

Corso di
ELETRONICA INDUSTRIALE

“Introduzione al Corso”

L'elettronica nei processi industriali

Perchè è così importante?

- È un componente chiave nel controllo dei processi industriali moderni, causa aumento della produttività e miglioramento della qualità dei prodotti
- Gioca un ruolo importante nei sistemi di generazione dell'energia distribuiti e nell'integrazione delle sorgenti di energia rinnovabili
- Consente significativi risparmi energetici
- I processi di conversione dell'energia sono ad alta efficienza
- Le apparecchiature sono caratterizzate da basso costo, alta affidabilità e densità di volume e lunga vita

L'elettronica nei processi industriali

La funzione dell'elettronica nei processi industriali è quella della conversione e del controllo della potenza elettrica, infatti nella maggioranza dei processi e azionamenti industriali è necessario fornire tensione elettrica caratterizzata da ampiezza e frequenza diverse da quelle rese disponibili dalla rete e regolabili.

Gli azionamenti a velocità variabile in particolare sono diventati sempre più frequenti perchè consentono un significativo risparmio di energia.

L'elettronica industriale è una materia interdisciplinare molto vasta che comprende l'elettronica di potenza, "motor drives", automazione, tecniche di controllo....

Questo corso tratta delle topologie circuitali, componenti di base e strategie di controllo per la conversione di energia elettrica.

Elettronica Industriale

Conversione di energia

- Conversione **elettrica**, alimentatori regolati in **continua e alternata**



- Le grandezze elettriche erogate al carico hanno caratteristiche di ampiezza e frequenza **diverse** da quelle dell'alimentazione
- Il convertitore statico ha rendimento **molto alto** poiché é realizzato con componenti a basse perdite

Elettronica Industriale

Conversione di energia

- Conversione **elettrica**
- Conversione **elettro-meccanica** → **Azionamenti**



- La grandezza di uscita é **meccanica** (coppia, velocità, posizione)
- Il convertitore statico eroga le tensioni e le correnti opportune (in ampiezza, fase e frequenza) per controllare il motore

Elettronica Industriale

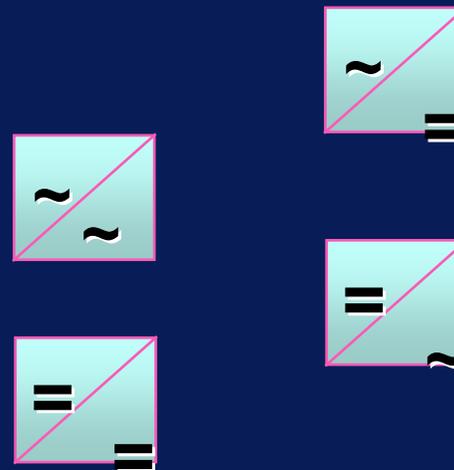
Conversione di energia

- Conversione **elettrica**
- Conversione **elettro-meccanica**
- Altre conversioni:
 - **elettro-termica** (trattamenti termici: fusione, tempra, ecc.)
 - **elettro-chimica** (processi elettrochimici: elettrolisi, elettrodeposizione, ecc.)
 - **elettro-luminosa** (regolazione luminosa, alimentazione di lampade fluorescenti, ecc.)

Tipi di convertitori

- Per le conversioni di energia si usano prevalentemente **convertitori statici**:

- **ca/cc** → raddrizzatori
- **ca/ca**
- **cc/ca** → invertitori
- **cc/cc**



Tipi di convertitori

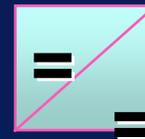
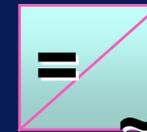
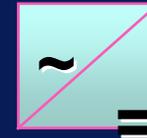
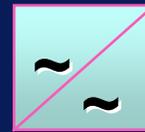
- Per le conversioni di energia si usano prevalentemente **convertitori statici**:

– **ca/cc** → raddrizzatori

– **ca/ca**

– **cc/ca** → invertitori

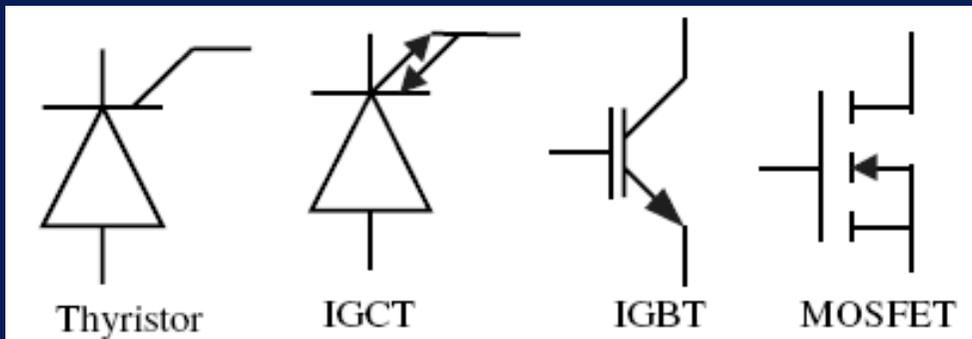
– **cc/cc**



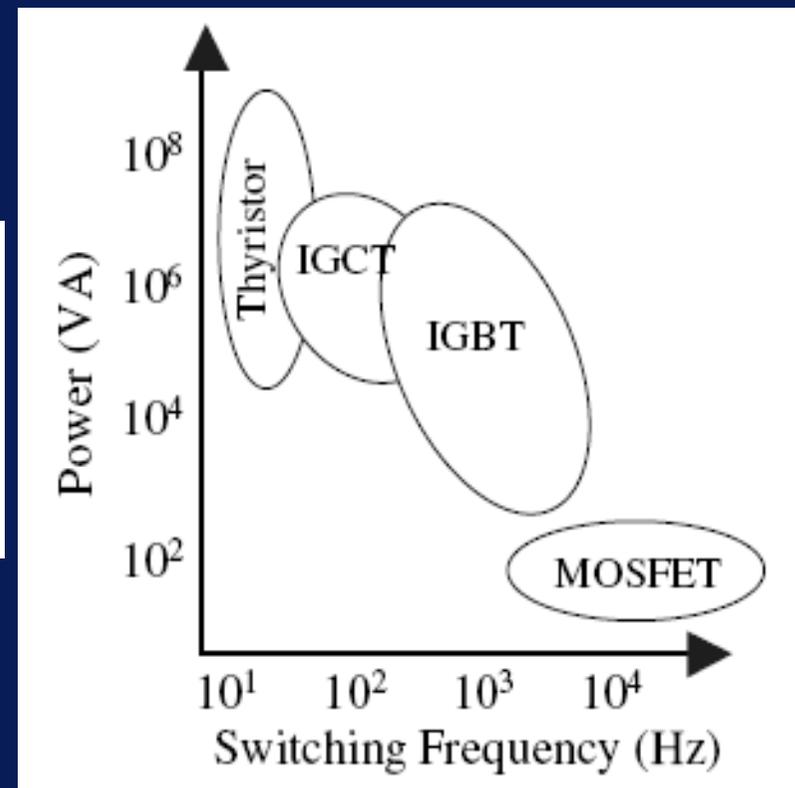
- Tutti i convertitori impiegano **interruttori elettronici (semiconduttori di potenza)** che consentono **elevata velocità** di operazione e **buon rendimento energetico**

Semiconduttori di potenza

Principali semiconduttori di potenza



Prestazioni



Settori di innovazione tecnologica

Negli anni recenti vi sono state molte innovazioni nel campo dei:

- **SEMICONDUTTORI DI POTENZA VELOCI**
- **CONTROLLORI E TECNICHE DI CONTROLLO “REAL TIME”**
- topologie circuitali di sistemi di convertitori dell'energia
- tecniche di analisi e di simulazione numerica
- macchine elettriche e drives



Queste innovazioni hanno prodotto un grande sviluppo della tecnologia dell'elettronica di potenza e “motor drives”

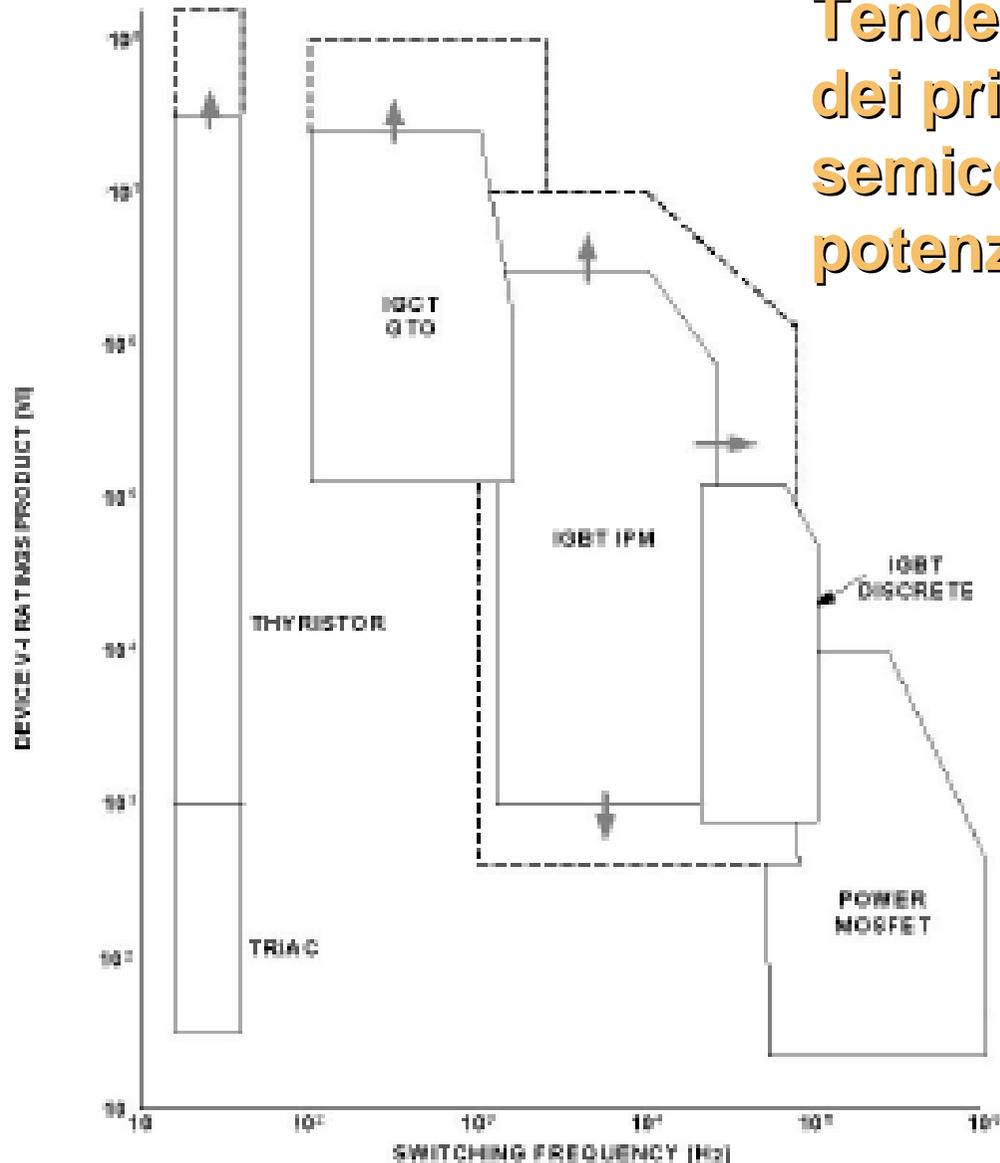


Grande proliferazione delle applicazioni di elettronica di potenza in tutti i settori: industriale, commerciale, residenziale, energetico, aerospaziale, militare, trasporti...

Settori di innovazione tecnologica

SEMICONDUTTORI DI POTENZA

Tendenza di sviluppo
dei principali
semiconduttori di
potenza



Settori di innovazione tecnologica

Orientamento e sviluppo dei semiconduttori di potenza

- **Graduale obsolescenza dei dispositivi a controllo di fase (tiristori e triac)**
- **Dominio dei semiconduttori con controllo di gate isolato (IGBT, Power Mosfet)**
- **Graduale obsolescenza dei GTO (Sostituiti dagli IGBT – potenza inferiore ed IGCT – potenza superiore)**
- **Riduzione delle cadute di tensione in conduzione nei power mosfet ed IGBT**
- **Sviluppo di componenti silicon carbide (bassissima V_{on}) che causeranno una nuova rivoluzione nel settore**

Settori di innovazione tecnologica

CONTROLLORI

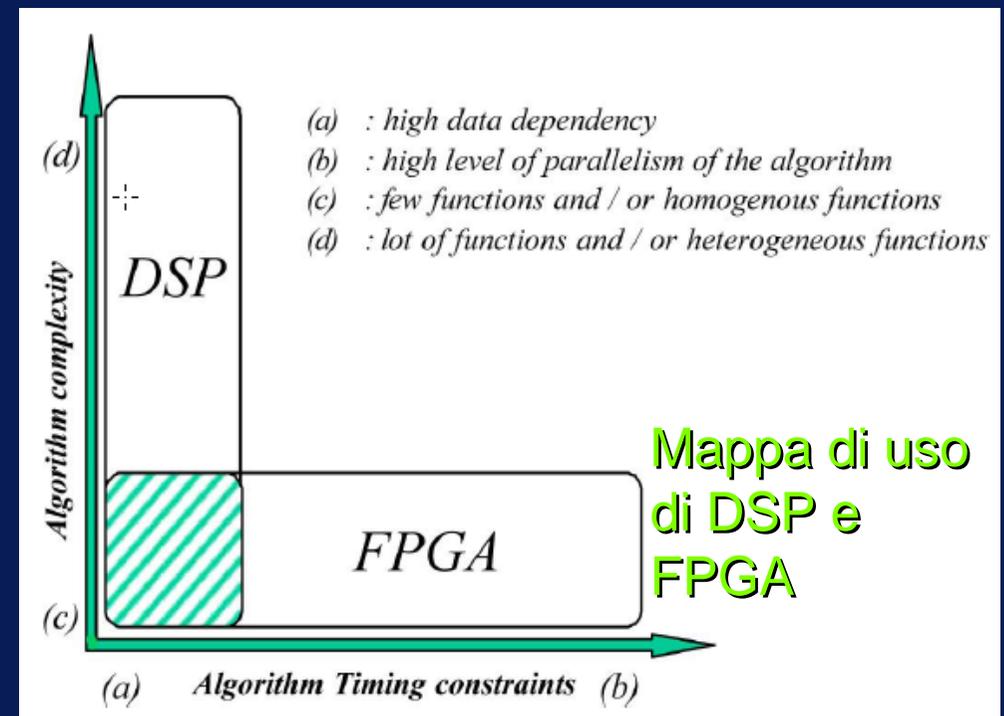
I progressi veloci delle tecnologie di integrazione su larga scala (VLSI) e delle tecniche di progettazione elettronica hanno consentito lo sviluppo di controllori complessi e di elevate performance per l'elettronica industriale.

Le prestazioni di velocità dei componenti elettronici e la flessibilità di programmazione consentono enormi opportunità di implementare tecniche di controllo digitale nei sistemi di controllo industriale.

Soluzioni software: microcontrollori o DSP (Digital Signal Processing)

Soluzioni hardware: Field Programmable Logic Arrays (FPGA)
Matrici di blocchi logici configurabili connessi da una rete di connessioni programmabili

Per il progetto di controllori per sistemi elettrici si possono in generale scegliere entrambe le soluzioni come indicato in figura dall'area tratteggiata in verde



Settori di impiego

- **Alimentatori**
 - circuiti elettronici
 - lampade
 - riscaldamento elettrico
 - impianti elettrochimici

Settori di impiego

- Alimentatori
- Interfacce di rete
 - rifasamento statico
 - correzione attiva del fattore di potenza
 - convertitori di frequenza
 - filtri attivi

Settori di impiego

- **Alimentatori**
- **Interfacce di rete**
- **Azionamenti**
 - **applicazioni industriali**
 - laminatoi
 - trafilati
 - continue per carta, plastica, tessuti, ...
 - macchine utensili (torni, frese, ecc.)
 - macchine operatrici (aspi, nastri trasportatori, fusi, ...)

Settori di impiego

- **Alimentatori**
- **Interfacce di rete**
- **Azionamenti**
 - **applicazioni industriali**
 - **applicazioni civili**
 - **elettrodomestici (utensili, lavatrici, lavastoviglie, rasoi, phon, ecc.)**
 - **ambiente (ventilazione, condizionamento, riscaldamento, pompe, ecc.)**
 - **consumer (CD, registratori, telecamere, ecc.)**

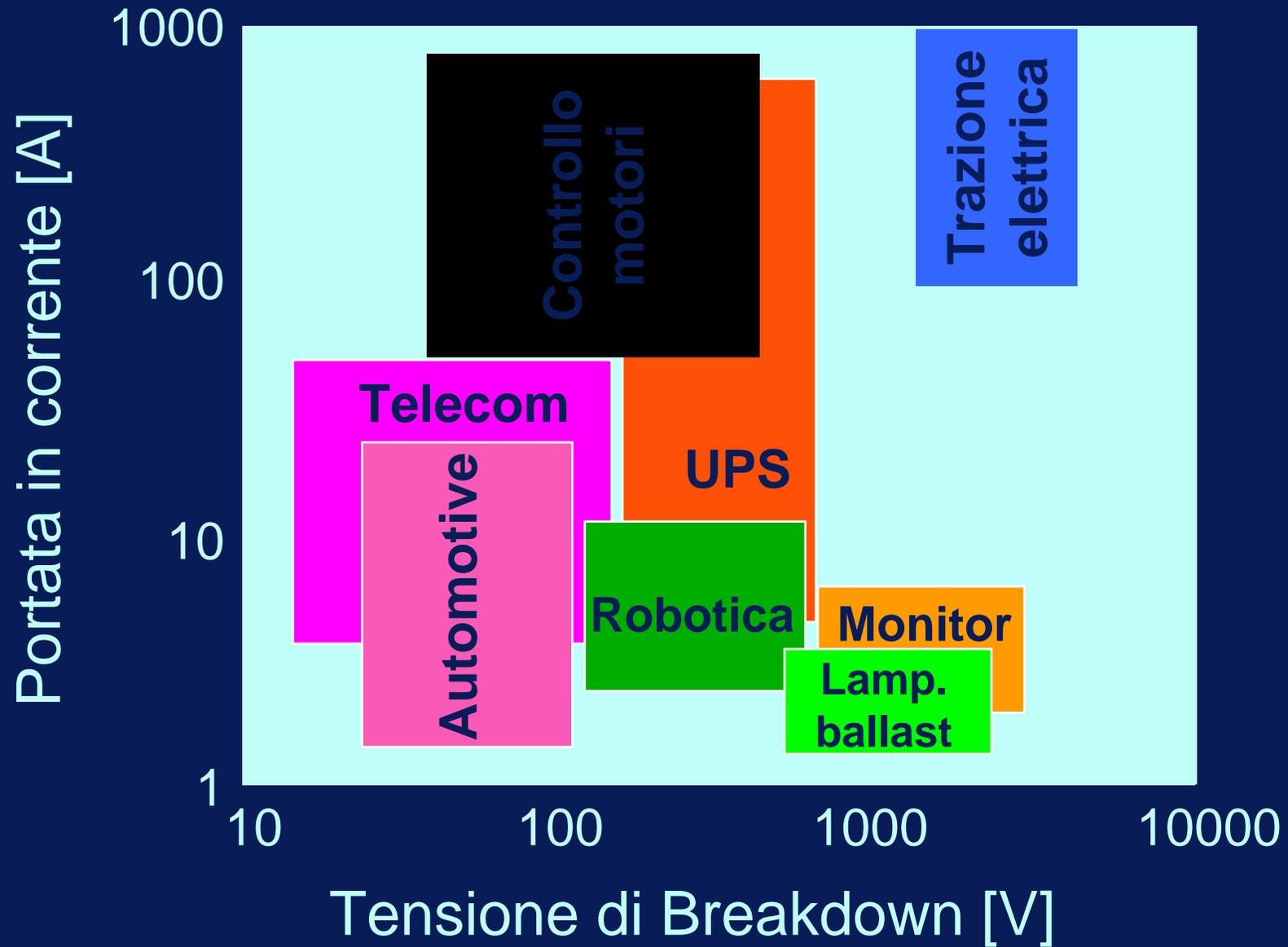
Settori di impiego

- **Alimentatori**
- **Interfacce di rete**
- **Azionamenti**
 - **applicazioni industriali**
 - **applicazioni civili**
 - **applicazioni per trazione**
 - **treni, metropolitane, filobus**
 - **ascensori e montacarichi**
 - **carri ponte e gru**
 - **funivie, cabinovie, skilift**
 - **autoveicoli elettrici**

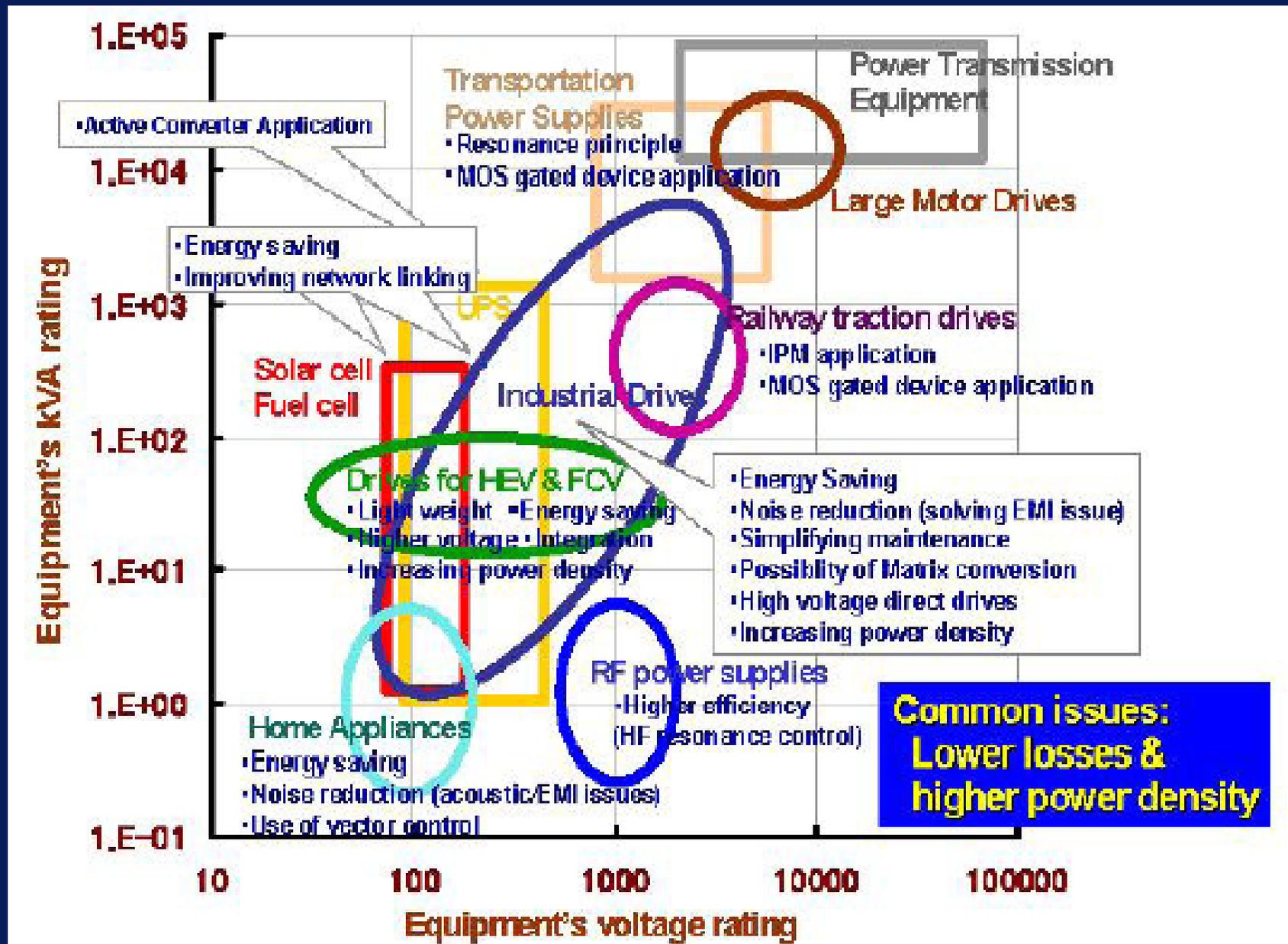
Settori di impiego

- Alimentatori
- Interfacce di rete
- Azionamenti
- Generazione, trasmissione e distribuzione dell'energia
 - Conversione fotovoltaica e celle a combustibile
 - Trasmissione dell'energia in continua ad altissima tensione (HVDC)
 - Integrazione di sorgenti di energia rinnovabile nella rete elettrica
 - Regolazione dell'energia nei motori ibridi

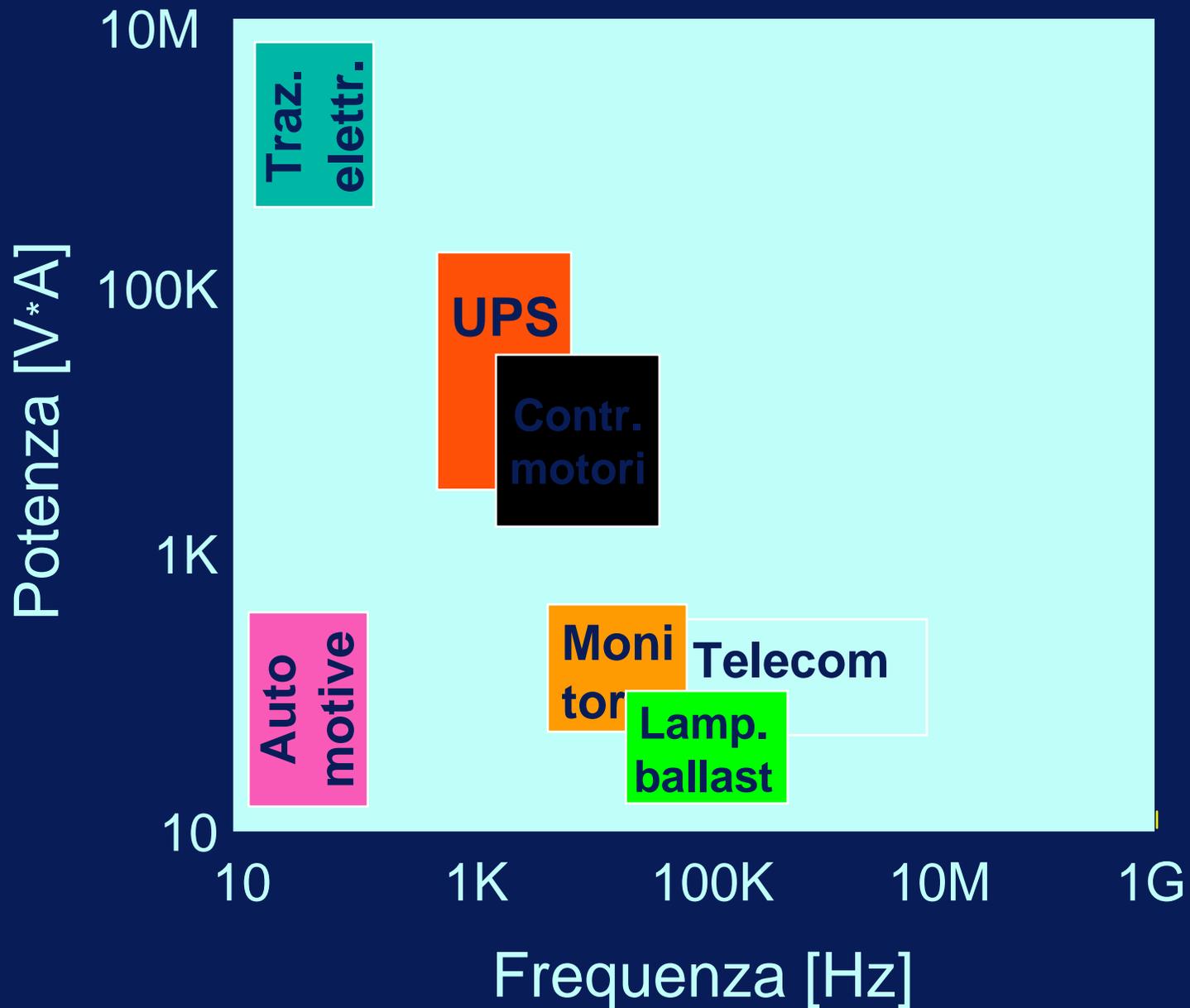
INTERVALLI DI TENSIONI E CORRENTI TIPICI DI ALCUNI SETTORI DI IMPIEGO



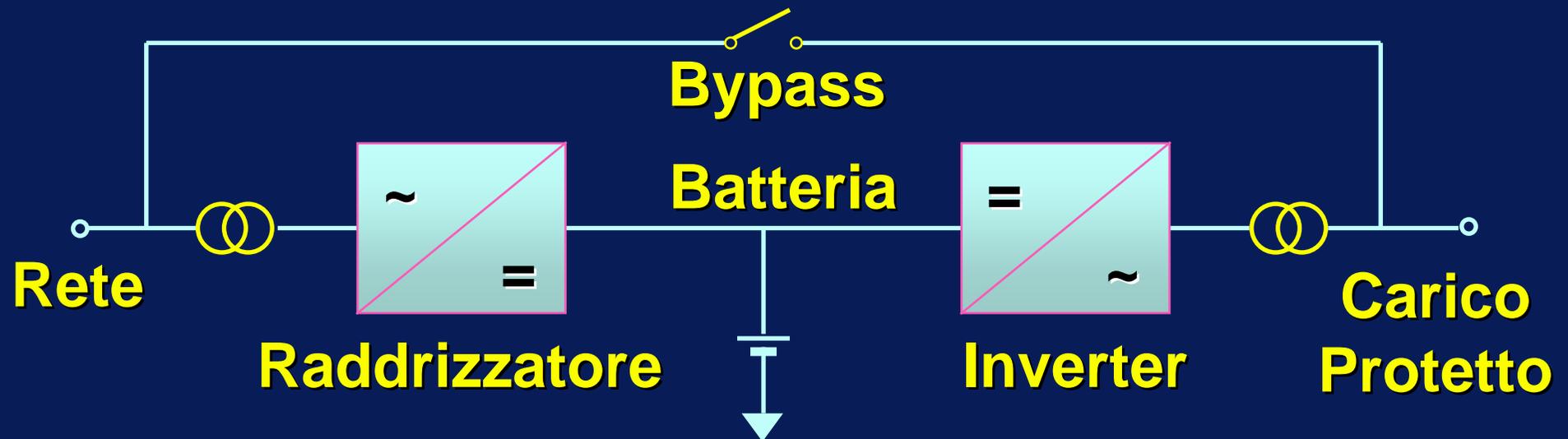
Mappa di applicazione di diverse apparecchiature di potenza e relativo dimensionamento in potenza (dati 2007)



INTERVALLI DI POTENZE E FREQUENZE TIPICI DI ALCUNI SETTORI DI IMPIEGO

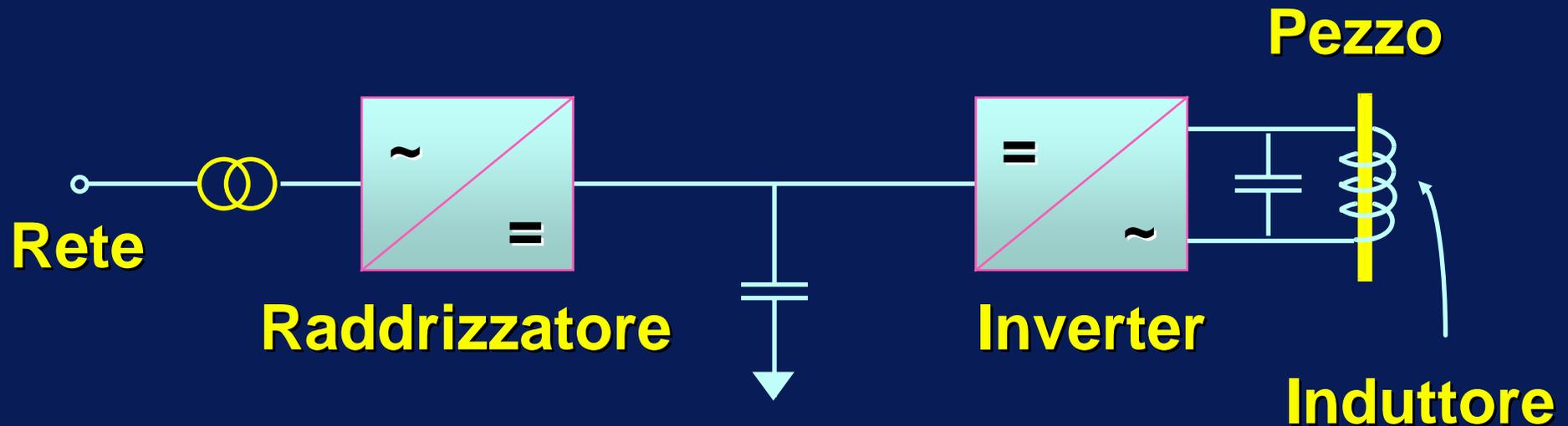


Esempio di applicazione: Gruppo di continuità (UPS, Uninterruptible Power Supply)



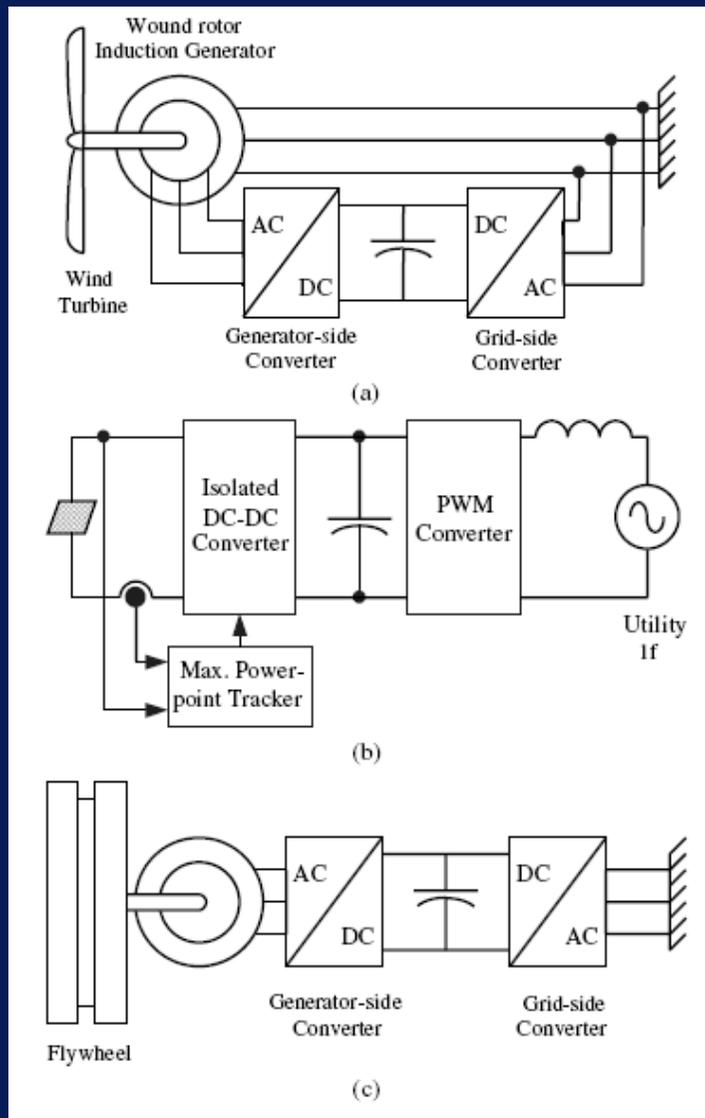
- Il carico viene alimentato anche in assenza di rete prelevando energia dalla batteria
- L'inverter fornisce tensioni molto stabili in frequenza, ampiezza e forma d'onda
- Il bypass consente l'alimentazione diretta dalla rete in caso di guasto dell'inverter o sovraccarico

Esempio di applicazione: Forno ad induzione



- L'inverter genera una **corrente ad AF** nell'induttore
- Il pezzo metallico viene **riscaldato** dalle correnti di Foucault
- Lo **spessore** del trattamento termico dipende dalla **frequenza** della corrente impressa nell'induttore
- Il carico induttivo viene rifasato capacitivamente (inverter con carico risonante)

Esempio di applicazione: Interfacce verso la rete di sistemi distribuiti per la generazione di energia



Generatori eolici: statore connesso direttamente alla rete, il sistema di conversione controlla le correnti del rotore al fine di agire sulla velocità del rotore. Il sistema di conversione consente anche di controllare la potenza reattiva

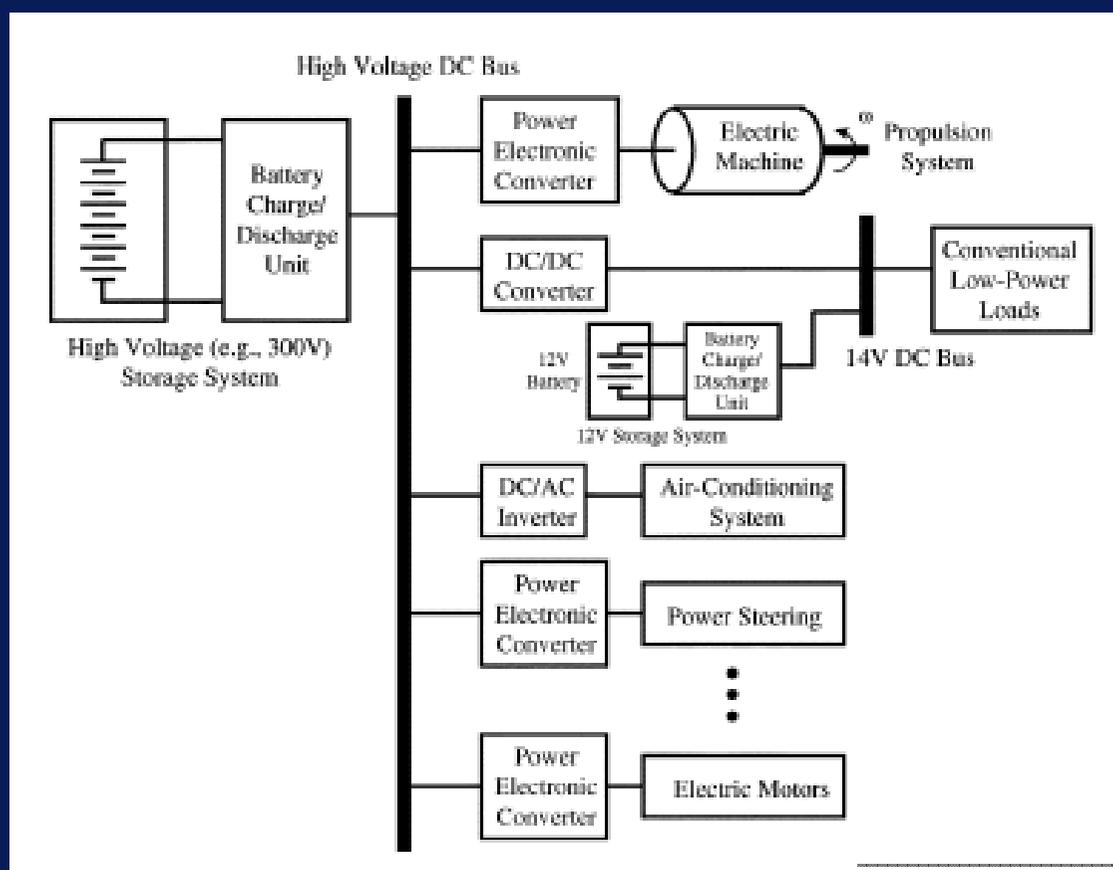
Generatori fotovoltaici: il sistema di conversione serve per generare una tensione sinusoidale di ampiezza e frequenza compatibili con la rete

Sistemi di immagazzinamento dell'energia (es.volano): il sistema di conversione di nuovo serve per adattare ampiezza e frequenza della tensione alla rete

Esempio di applicazione: autoveicoli elettrici

Settore in forte sviluppo

Trend



Sostituzione dei sistemi meccanici ed idraulici con sistemi elettrici ed elettronici

Oggi circa un terzo del costo totale di un veicolo avanzato copre la parte elettrica/elettronica contro il 3% di un veicolo del 1978

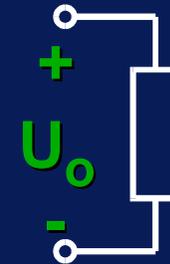
Struttura di un futuro veicolo elettrico ibrido con bus ad alta tensione

ALIMENTATORI ELETTRONICI

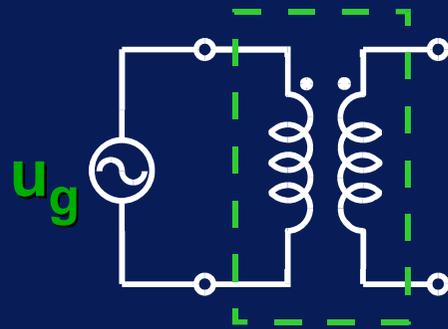
- Alimentatori elettronici non regolati
- Alimentatori con regolatori lineari
- Alimentatori con regolatori switching
(**Switched-Mode Power Supplies, SMPS**)
- Impatto sulla rete degli alimentatori
- Alimentatori con stadio di ingresso ad alto fattore di potenza (**Power Factor Correctors, PFC**)

Schema generale di un alimentatore di tensione non regolato

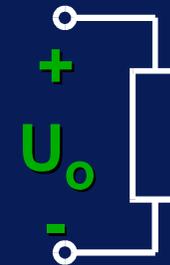
Schema generale di un alimentatore di tensione non regolato



Schema generale di un alimentatore di tensione non regolato



trasformatore



Schema generale di un alimentatore di tensione non regolato



Funzioni del trasformatore

- Isolamento tra alimentazione e carico

Schema generale di un alimentatore di tensione non regolato



Funzioni del trasformatore

- Adattamento di tensione

Schema generale di un alimentatore di tensione non regolato



Funzioni del trasformatore

- Possibilità di generare diverse tensioni tra loro isolate (sistemi multiuscita)

Funzioni del trasformatore

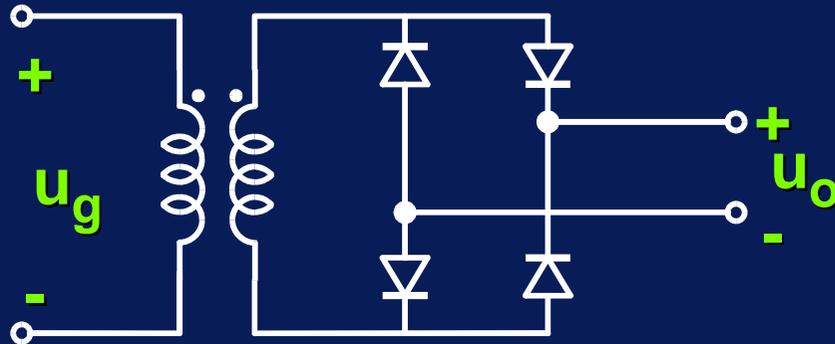
- **Isolamento tra alimentazione e carico**
- **Adattamento di tensione**
- **Possibilità di generare diverse tensioni tra loro isolate (sistemi multiuscita)**

Schema generale di un alimentatore di tensione non regolato



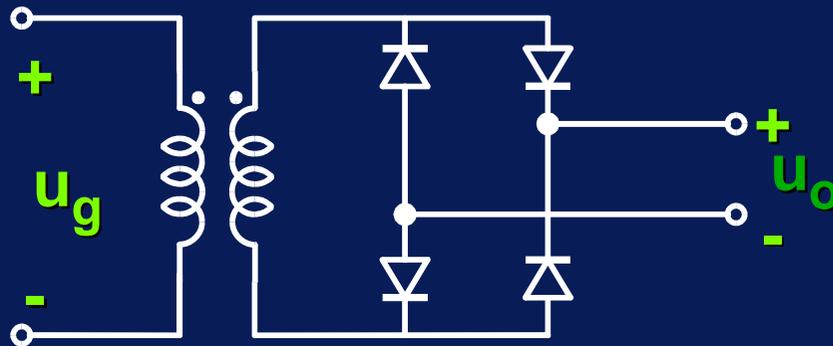
Struttura del raddrizzatore (a doppia semionda)

Struttura del raddrizzatore (a doppia semionda)

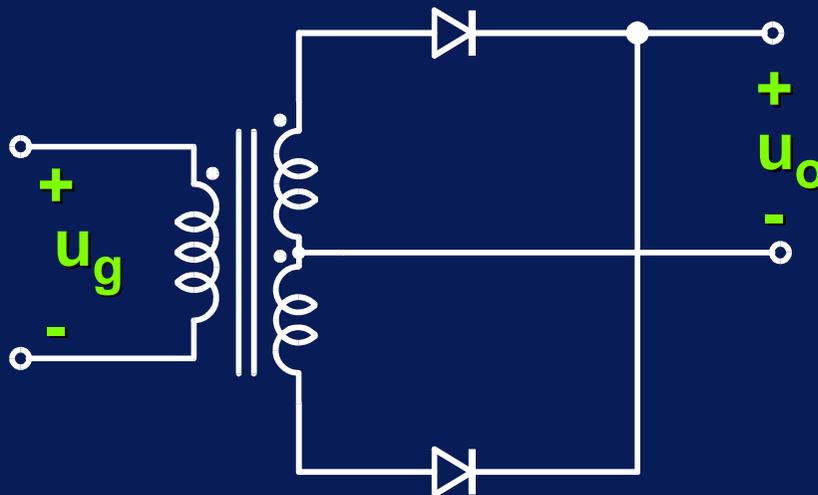


raddrizzatore a
ponte di Graetz

Struttura del raddrizzatore (a doppia semionda)



raddrizzatore a
ponte di Graetz



raddrizzatore con
trasformatore a
presa centrale

Schema generale di un alimentatore di tensione non regolato



Caratteristiche dell'alimentatore non regolato

- **Rendimento elevato**

Schema generale di un alimentatore di tensione non regolato



Caratteristiche dell'alimentatore non regolato

- Tensione di uscita non regolata
 - varia se u_g varia (+10%, -20%)
 - dipende dal carico

Schema generale di un alimentatore di tensione non regolato



Caratteristiche dell'alimentatore non regolato

- Corrente d'ingresso deformata

Schema generale di un alimentatore di tensione non regolato



Caratteristiche dell'alimentatore non regolato

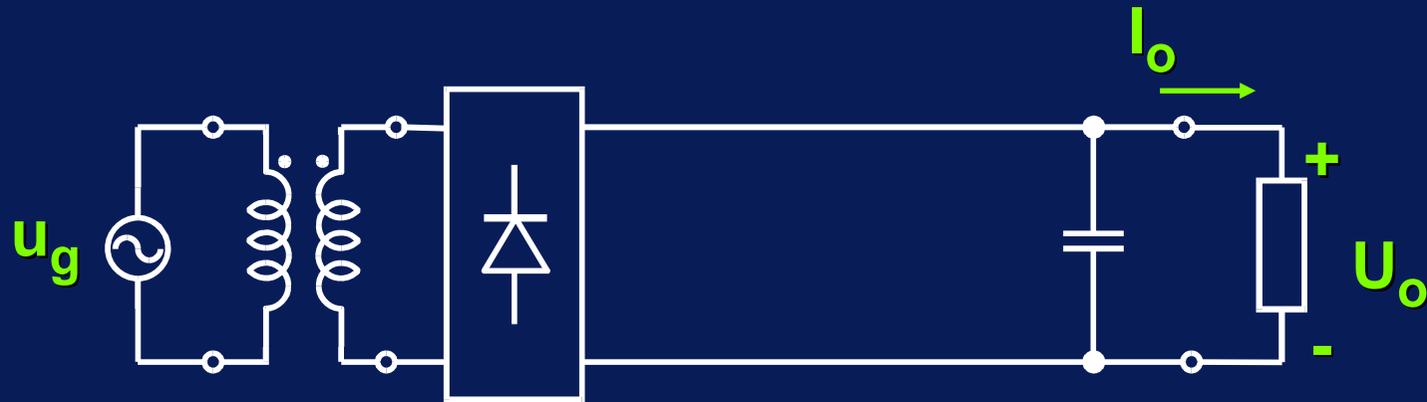
- Trasformatore a 50Hz (ingombrante e costoso)

Caratteristiche dell'alimentatore non regolato

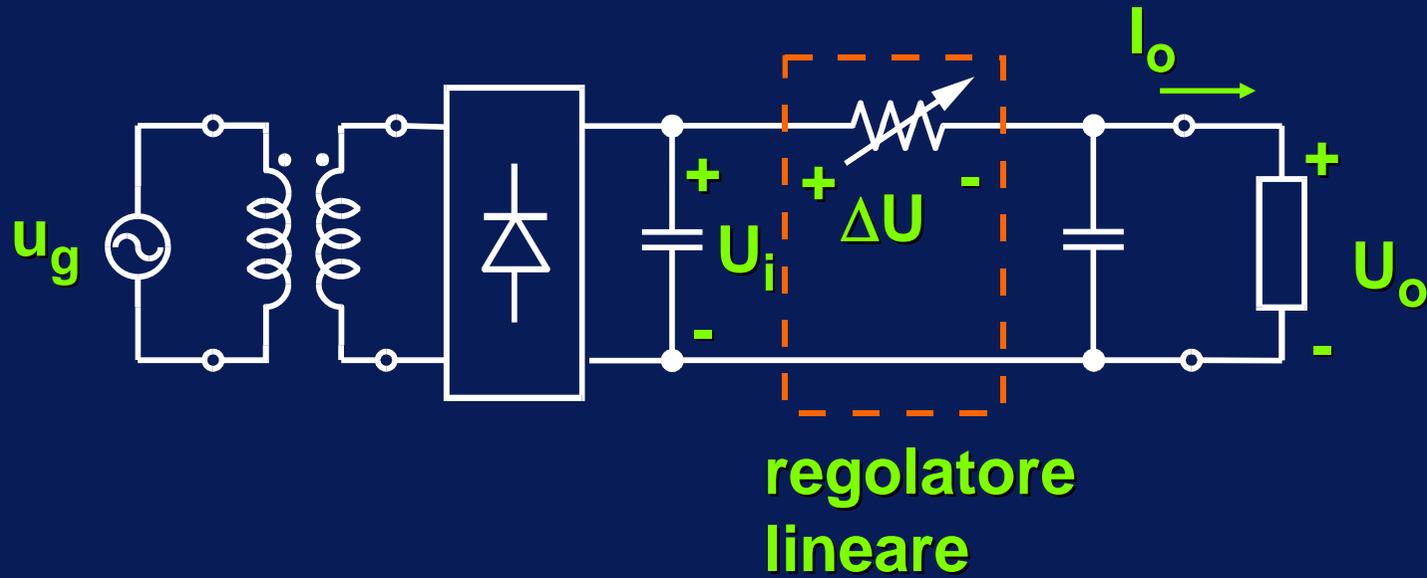
- **Rendimento elevato**
- **Tensione di uscita non regolata**
 - varia se u_g varia (+10%, -20%)
 - dipende dal carico
- **Corrente d'ingresso deformata**
- **Trasformatore a 50Hz (ingombrante e costoso)**

Alimentatore di tensione con regolatore lineare

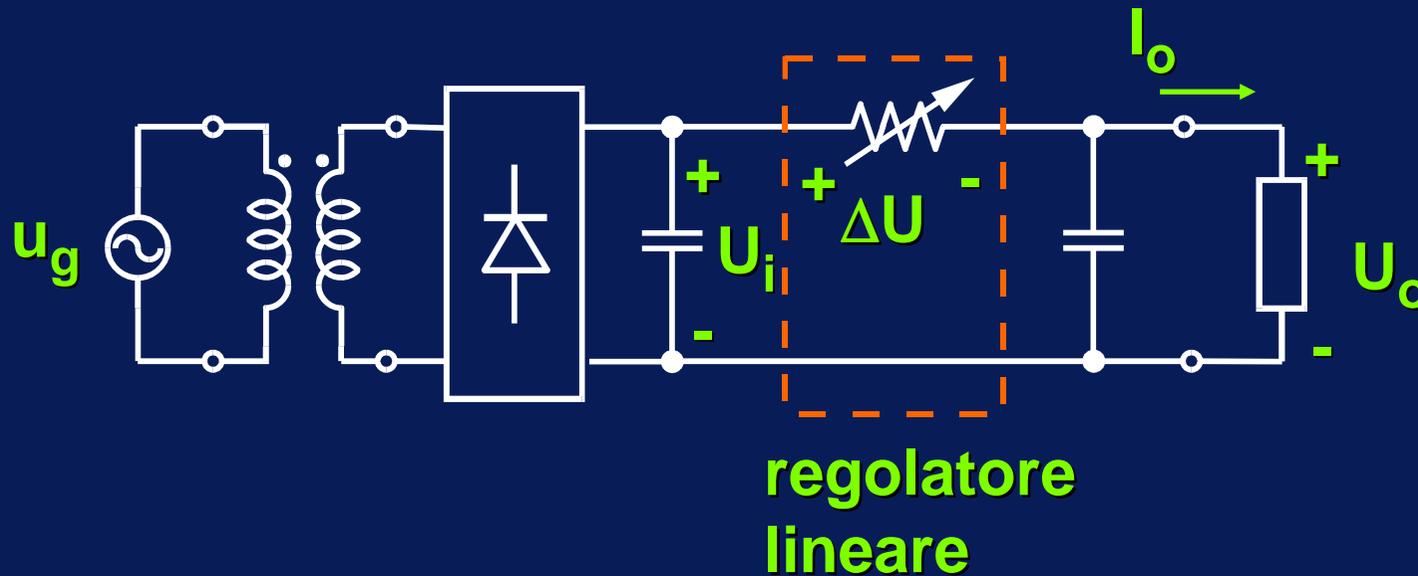
Alimentatore di tensione con regolatore lineare



Alimentatore di tensione con regolatore lineare



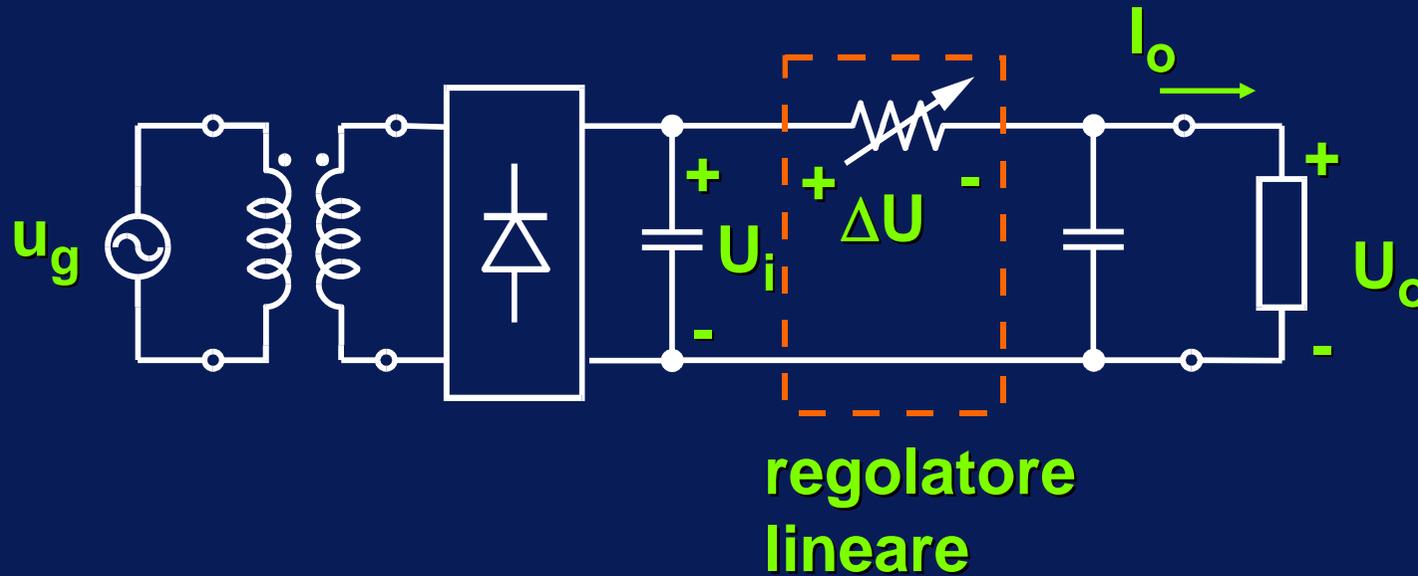
Alimentatore di tensione con regolatore lineare



Caratteristiche

- Uscita stabilizzata ad un valore fisso

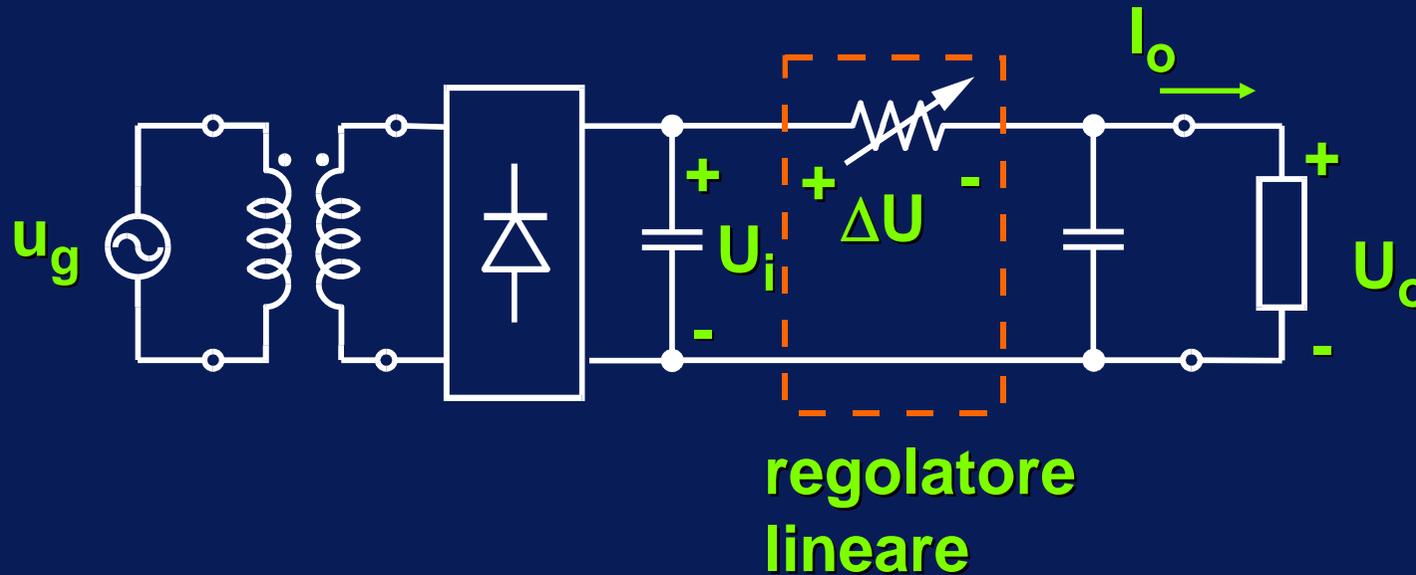
Alimentatore di tensione con regolatore lineare



Caratteristiche

- Semplice ed economico (IC commerciali)

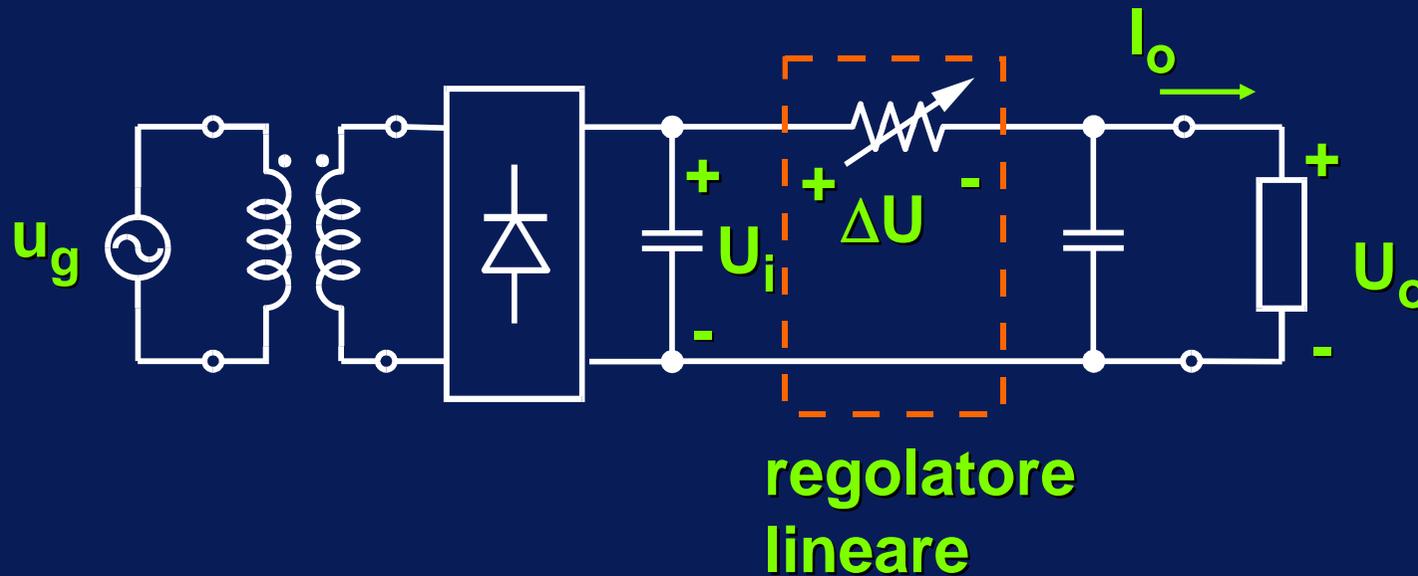
Alimentatore di tensione con regolatore lineare



Caratteristiche

- **Rendimento basso (regolatore dissipativo)**
 - $\Delta U = U_i - U_o > 3V$
 - $P_d = \Delta U I_o$ é proporzionale a I_o

Alimentatore di tensione con regolatore lineare



Caratteristiche

- Utilizzabile per piccole potenze di uscita

Caratteristiche

- Uscita stabilizzata ad un valore fisso
- Semplice ed economico (IC commerciali)
- Rendimento basso (regolatore dissipativo)
 - $\Delta U = U_i - U_o > 3V$
 - $P_d = \Delta U I_o$ é proporzionale a I_o
- Utilizzabile per piccole potenze di uscita

Esempio

Specifiche:

$$U_g = 220V \text{ rms} \pm 20\%$$

$$U_o = 12V$$

$$I_o = 1A$$

Esempio

Scelta del rapporto spire $\frac{N_1}{N_2}$ del trasformatore

$$U_{i\min} = U_o + \Delta U_{\min} = 12 + 3 = 15 \text{ V}$$

$$U_{i\min} \cong \sqrt{2} \cdot U_{g\min} \cdot \frac{N_2}{N_1}$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{\sqrt{2} \cdot 0.8 \cdot 220}{15} \longrightarrow \frac{N_1}{N_2} = 16$$

Esempio

$$U_i \cong U_g \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{N_2}{N_1} = 19V \pm 20\% \cong 15 \div 23 V$$

$$\Delta U = U_i - U_o = 3 \div 11V$$

$$P_d = \Delta U \cdot I_o = 3 \div 11W$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + P_d} = 77 \div 54\%$$

Limitazione della temperatura dei componenti

Limitazione della temperatura dei componenti

$$P_d \cdot R_{th} = \Delta T$$

Limitazione della temperatura dei componenti

$$P_d \cdot R_{th} = \Delta T$$

P_d = potenza dissipata

R_{th} = resistenza termica

ΔT = sovratemperatura = $T_{componente} - T_{ambiente}$

Limitazione della temperatura dei componenti

$$P_d \cdot R_{th} = \Delta T$$

P_d = potenza dissipata

R_{th} = resistenza termica

ΔT = sovratemperatura = $T_{componente} - T_{ambiente}$

$$T_{componente} \leq T_{max} (125 - 150 \text{ } ^\circ\text{C})$$

Limitazione della temperatura dei componenti

$$P_d \cdot R_{th} = \Delta T$$

P_d = potenza dissipata

R_{th} = resistenza termica

ΔT = sovratemperatura = $T_{componente} - T_{ambiente}$

$$T_{componente} \leq T_{max} (125 - 150 \text{ } ^\circ\text{C})$$

R_{th} dipende da

Limitazione della temperatura dei componenti

$$P_d \cdot R_{th} = \Delta T$$

P_d = potenza dissipata

R_{th} = resistenza termica

ΔT = sovratemperatura = $T_{componente} - T_{ambiente}$

$$T_{componente} \leq T_{max} (125 - 150 \text{ } ^\circ\text{C})$$

R_{th} dipende da  contenitore

Limitazione della temperatura dei componenti

$$P_d \cdot R_{th} = \Delta T$$

P_d = potenza dissipata

R_{th} = resistenza termica

ΔT = sovratemperatura = $T_{componente} - T_{ambiente}$

$$T_{componente} \leq T_{max} (125 - 150 \text{ } ^\circ\text{C})$$

R_{th} dipende da  **contenitore**
dissipatore

Limitazione della temperatura dei componenti

$$P_d \cdot R_{th} = \Delta T$$

P_d = potenza dissipata

R_{th} = resistenza termica

ΔT = sovratemperatura = $T_{componente} - T_{ambiente}$

$$T_{componente} \leq T_{max} (125 - 150 \text{ } ^\circ\text{C})$$

R_{th} dipende da

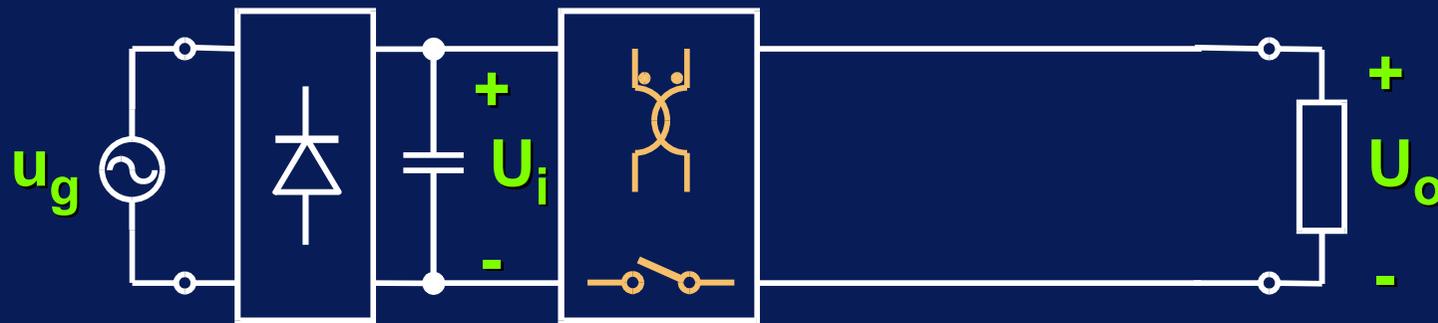
- contenitore
- dissipatore
- refrigerazione

Alimentatore con regolatore switching (Switched Mode Power Supply, SMPS)

Alimentatore con regolatore switching (Switched Mode Power Supply, SMPS)

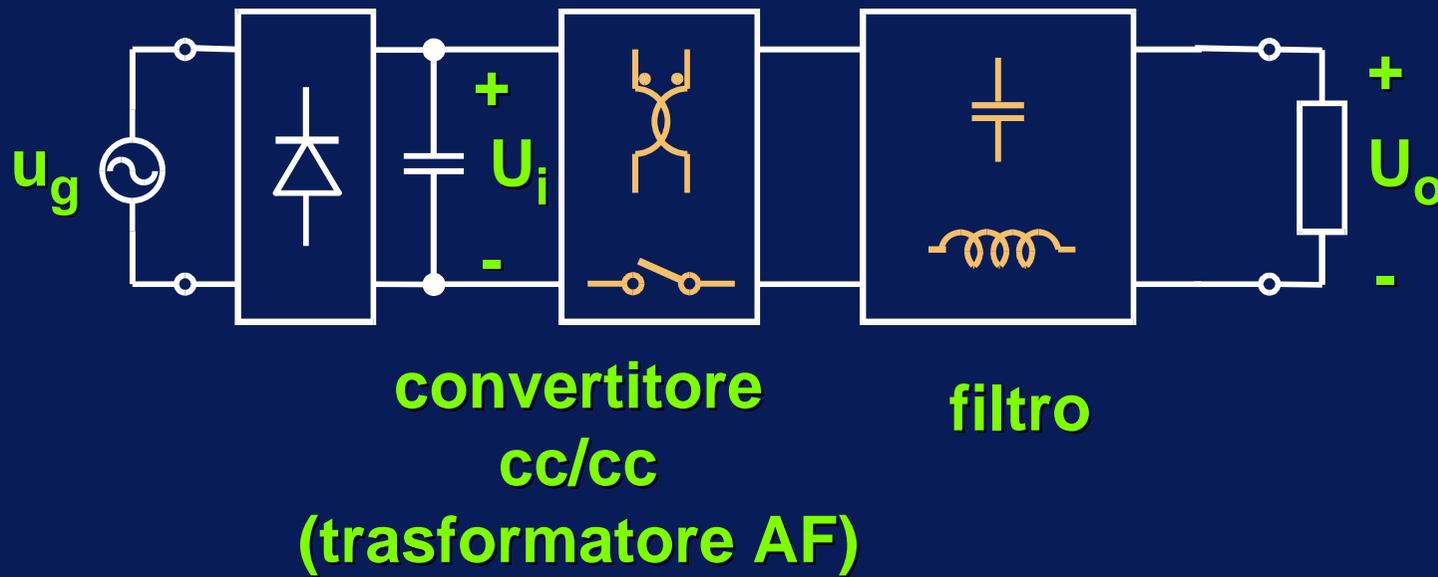


Alimentatore con regolatore switching (Switched Mode Power Supply, SMPS)

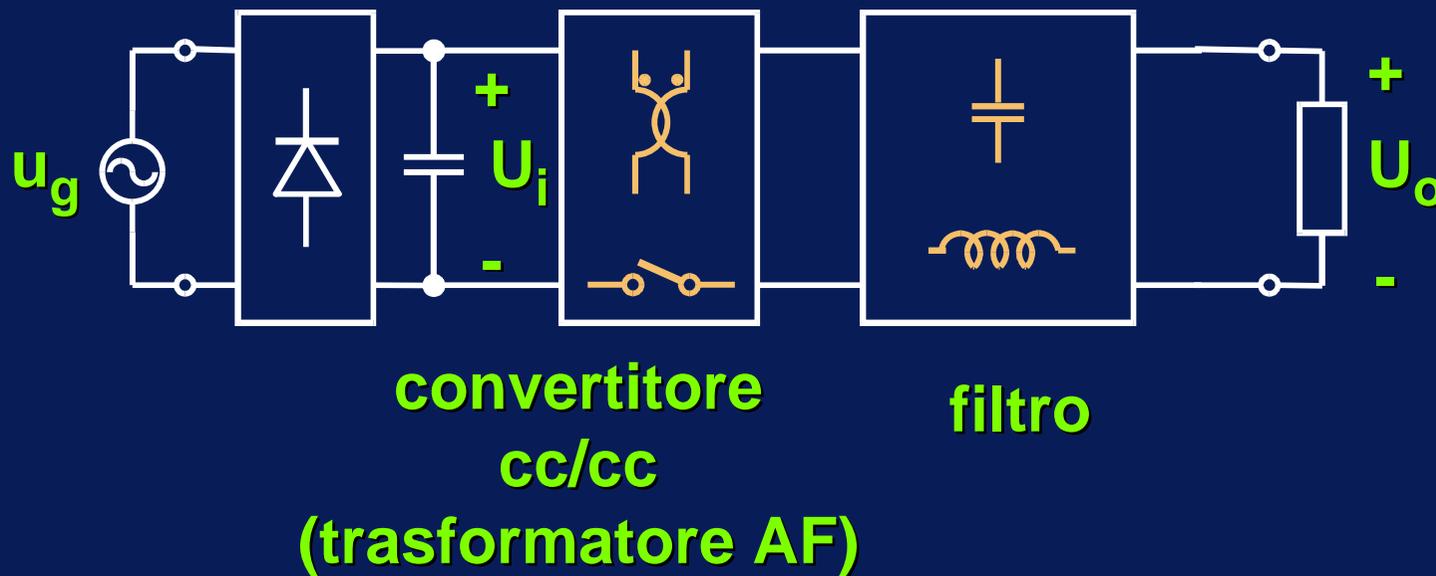


convertitore
cc/cc
(trasformatore AF)

Alimentatore con regolatore switching (Switched Mode Power Supply, SMPS)



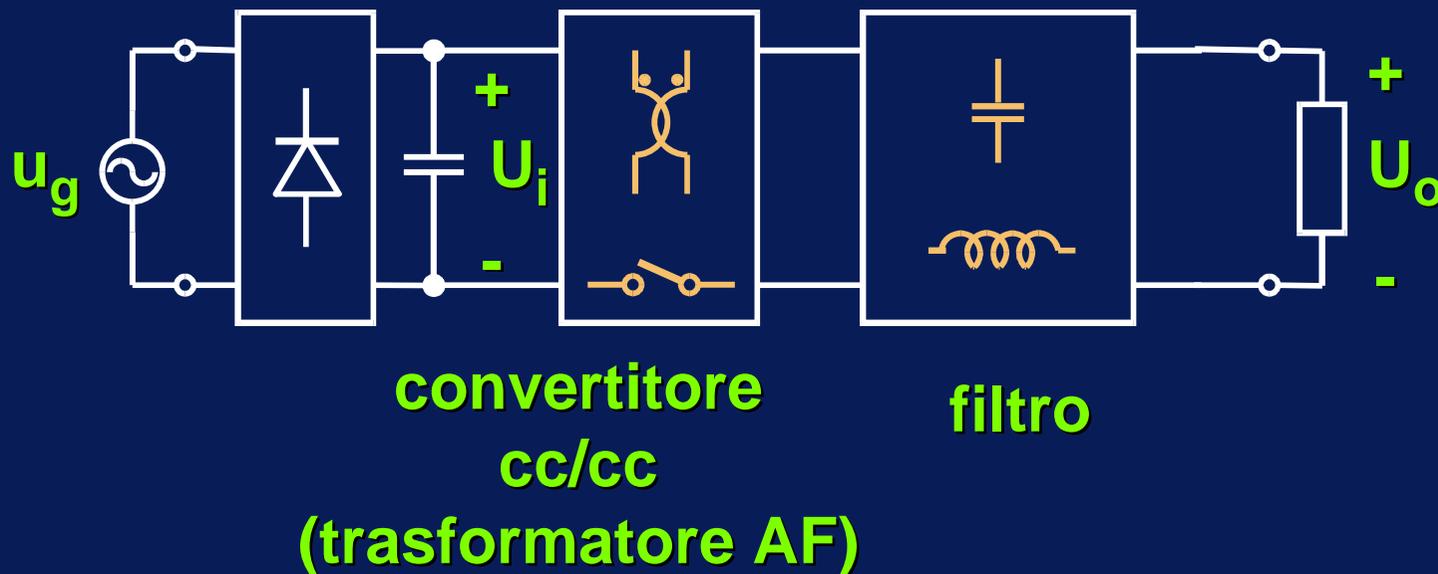
Alimentatore con regolatore switching (Switched Mode Power Supply, SMPS)



Caratteristiche

- Manca il trasformatore a 50 Hz

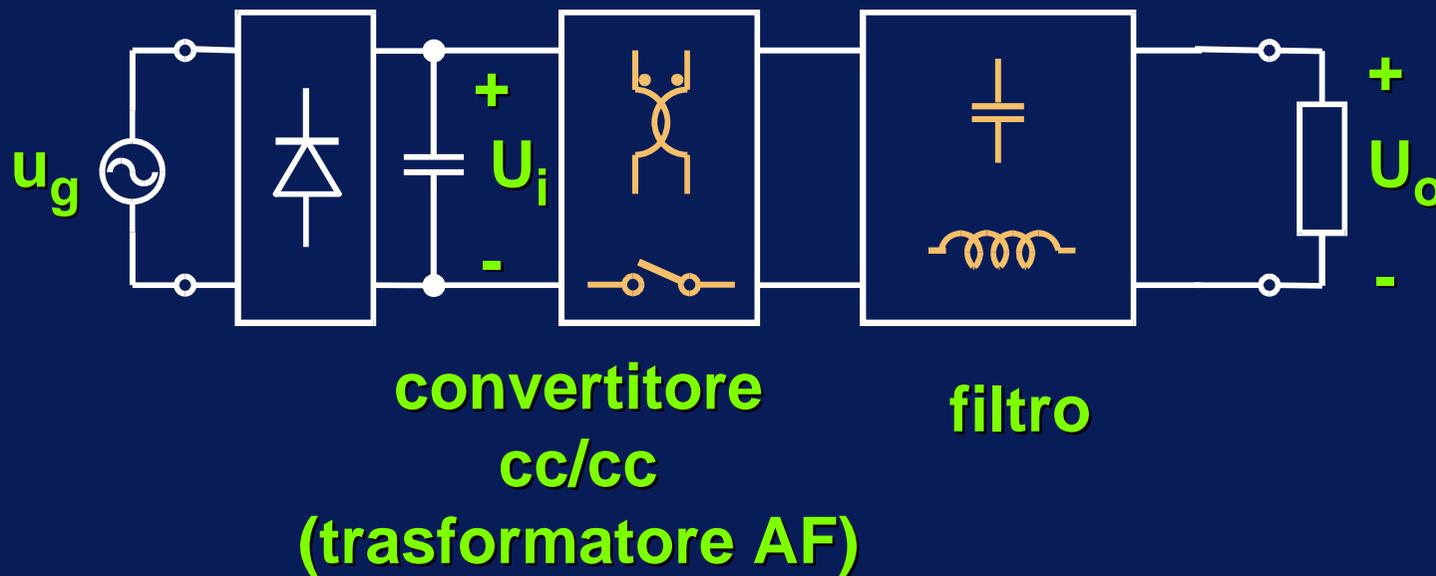
Alimentatore con regolatore switching (Switched Mode Power Supply, SMPS)



Caratteristiche

- Tensione d'uscita stabilizzata e regolabile

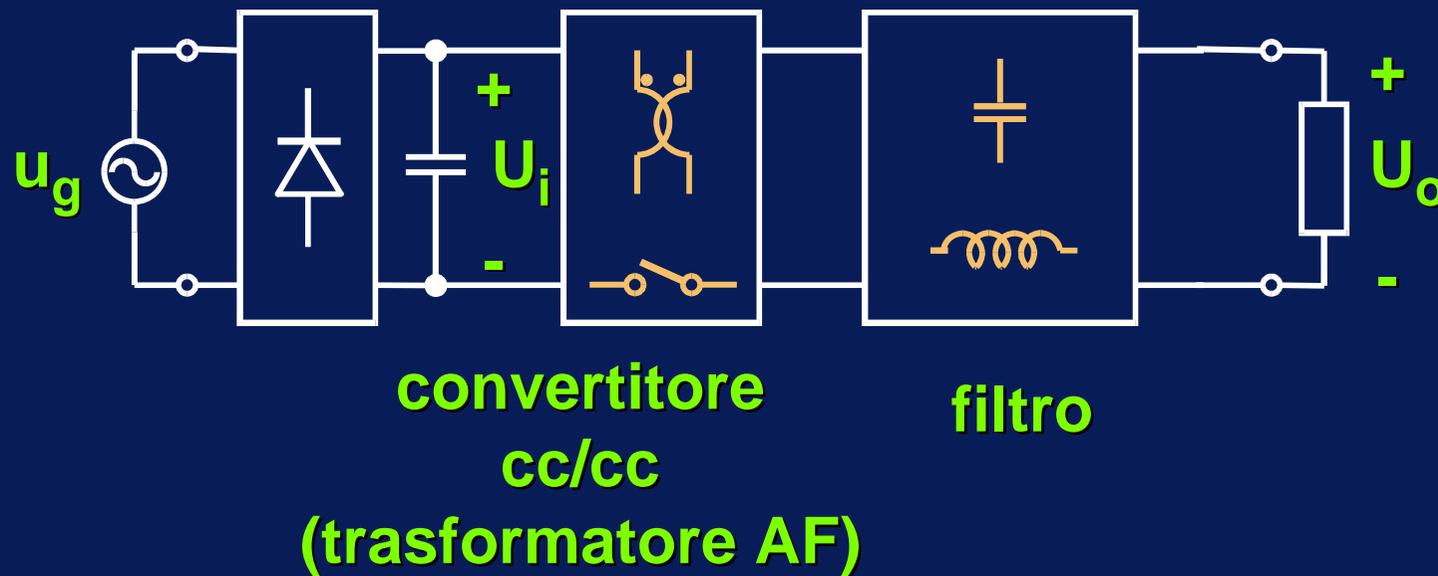
Alimentatore con regolatore switching (Switched Mode Power Supply, SMPS)



Caratteristiche

- Rendimento elevato

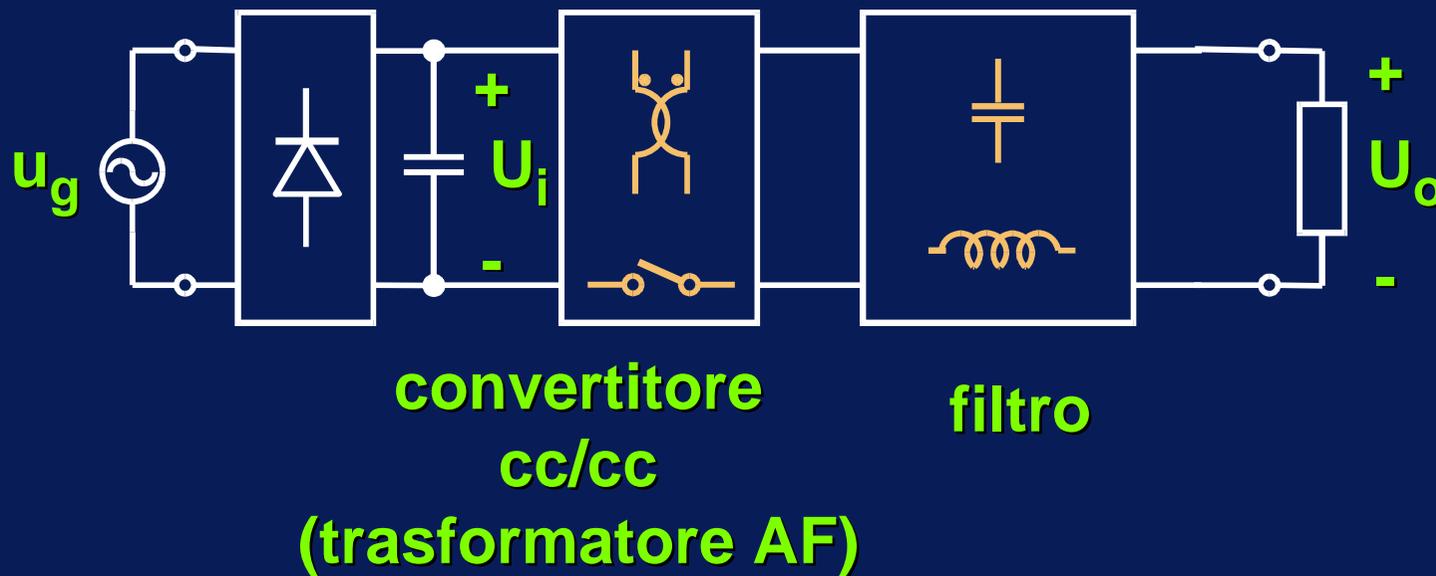
Alimentatore con regolatore switching (Switched Mode Power Supply, SMPS)



Caratteristiche

- Trasformatore ad AF (piccolo ed economico)

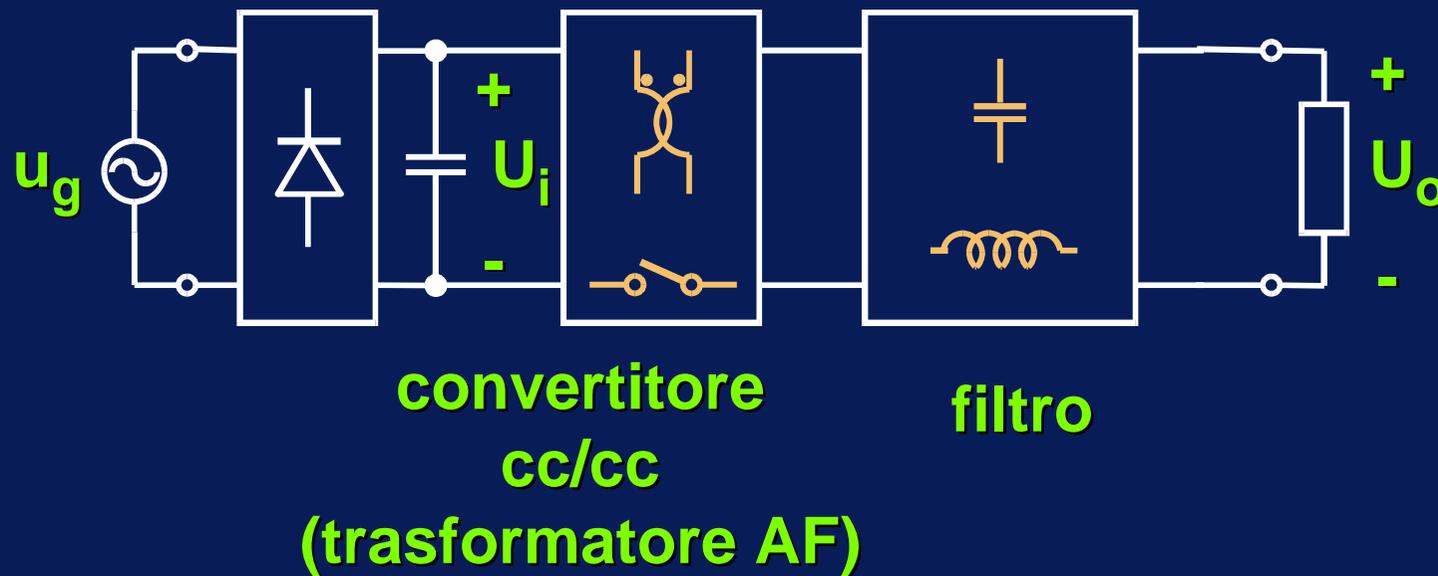
Alimentatore con regolatore switching (Switched Mode Power Supply, SMPS)



Caratteristiche

- Un solo convertitore cc/cc può fornire più uscite isolate

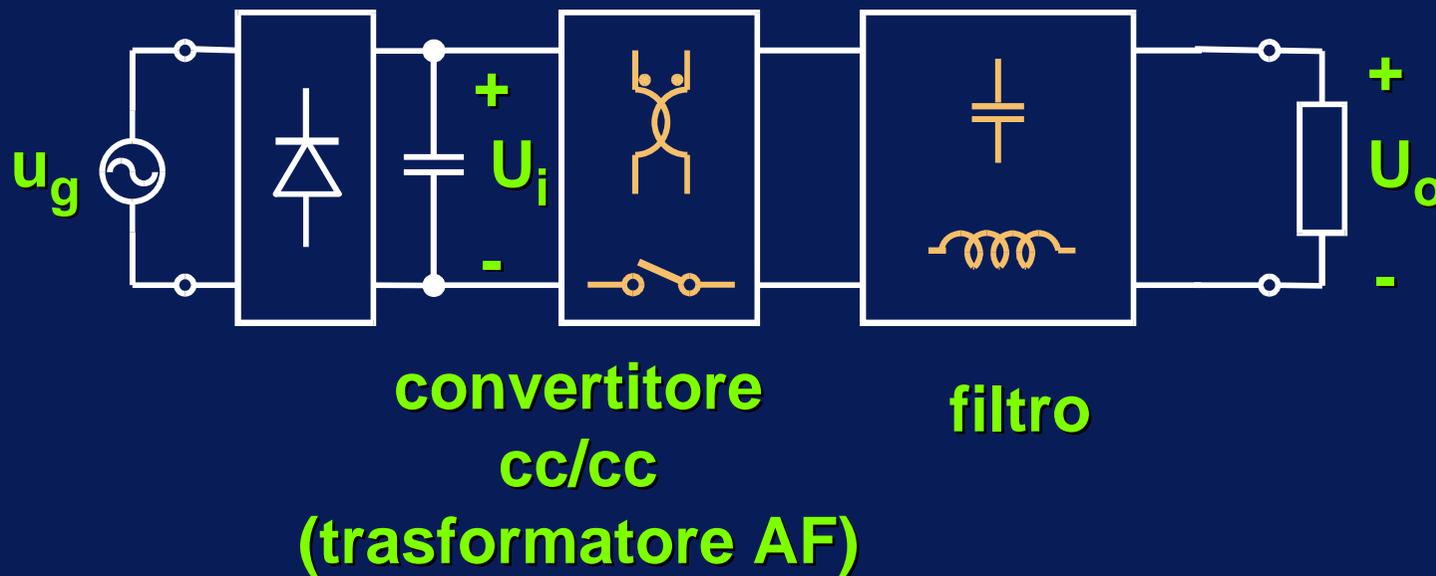
Alimentatore con regolatore switching (Switched Mode Power Supply, SMPS)



Caratteristiche

- Utilizzabile per potenze anche elevate

Alimentatore con regolatore switching (Switched Mode Power Supply, SMPS)



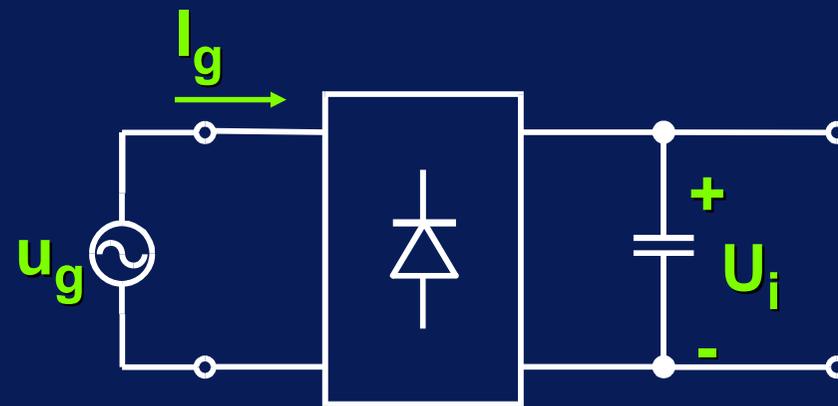
Caratteristiche

- Circuito complesso

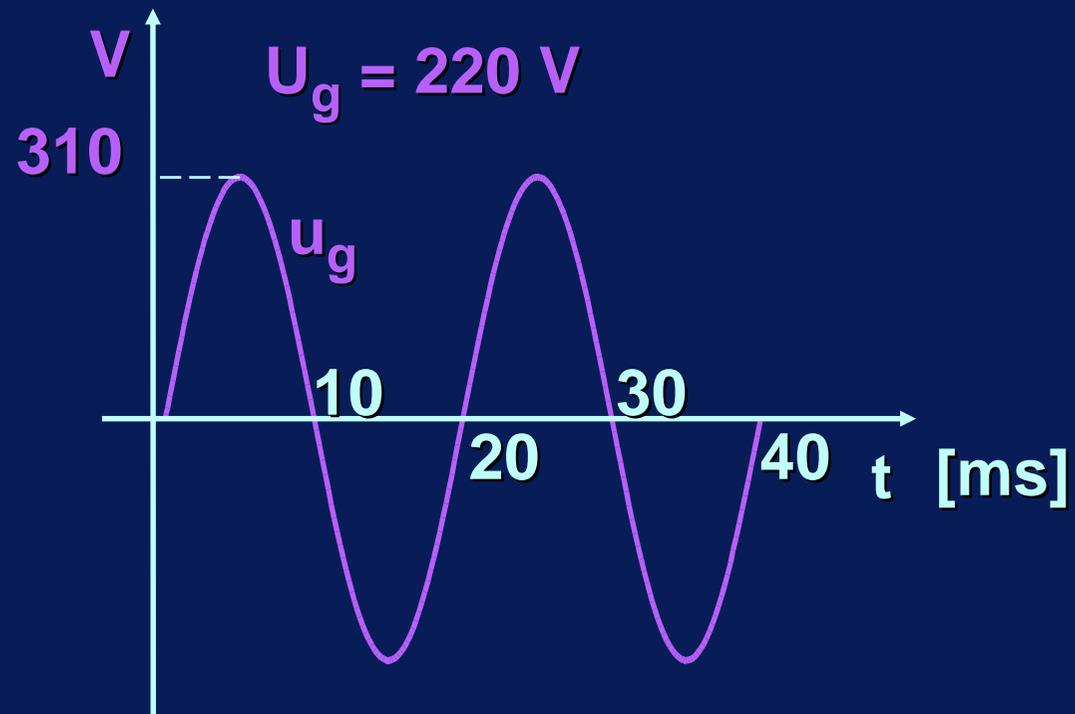
Caratteristiche

- **Manca il trasformatore a 50Hz**
- **Tensione d'uscita stabilizzata e regolabile**
- **Rendimento elevato**
- **Trasformatore ad AF (piccolo ed economico)**
- **Un solo convertitore cc/cc può fornire più uscite isolate**
- **Utilizzabile per potenze anche elevate**
- **Circuito complesso**

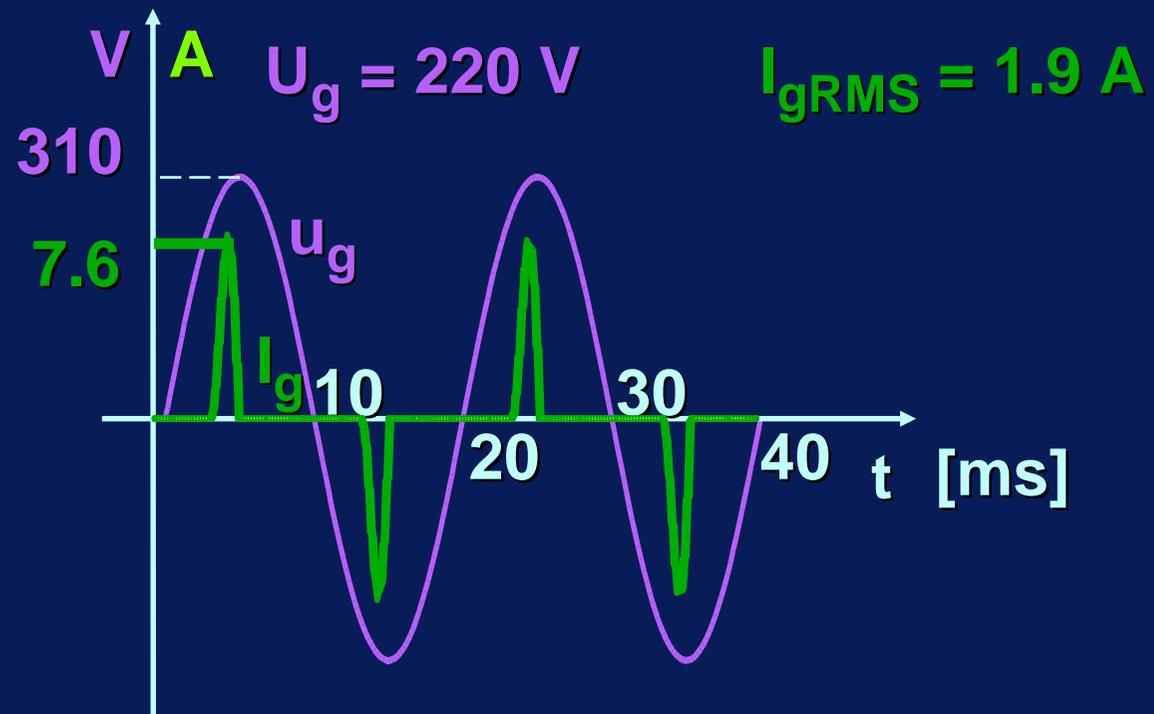
Forme d'onda tipiche dei raddrizzatori a diodi



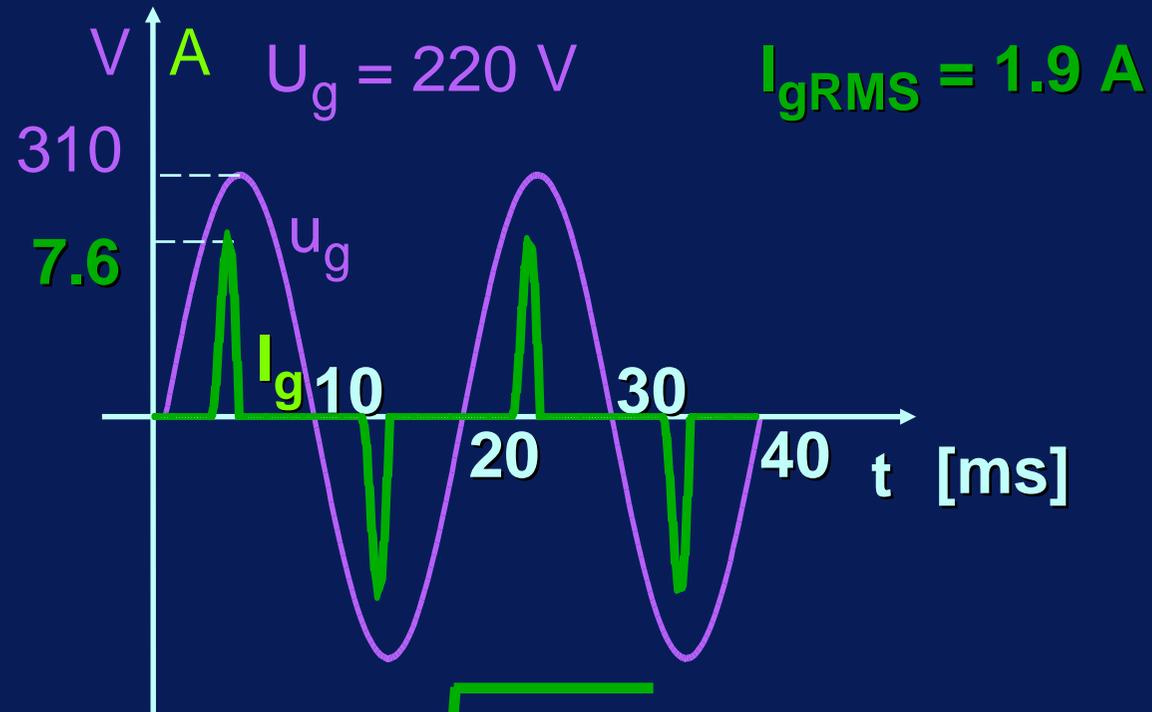
Forme d'onda tipiche dei raddrizzatori a diodi



Forme d'onda tipiche dei raddrizzatori a diodi

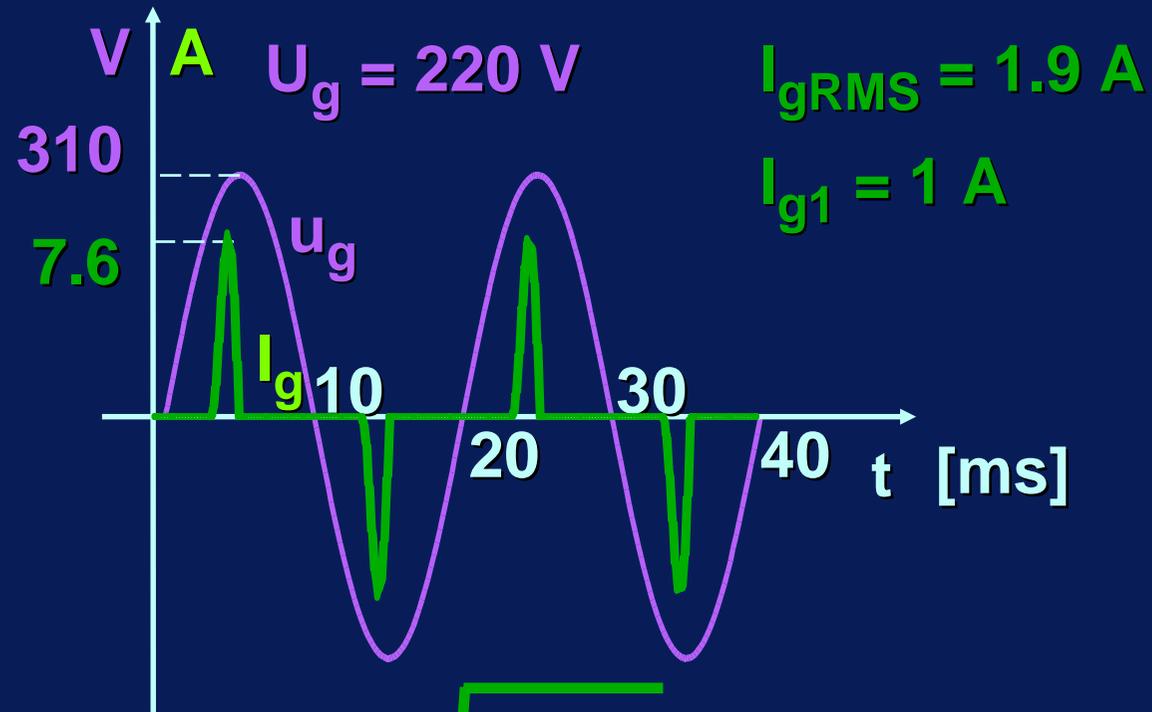


Forme d'onda tipiche dei raddrizzatori a diodi



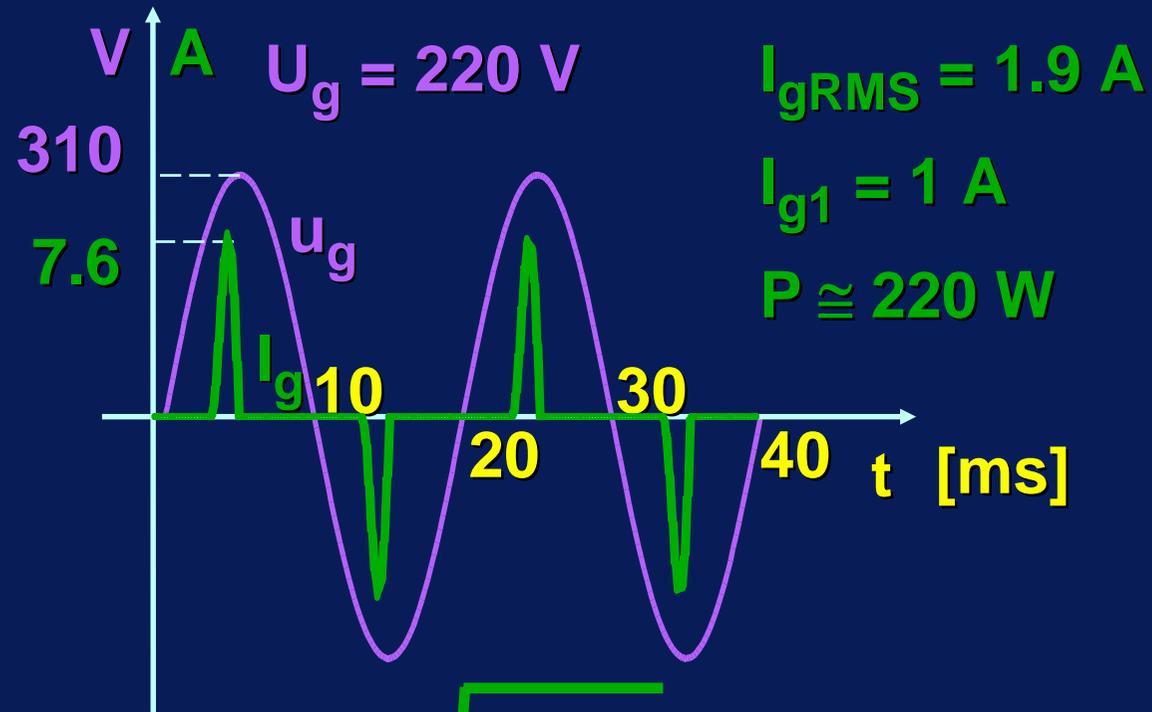
$$I_g = \sqrt{\sum_1^{\infty} I_{gn}^2}$$

Forme d'onda tipiche dei raddrizzatori a diodi



$$I_g = \sqrt{\sum_1^{\infty} I_{gn}^2}$$

Forme d'onda tipiche dei raddrizzatori a diodi



$$I_g = \sqrt{\sum_1^{\infty} I_{gn}^2}$$

Impatto sulla rete

Impatto sulla rete

Distorsione armonica totale (Total Harmonic Distortion, THD)

Impatto sulla rete

Distorsione armonica totale (Total Harmonic Distortion, THD)

$$\text{THD} = \frac{I_{g \text{ armoniche}}}{I_{g1}}$$

Impatto sulla rete

Distorsione armonica totale (Total Harmonic Distortion, THD)

$$\text{THD} = \frac{I_{g \text{ armoniche}}}{I_{g1}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{gn}^2}}{I_{g1}}$$

Impatto sulla rete

Distorsione armonica totale (Total Harmonic Distortion, THD)

$$\text{THD} = \frac{I_{g \text{ armoniche}}}{I_{g1}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{gn}^2}}{I_{g1}}$$

Fattore di potenza (Power Factor, PF)

Impatto sulla rete

Distorsione armonica totale (Total Harmonic Distortion, THD)

$$\text{THD} = \frac{I_{g \text{ armoniche}}}{I_{g1}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{gn}^2}}{I_{g1}}$$

Fattore di potenza (Power Factor, PF)

$$\text{PF} = \frac{\text{potenza attiva}}{\text{potenza apparente}}$$

Impatto sulla rete

Distorsione armonica totale (Total Harmonic Distortion, THD)

$$\text{THD} = \frac{I_{g \text{ armoniche}}}{I_{g1}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{gn}^2}}{I_{g1}}$$

Fattore di potenza (Power Factor, PF)

$$\text{PF} = \frac{\text{potenza attiva}}{\text{potenza apparente}} = \frac{U_g \cdot I_{g1} \cdot \cos\phi_1}{U_g \cdot I_g}$$

Impatto sulla rete

Distorsione armonica totale (Total Harmonic Distortion, THD)

$$\text{THD} = \frac{I_{g \text{ armoniche}}}{I_{g1}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{gn}^2}}{I_{g1}} = 1.61$$

Fattore di potenza (Power Factor, PF)

$$\text{PF} = \frac{\text{potenza attiva}}{\text{potenza apparente}} = \frac{U_g \cdot I_{g1} \cdot \cos\phi_1}{U_g \cdot I_g}$$

Impatto sulla rete

Distorsione armonica totale (Total Harmonic Distortion, THD)

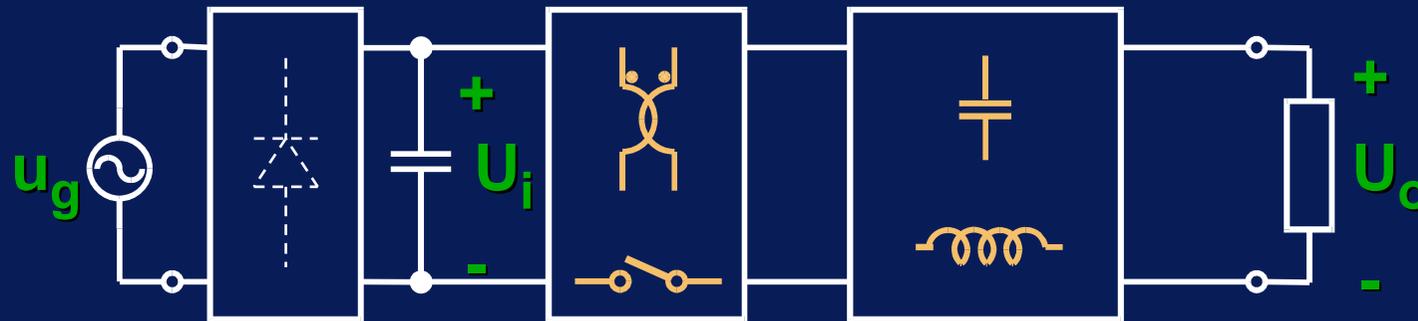
$$\text{THD} = \frac{I_{g \text{ armoniche}}}{I_{g1}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{gn}^2}}{I_{g1}} = 1.61$$

Fattore di potenza (Power Factor, PF)

$$\text{PF} = \frac{\text{potenza attiva}}{\text{potenza apparente}} = \frac{U_g \cdot I_{g1} \cdot \cos\phi_1}{U_g \cdot I_g} = 0.53$$

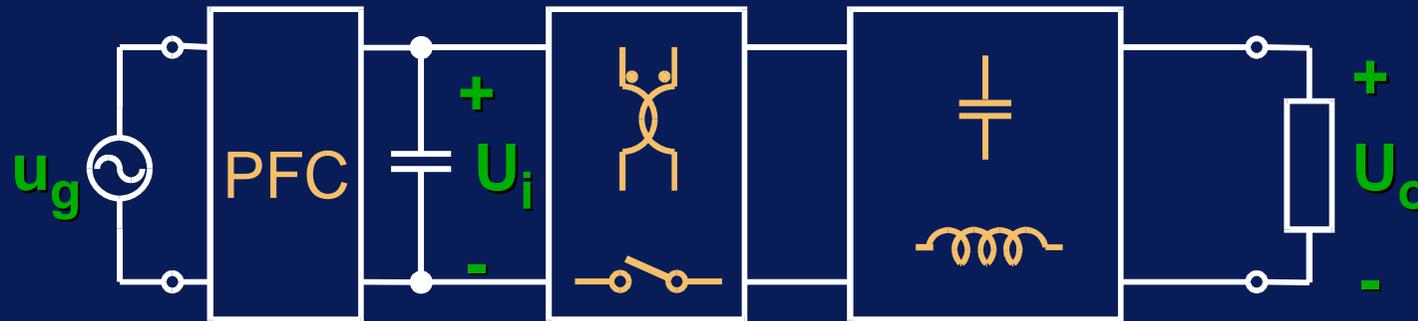
Alimentatore con Power Factor Corrector

Alimentatore con Power Factor Corrector



Convertitore
cc/cc Filtro

Alimentatore con Power Factor Corrector

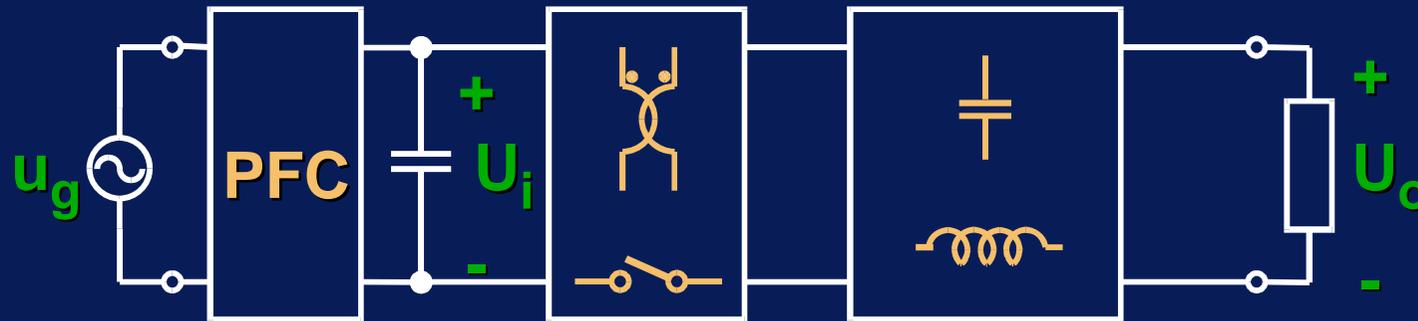


**Power
Factor
Corrector**

**Convertitore
cc/cc**

Filtro

Alimentatore con Power Factor Corrector



**Power
Factor
Corrector**

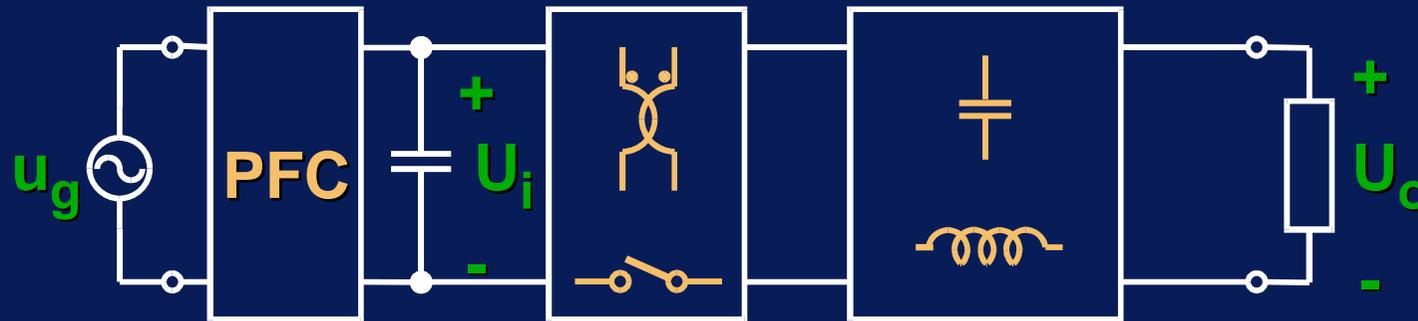
**Convertitore
cc/cc**

Filtro

Caratteristiche del PFC

- Migliora il comportamento lato rete
 - riduce la distorsione armonica
 - aumenta il fattore di potenza

Alimentatore con Power Factor Corrector



**Power
Factor
Corrector**

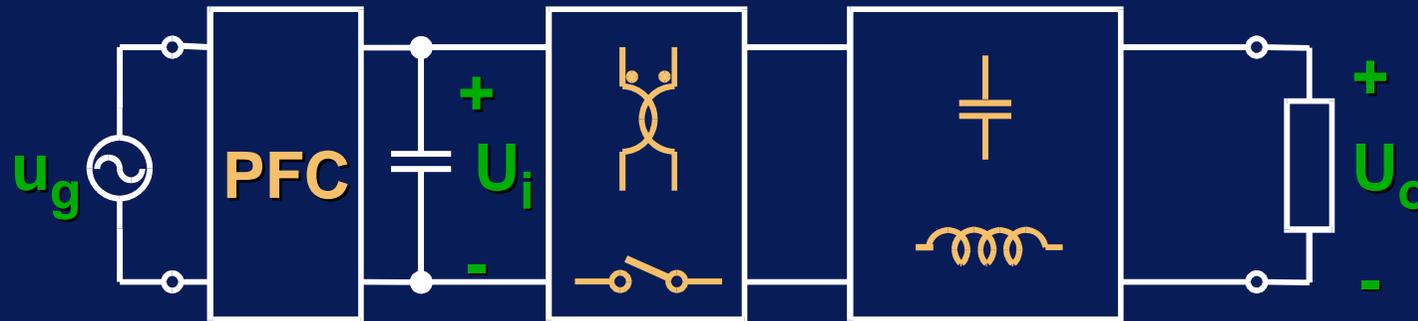
**Convertitore
cc/cc**

Filtro

Caratteristiche del PFC

- **Richiede uno stadio switching anche in ingresso**
 - **abbassa il rendimento**
 - **complica il circuito**

Alimentatore con Power Factor Corrector



**Power
Factor
Corrector**

**Convertitore
cc/cc**

Filtro

Caratteristiche del PFC

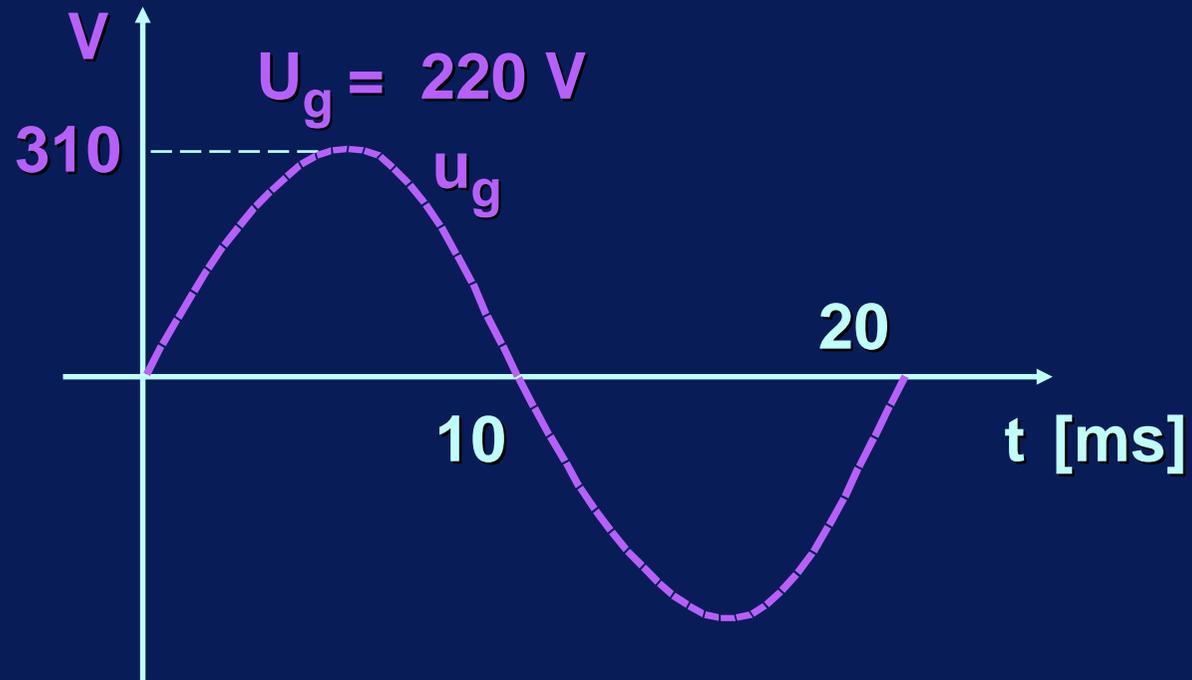
- Può essere necessario per garantire la conformità alle normative che limitano l'emissione armonica

Caratteristiche del PFC

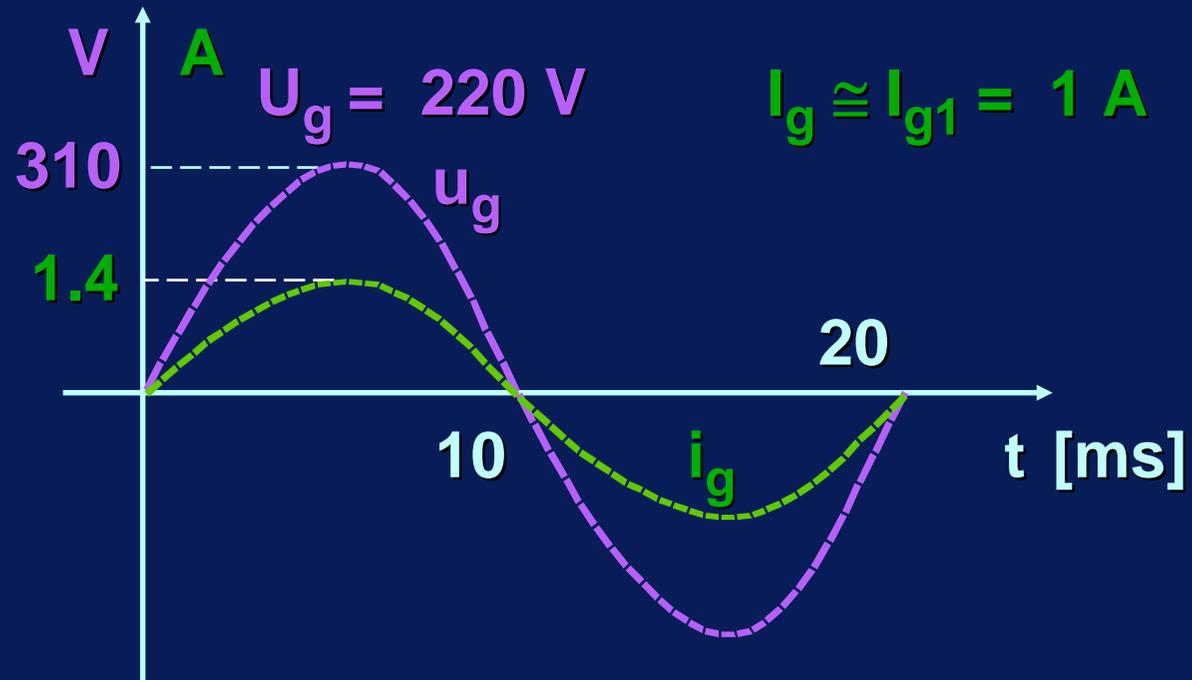
- **Migliora il comportamento lato rete**
 - riduce la distorsione armonica
 - aumenta il fattore di potenza
- **Richiede uno stadio switching anche in ingresso**
 - abbassa il rendimento
 - complica il circuito
- **Puó essere necessario per garantire la conformità alle normative che limitano l'emissione armonica**

Forme d'onda tipiche dei Power Factor Corrector

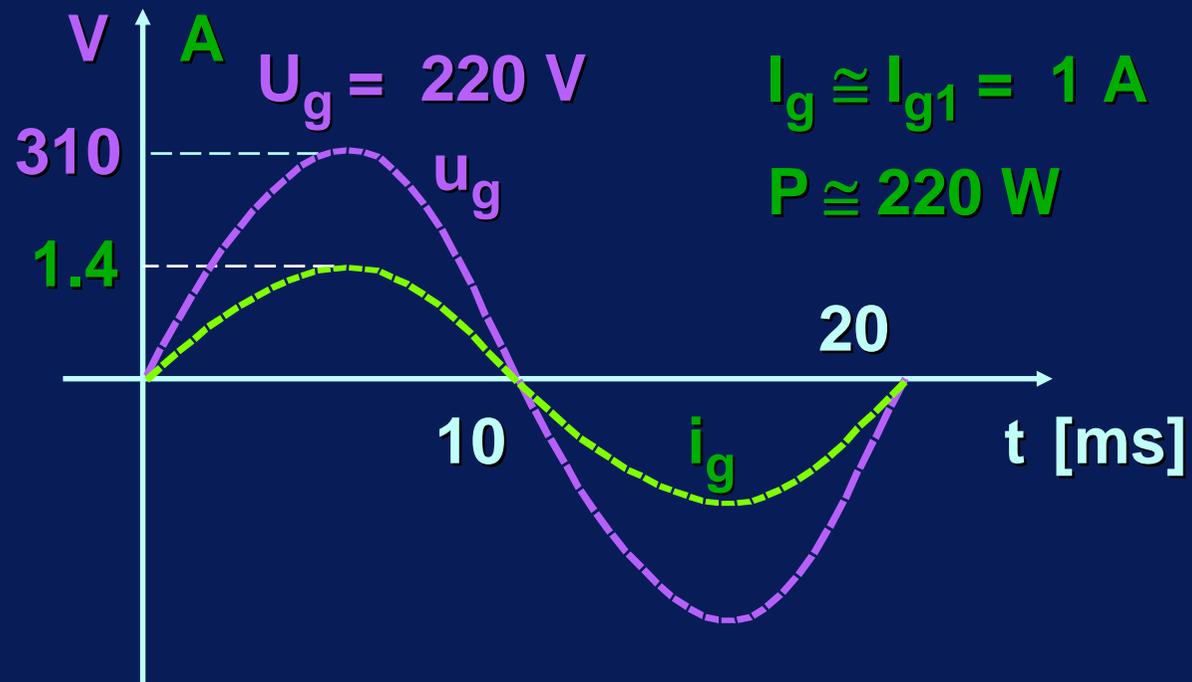
Forme d'onda tipiche dei Power Factor Corrector



Forme d'onda tipiche dei Power Factor Corrector



Forme d'onda tipiche dei Power Factor Corrector



THD = 0.035

PF = 0.996

Conclusioni

Principali problematiche degli alimentatori elettronici

- **Rendimento e dissipazione di potenza**
- **Ingombro e peso**
- **Impatto sulla rete di alimentazione**
- **Impatto sull'ambiente (EMC)**
- **Costo**
- **Costo**
- **Costo**