

## 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)

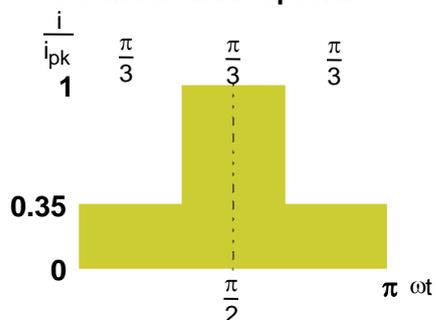
## IEC 1000-3-2

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
<b>Dispari</b>	<b>[A]</b>	<b>[A]</b>
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 ≤ n ≤ 39	2.25/n	3.375/n
<b>Pari</b>		
2	1.08	1.62
4	0.43	0.645
6	0.30	0.45
8 ≤ n ≤ 40	1.84/n	2.76/n

### LIMITI per la Classe C (> 25 W)

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

$\lambda$  è il fattore di potenza

### LIMITI per la Classe D

Ordine delle armoniche n	75 W < P < 600 W [mA/W]	P > 600 W [A]
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 W

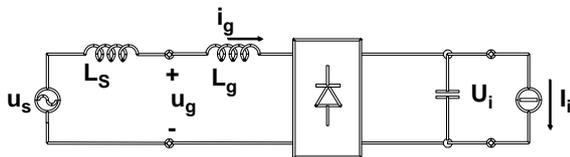
### NOTE

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

### Motivazioni delle normative

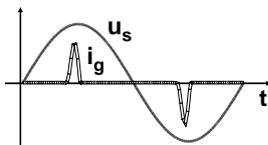
- diffusione crescente dei carichi distortenti
- peggiore utilizzazione delle reti (basso fattore di potenza)
- sovraccarico del filo neutro (sistemi trifase con carichi distortenti monofase)
- distorsione della tensione di rete
  - errori di misura
  - interventi delle protezioni
  - malfunzionamento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

### Corrente assorbita da un raddrizzatore



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

$$\begin{aligned} \text{THD}(u_g) &= 0.3\% \\ \text{THD}(i_g) &= 180\% \\ \text{PF} &= 0.48 \\ U_i &= 324 \text{ V} \end{aligned}$$



### 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**

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

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



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

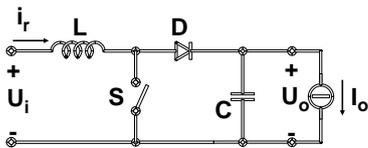
### Controllo dei PFC

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

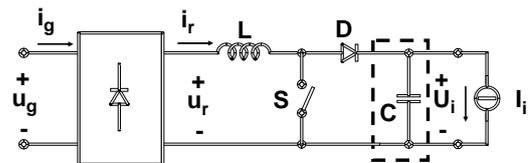


Funzionamento CCM

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

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 ( $0 < U_i < U_{imax}$ )

### PFC Boost

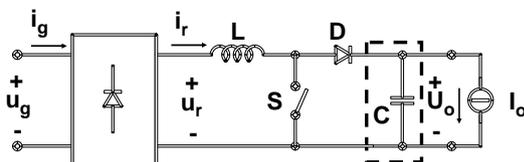


Raddrizzatore a doppia semionda

Filtro

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

### PFC Boost



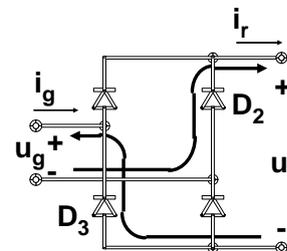
Raddrizzatore a doppia semionda

Filtro

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

$$\Rightarrow u_r = |u_g|$$

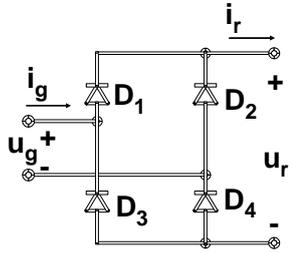
### Funzionamento del raddrizzatore a doppia semionda



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

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

### Funzionamento del raddrizzatore a doppia semionda

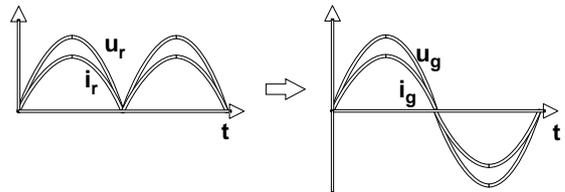


$u_g > 0 \Rightarrow D_1 \text{ e } D_4 \text{ on} \Rightarrow u_r = |u_g|$   
 $u_g < 0 \Rightarrow D_2 \text{ e } D_3 \text{ on} \Rightarrow i_g = i_r \text{ sign}(u_g)$

### Funzionamento del raddrizzatore a doppia semionda

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

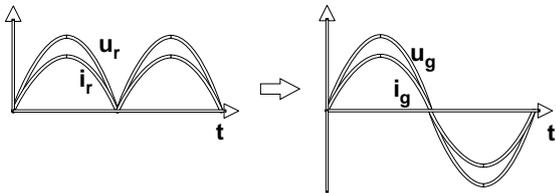
Quindi se:  $i_r = \frac{u_r}{R_{eq}} \Rightarrow i_g = \frac{u_g}{R_{eq}}$



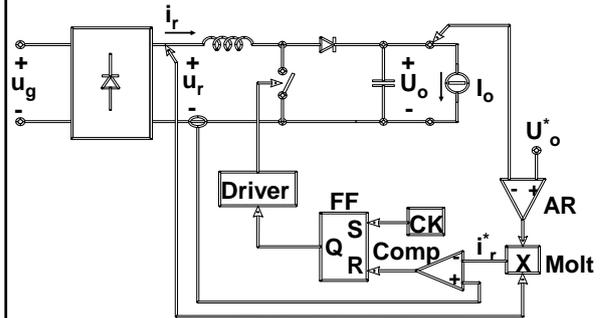
### Funzionamento del raddrizzatore a doppia semionda

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

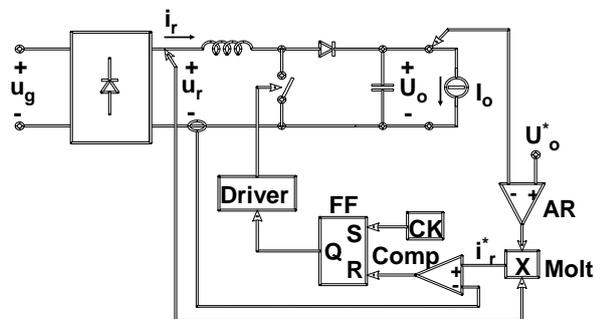
$i_r = \frac{u_r}{R_{eq}} \Rightarrow i_g = \frac{u_g}{R_{eq}}$



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.

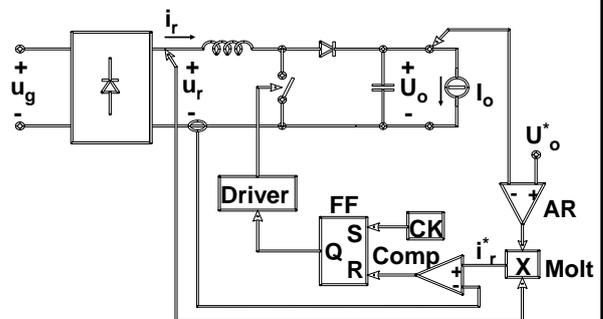


### Schema del controllo (CCM)



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  $U_o > \max(u_r)$



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 .....  $U_o = 450 \text{ V}$

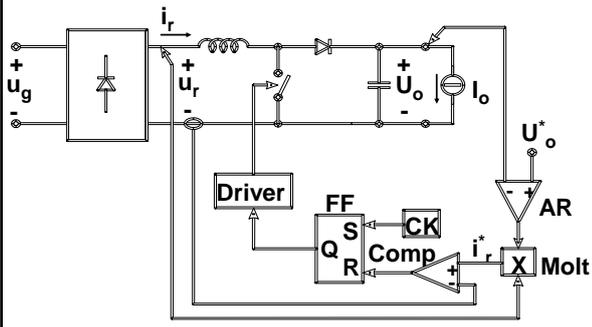
Corrente di uscita .....  $I_o = 100 \text{ A}$

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

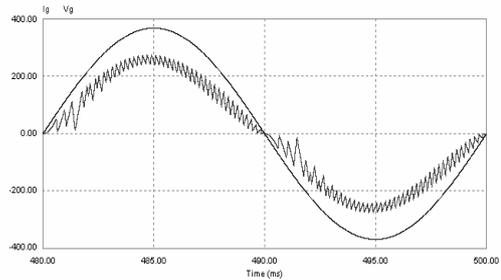
Induttanza .....  $L = 400 \mu\text{H}$

Capacità .....  $C = 7 \text{ mF}$

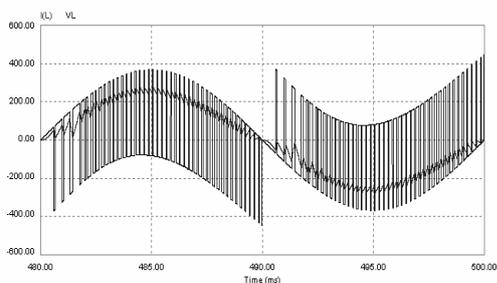
Nel circuito simulato, l'induttore e' posto a monte del raddrizzatore per ridurre la sezione del nucleo. In quel caso la misura di tensione a monte dell'induttanza deve essere raddrizzata prima di essere inviata al controllo.



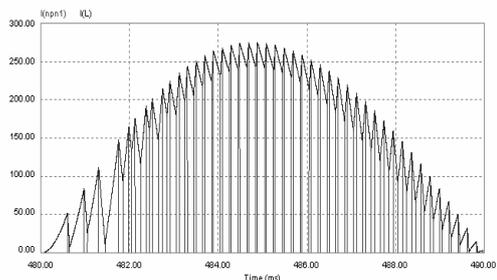
**Tensione e corrente di alimentazione**



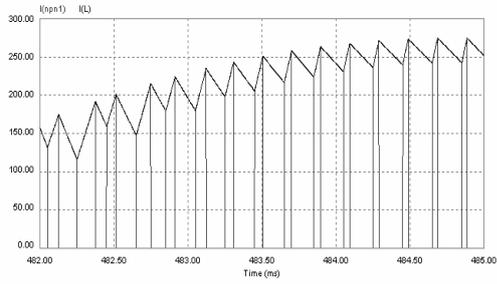
**Tensione e corrente sull'induttanza L**



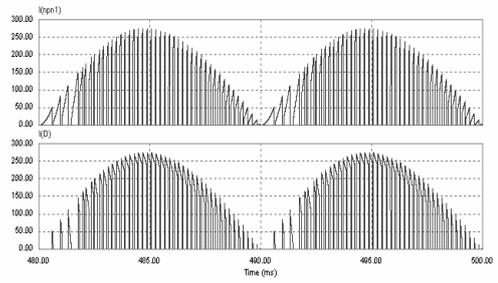
**Correnti sullo switch e sull'induttanza L**



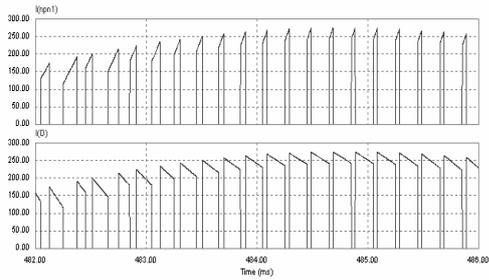
### Correnti sullo switch e sull'induttanza L espase



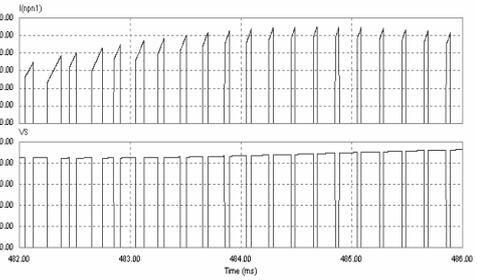
### Correnti su switch e diodo



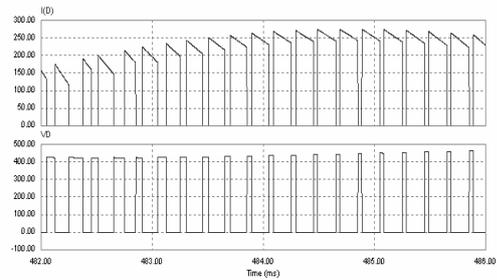
### Correnti su switch e diodo espase



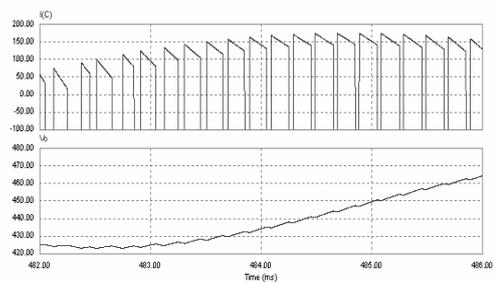
### Corrente e tensione sullo switch



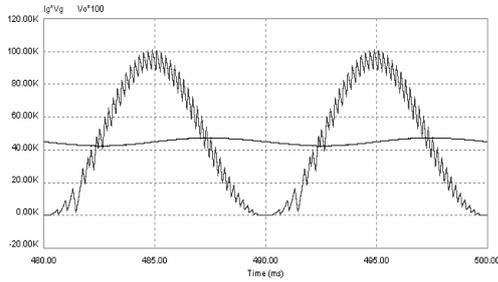
### Corrente e tensione sul diodo



### Corrente sul condensatore e Vout espase



### 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 ....  $f_s = 70 \text{ kHz}$

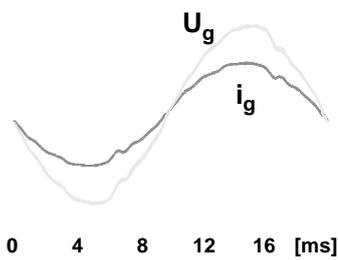
Induttanza .....  $L = 500 \mu\text{H}$

Capacità .....  $C = 450 \mu\text{F}$

### Risultati sperimentali

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

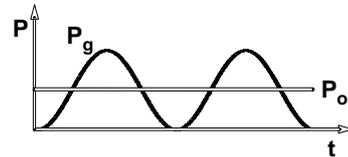
Power factor: 0.998



### Dimensionamento del condensatore d'uscita di un PFC

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

$$P_o = U_o I_o = \frac{U_g^2}{R_{eq}} \quad \text{La potenza media d'ingresso eguaglia quella d'uscita}$$

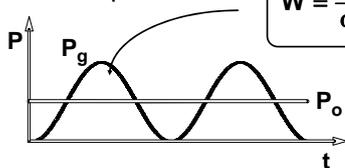


### Dimensionamento del condensatore d'uscita di un PFC

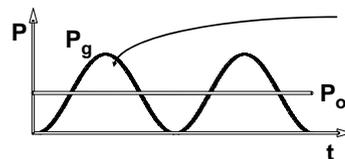
$$p_g = u_g i_g = \frac{U_{g\max}^2}{R_{eq}} \sin^2(\omega t) = \frac{U_g^2}{R_{eq}} [1 - \cos(2\omega t)]$$

$$P_o = U_o I_o = \frac{U_g^2}{R_{eq}} \quad \text{Energia scambiata dal filtro capacitivo:}$$

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



### Dimensionamento del condensatore d'uscita di un PFC



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

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

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

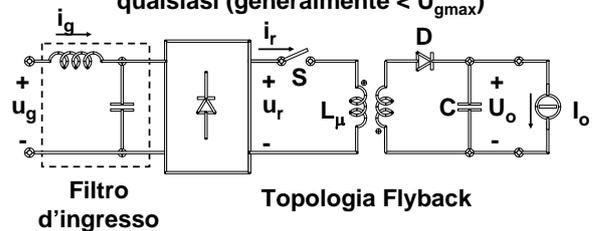
### Dimensionamento del condensatore d'uscita di un PFC

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

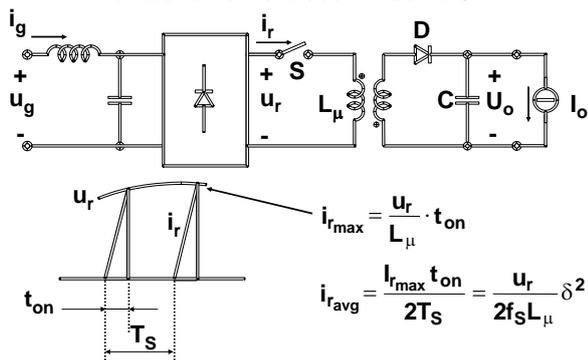
- per avere bassa ondulazione della tensione di uscita occorre usare grandi capacità
- ciò limita la banda passante del PFC

### PFC con isolamento

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

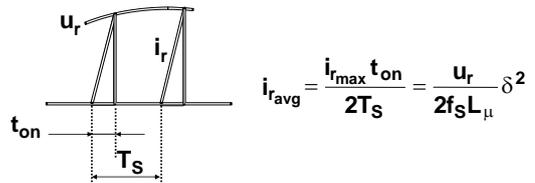


### Corrente assorbita in un periodo di commutazione Funzionamento discontinuo - DCM



### Funzionamento discontinuo - DCM

Se  $\delta$  viene mantenuto costante in tutto il periodo di rete si ha:



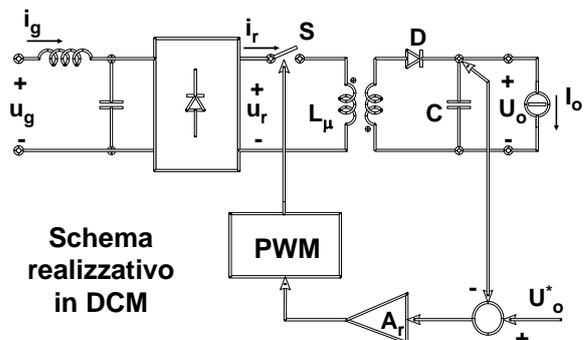
$$i_{ravg} = \frac{u_r}{R_{eq}}$$

ove:  $R_{eq} = \frac{2f_S L_\mu}{\delta^2}$

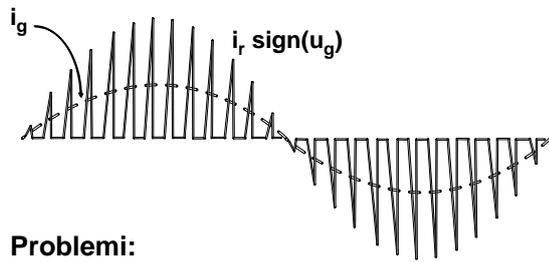
Il convertitore Flyback in funzionamento discontinuo (con duty-cycle e frequenza di commutazione costanti) garantisce  $PF = 1$

- 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



#### 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