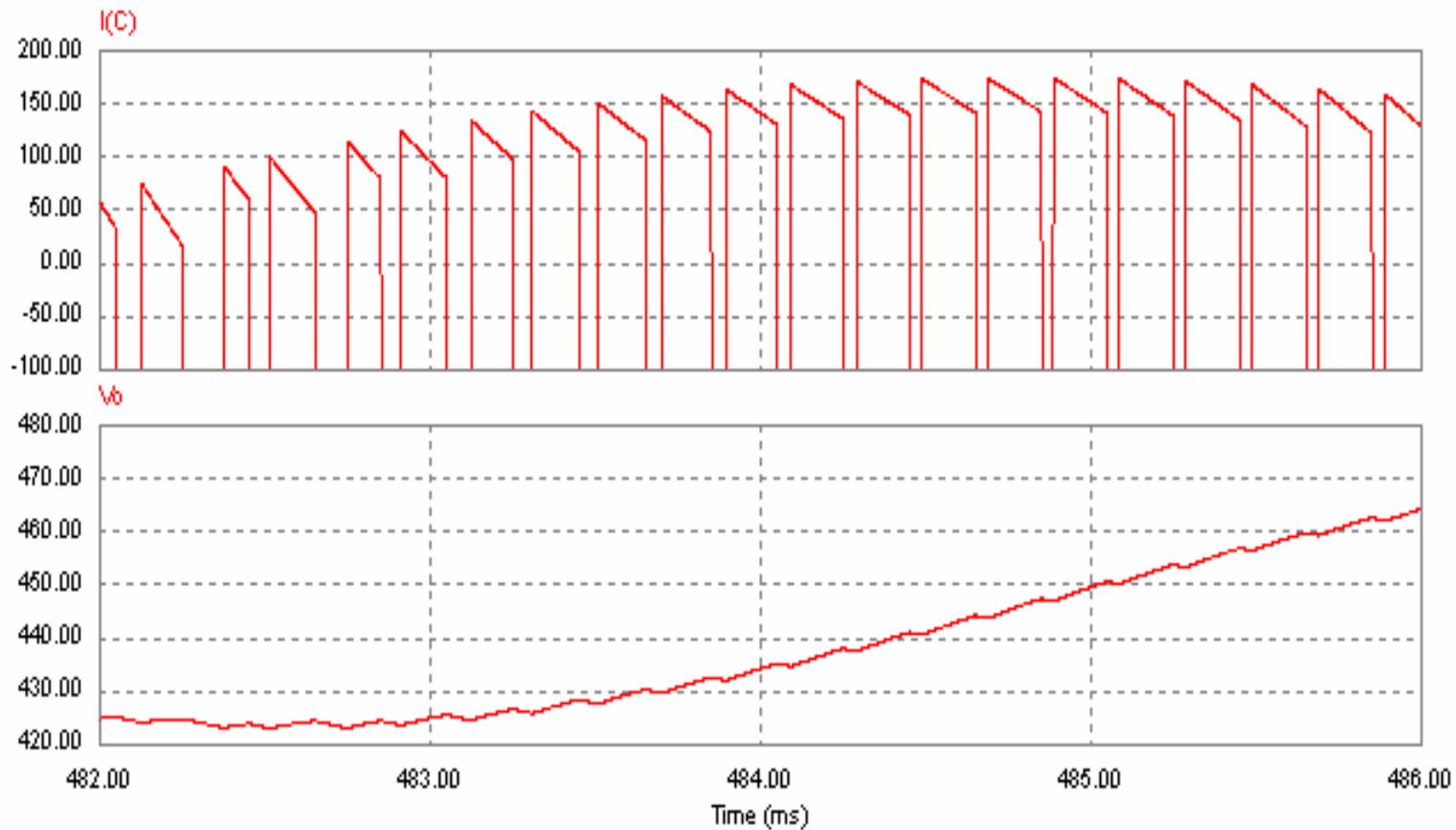
Corrente e tensione sullo switch



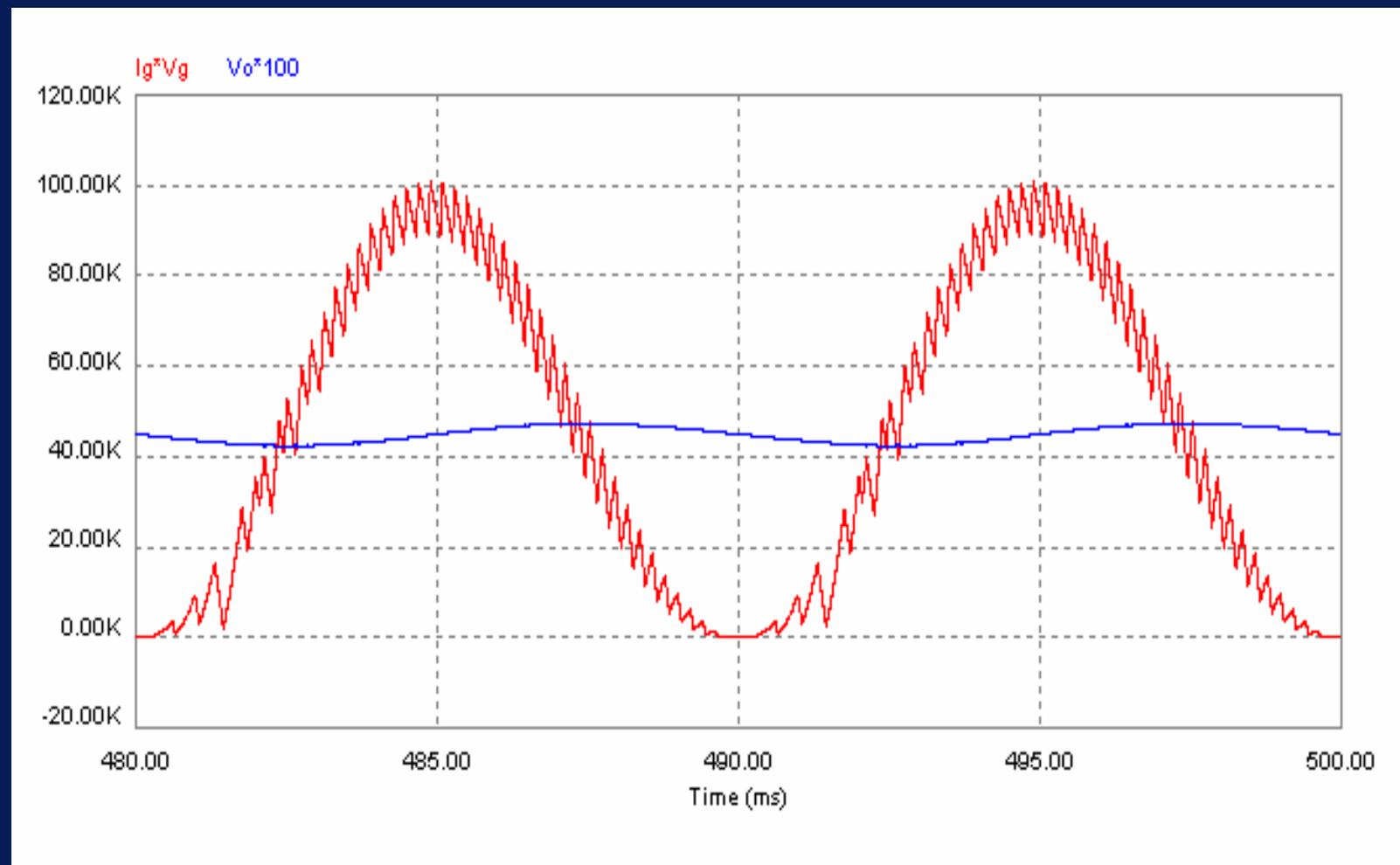
Corrente e tensione sul diodo



Corrente sul condensatore e V_{out} espanse



Potenze d'ingresso e d'uscita



Esempio di applicazione

Specifiche del PFC:

Tensione di ingresso $U_g = 90 - 260 \text{ Vrms}$

Tensione di uscita $U_o = 380 \text{ V}$

Potenza di uscita $P_o = 550 \text{ W}$

Frequenza di commutazione $f_s = 70 \text{ kHz}$

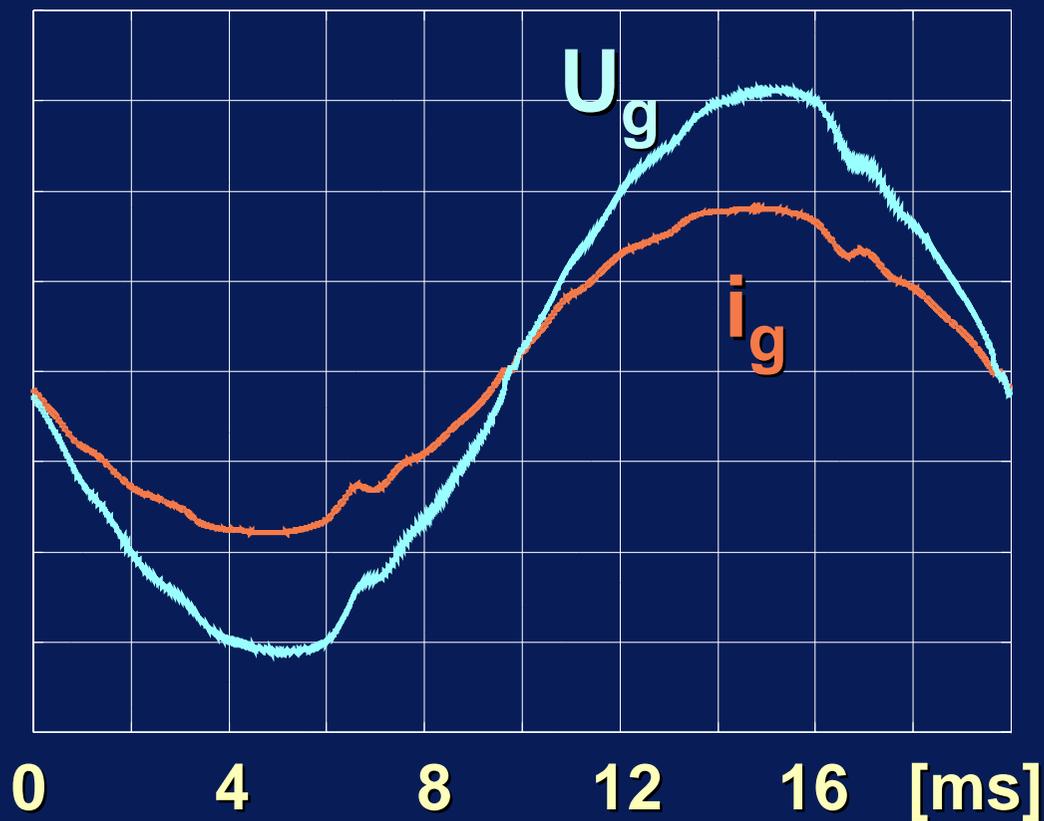
Induttanza $L = 500 \mu\text{H}$

Capacità $C = 450 \mu\text{F}$

Risultati sperimentali

u_g : THD = 3.2% i_g : THD = 4.2%

Power factor: 0.998



Dimensionamento del condensatore d'uscita di un PFC

Dimensionamento del condensatore d'uscita di un PFC

$$p_g = u_g i_g$$

Dimensionamento del condensatore d'uscita di un PFC

$$p_g = u_g i_g = \frac{U_{g\max}^2}{R_{eq}} \sin^2(\omega t)$$

Dimensionamento del condensatore d'uscita di un PFC

$$p_g = u_g i_g = \frac{U_{g\max}^2}{R_{eq}} \sin^2(\omega t) = \frac{U_g^2}{R_{eq}} [1 - \cos(2\omega t)]$$

Dimensionamento del condensatore d'uscita di un PFC

$$p_g = u_g i_g = \frac{U_{g\max}^2}{R_{eq}} \sin^2(\omega t) = \frac{U_g^2}{R_{eq}} [1 - \cos(2\omega t)]$$

$$P_o = U_o I_o = \frac{U_g^2}{R_{eq}}$$

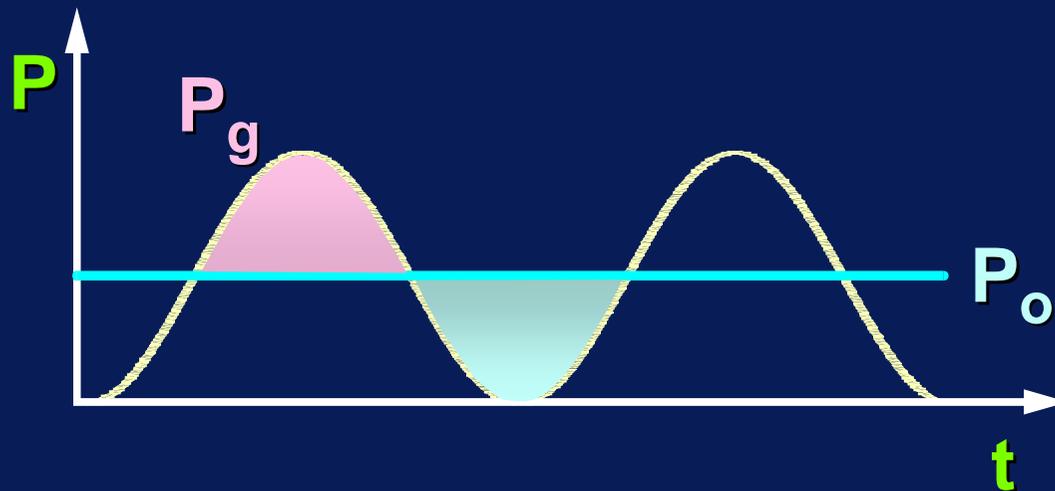
La potenza media d'ingresso
eguaglia quella d'uscita

Dimensionamento del condensatore d'uscita di un PFC

$$p_g = u_g i_g = \frac{U_{g\max}^2}{R_{eq}} \sin^2(\omega t) = \frac{U_g^2}{R_{eq}} [1 - \cos(2\omega t)]$$

$$P_o = U_o I_o = \frac{U_g^2}{R_{eq}}$$

La potenza media d'ingresso eguaglia quella d'uscita



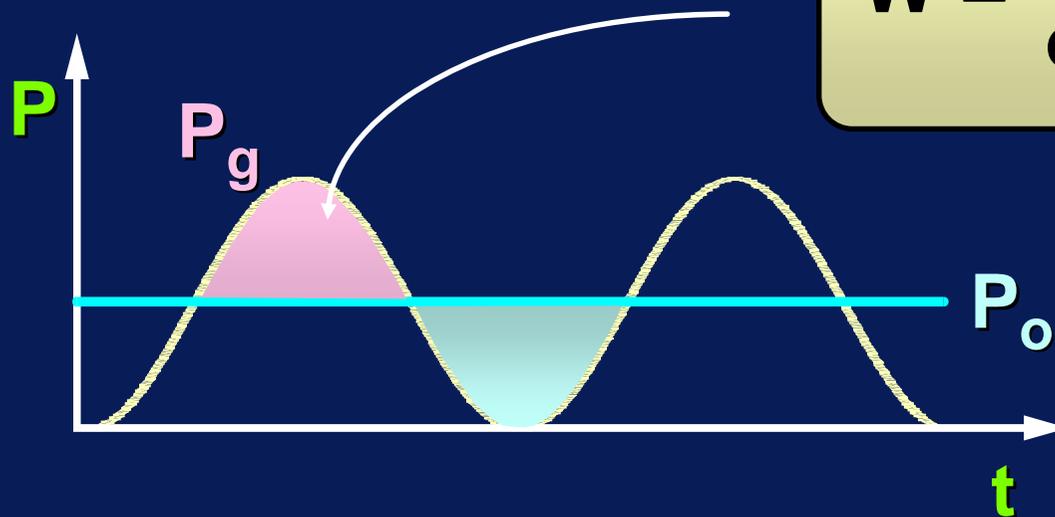
Dimensionamento del condensatore d'uscita di un PFC

$$p_g = u_g i_g = \frac{U_{g\max}^2}{R_{eq}} \sin^2(\omega t) = \frac{U_g^2}{R_{eq}} [1 - \cos(2\omega t)]$$

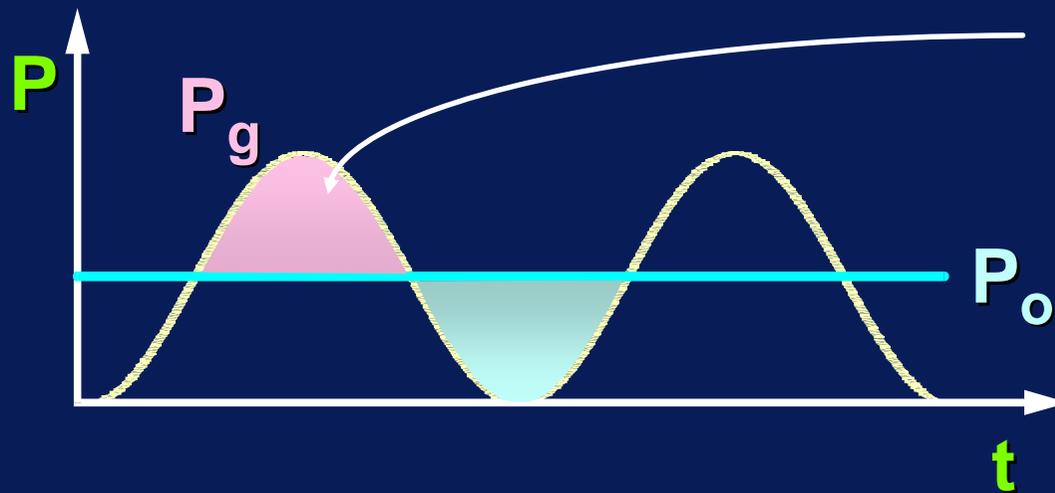
$$P_o = U_o I_o = \frac{U_g^2}{R_{eq}}$$

Energia scambiata dal filtro capacitivo:

$$W = \frac{P_o}{\omega} = \frac{P_o}{2\pi f_g}$$

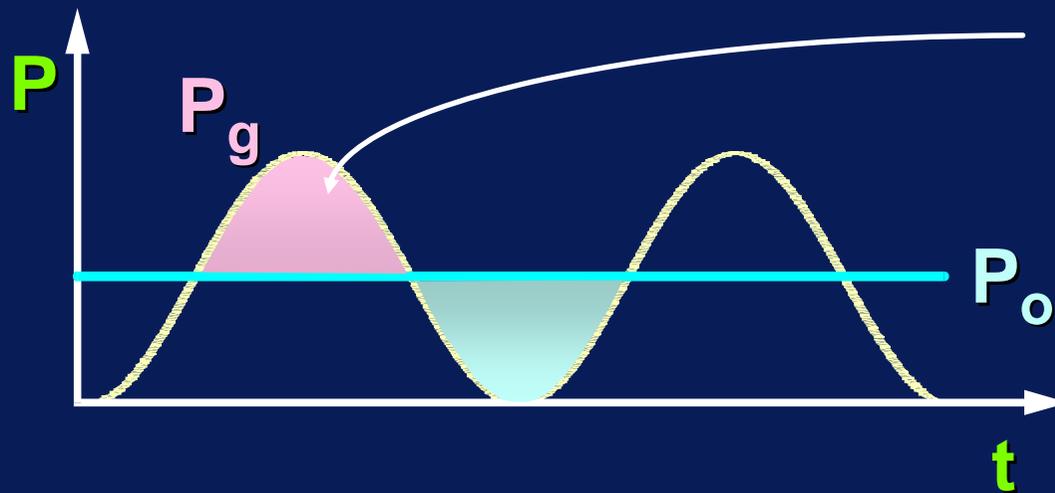


Dimensionamento del condensatore d'uscita di un PFC



$$W = \frac{P_o}{\omega} = \frac{P_o}{2\pi f_g}$$

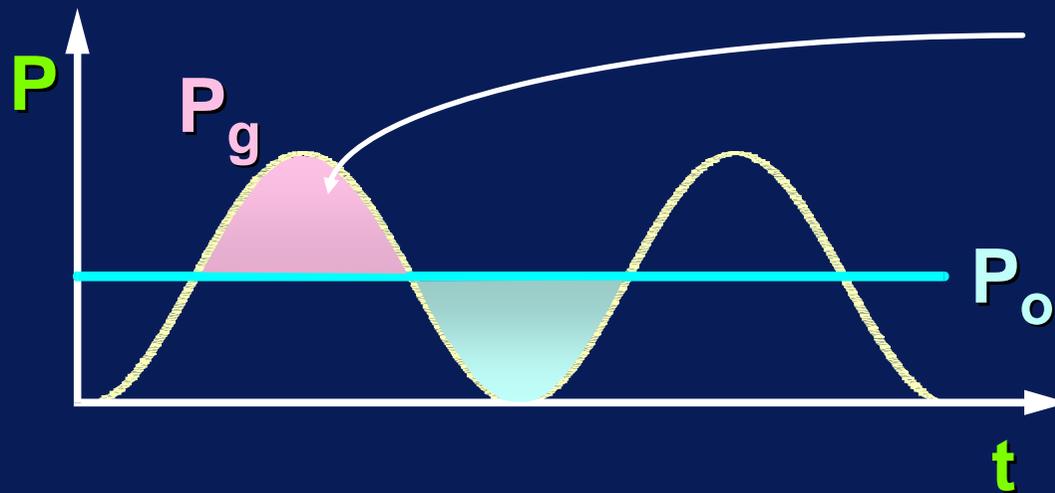
Dimensionamento del condensatore d'uscita di un PFC



$$W = \frac{P_o}{\omega} = \frac{P_o}{2\pi f_g}$$

L'energia associata alla potenza fluttuante viene scambiata tra rete e condensatore di filtro, generando un'ondulazione di tensione

Dimensionamento del condensatore d'uscita di un PFC



$$W = \frac{P_o}{\omega} = \frac{P_o}{2\pi f_g}$$

L'energia associata alla potenza fluttuante viene scambiata tra rete e condensatore di filtro, generando un'ondulazione di tensione

$$C = \frac{W}{U_o \Delta U_o}$$

Dimensionamento del condensatore d'uscita di un PFC

$$C = \frac{W}{U_o \Delta U_o}$$

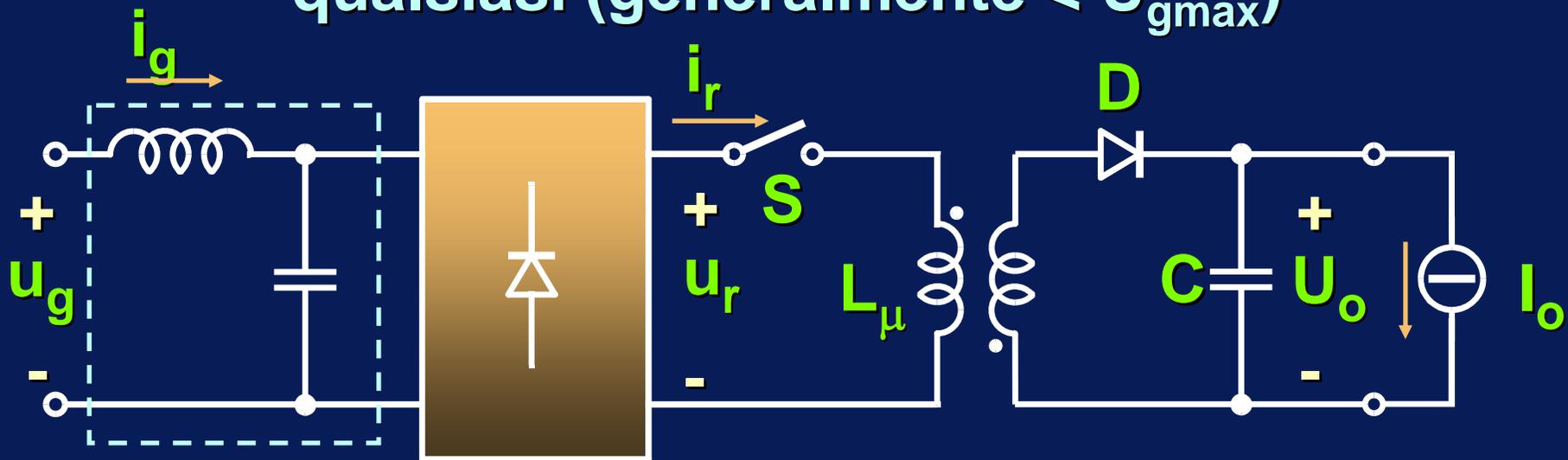
- per avere bassa ondulazione della tensione di uscita occorre usare grandi capacità
- ciò limita la banda passante del PFC

PFC con isolamento

Includono un trasformatore AF e forniscono una tensione di uscita pre-regolata di valore qualsiasi (generalmente $< U_{gmax}$)

PFC con isolamento

Includono un trasformatore AF e forniscono una tensione di uscita pre-regolata di valore qualsiasi (generalmente $< U_{gmax}$)



Filtro
d'ingresso

Topologia Flyback

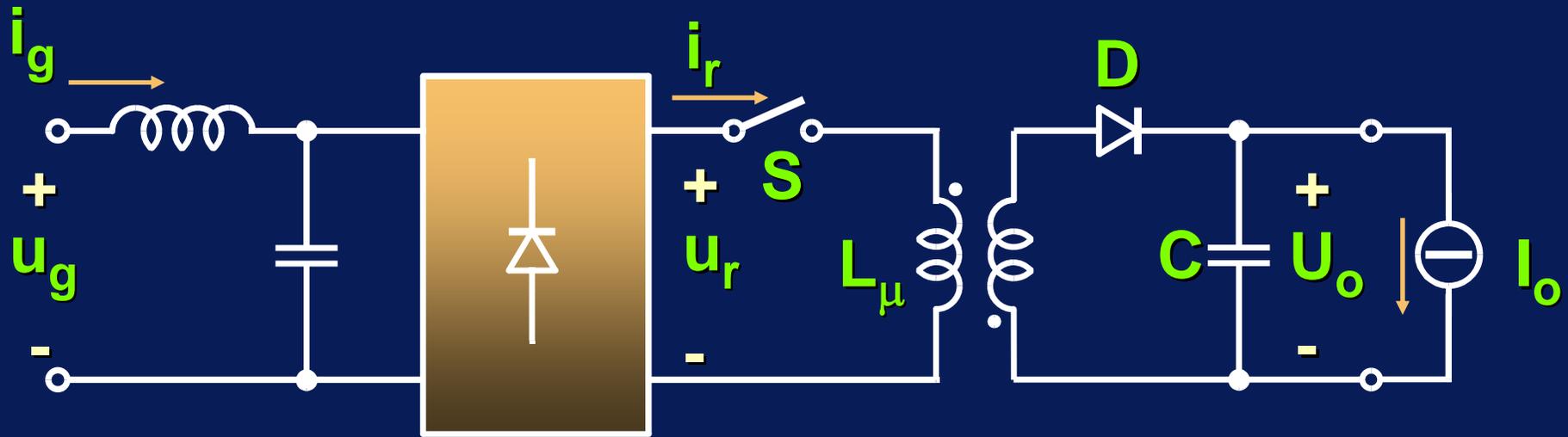
Corrente assorbita in un periodo di commutazione

Corrente assorbita in un periodo di commutazione

Funzionamento discontinuo - DCM

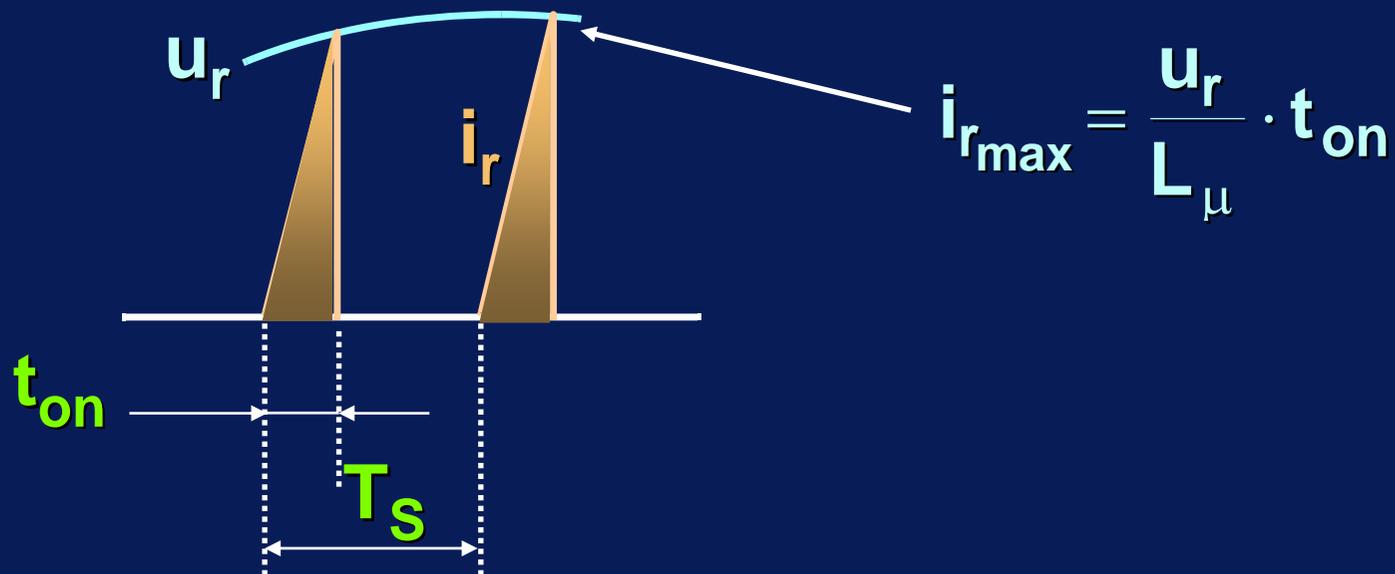
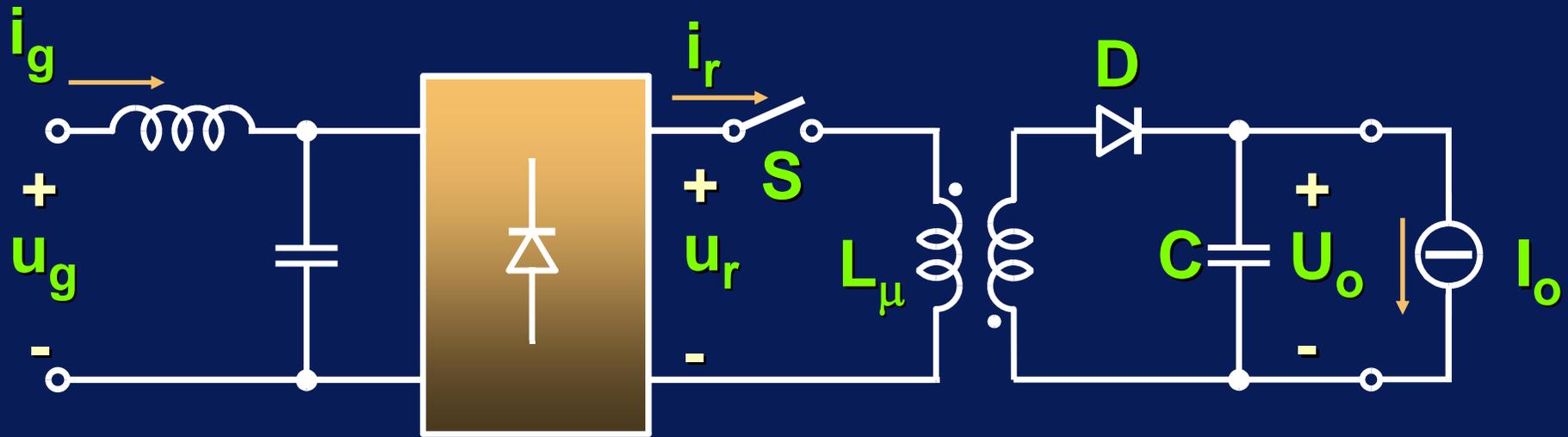
Corrente assorbita in un periodo di commutazione

Funzionamento discontinuo - DCM



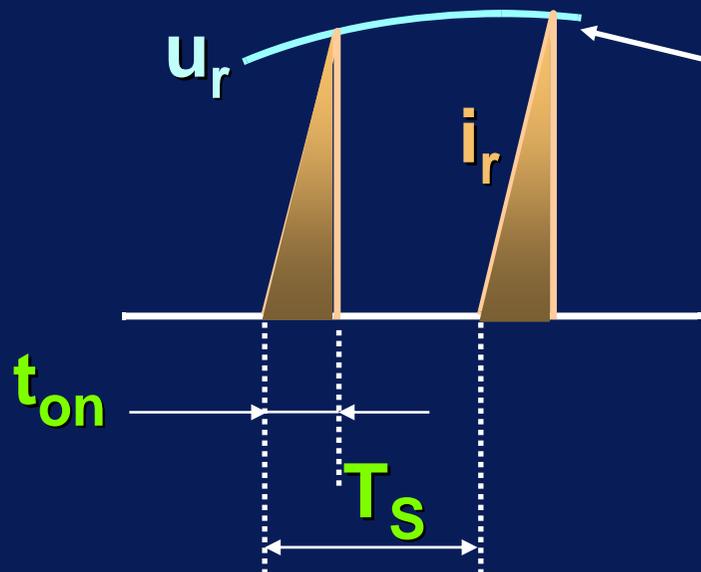
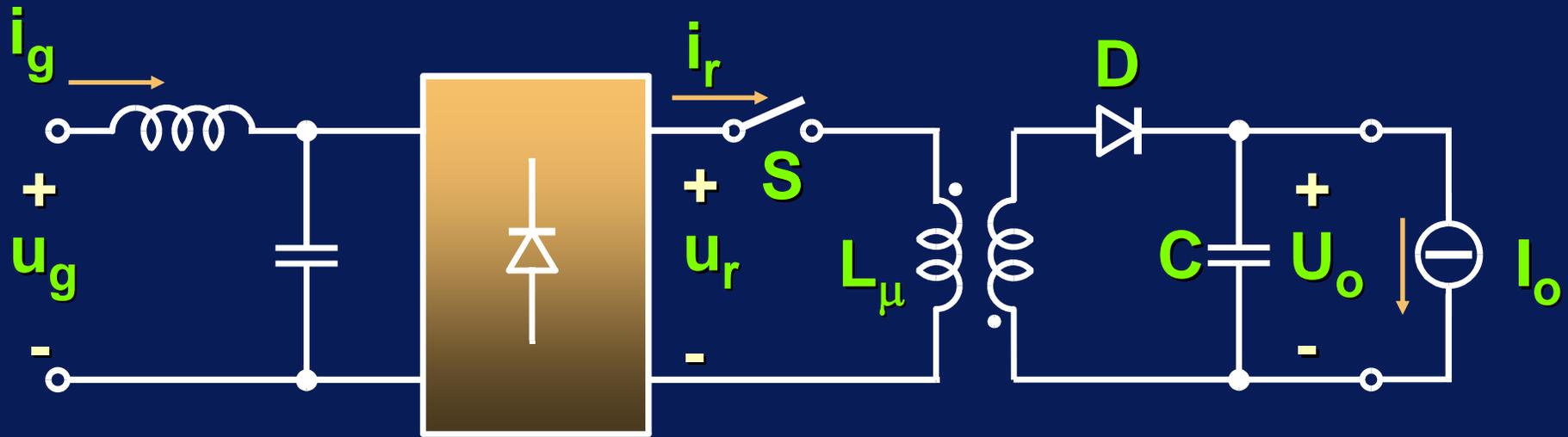
Corrente assorbita in un periodo di commutazione

Funzionamento discontinuo - DCM



Corrente assorbita in un periodo di commutazione

Funzionamento discontinuo - DCM

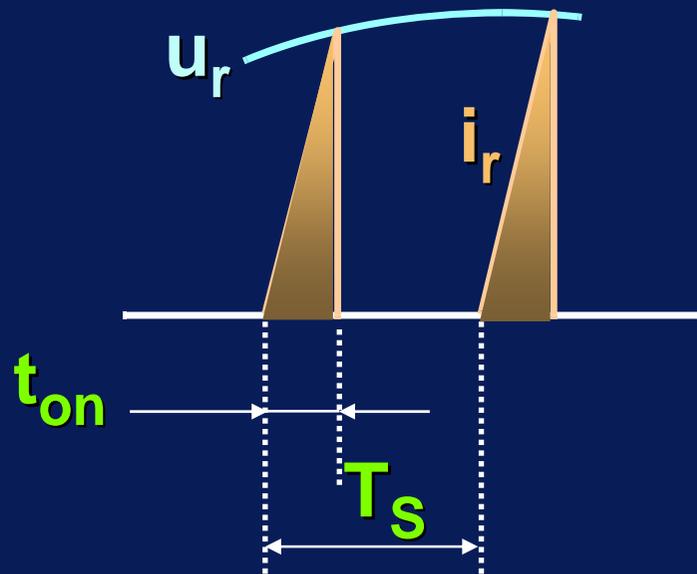


$$i_{rmax} = \frac{u_r}{L_\mu} \cdot t_{on}$$

$$i_{ravg} = \frac{i_{rmax} t_{on}}{2T_s} = \frac{u_r}{2f_s L_\mu} \delta^2$$

Funzionamento discontinuo - DCM

Se δ viene mantenuto costante in tutto il periodo di rete si ha:



$$i_{r_{avg}} = \frac{i_{r_{max}} t_{on}}{2T_s} = \frac{u_r}{2f_s L_\mu} \delta^2$$

$$i_{r_{avg}} = \frac{u_r}{R_{eq}}$$

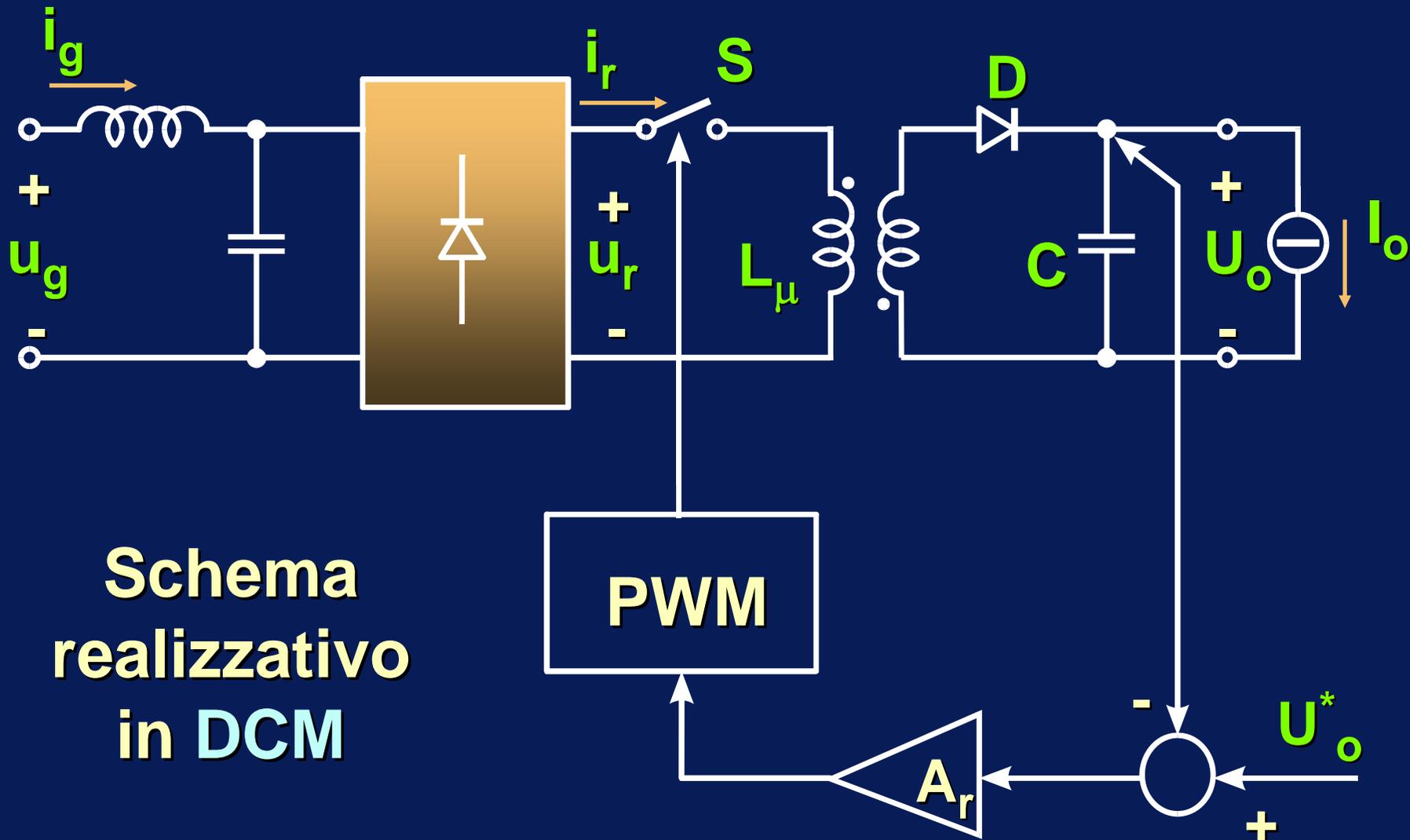
ove:

$$R_{eq} = \frac{2f_s L_\mu}{\delta^2}$$

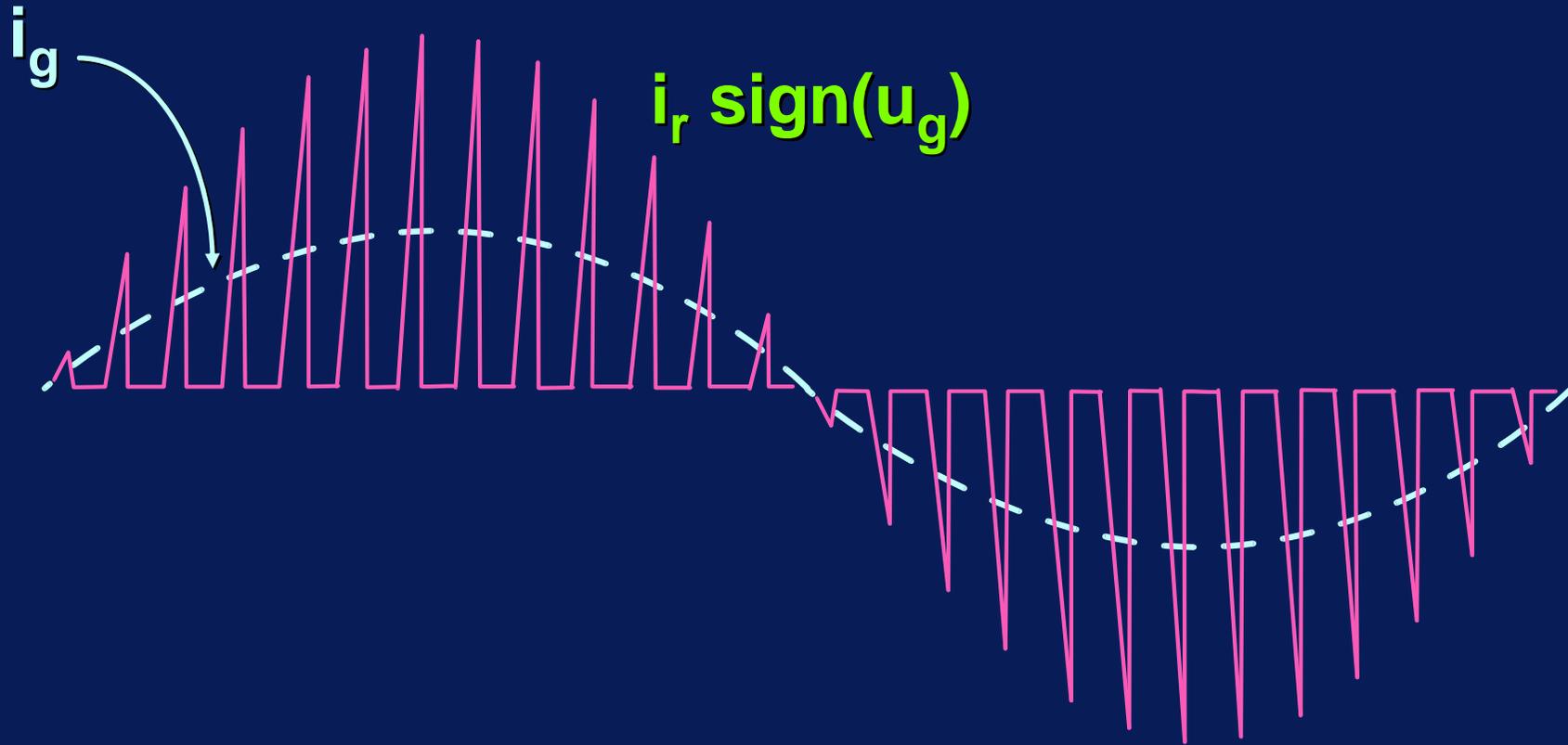
Il convertitore Flyback in funzionamento discontinuo (con duty-cycle e frequenza di commutazione costanti) garantisce $PF = 1$

- **si può usare un semplice controllo di tensione (PWM)**
- **è necessario utilizzare un filtro di ingresso per assorbire le armoniche AF contenute nella i_r**

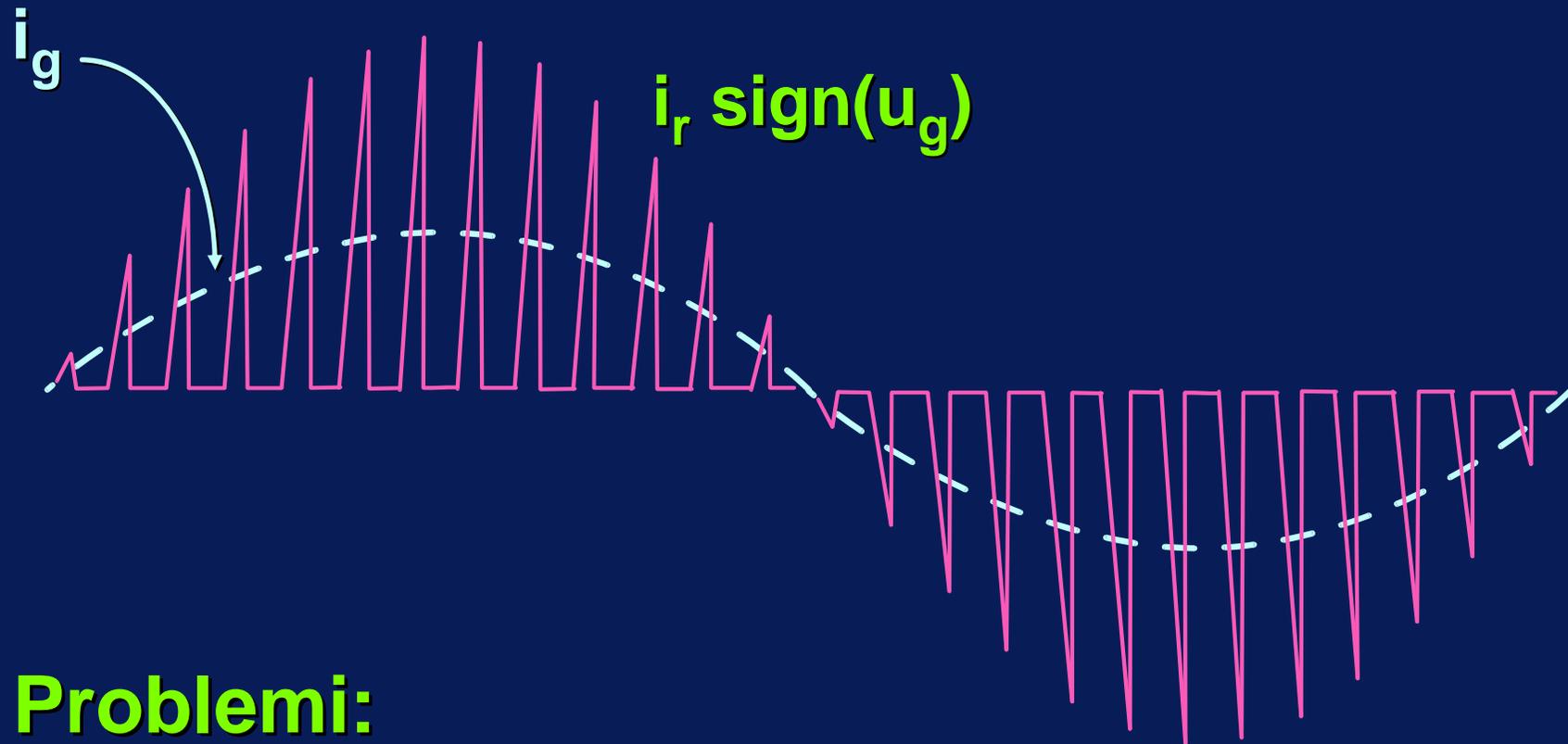
Flyback Power Factor Pre-regulator (PFP)



Corrente assorbita in DCM



Corrente assorbita in DCM



Problemi:

- fronti ripidi (disturbi RF)
- armoniche di corrente a frequenza f_s e multiple

Conclusioni

- **Le normative impongono la limitazione dell'impatto armonico causato dagli alimentatori elettronici**
- **I Power Factor Correctors costituiscono una soluzione compatta ed efficace**
- **Essi però necessitano di uno stadio d'ingresso switching, che incrementa complessità e costo del circuito e riduce il rendimento**
- **Inoltre possono generare armoniche della frequenza di commutazione e radiodisturbi**