

Elettronica Industriale MA

Anno accademico 2020-2021

Docente: ing. Corrado Florian

Email: corrado.florian@unibo.it

Telefono: 0512093846

Materiale didattico

❑ Slides delle lezioni

- ❑ Power Electronics: Converters, Applications and Design, **Mohamed M. Undeland**, Robbins, J. Wiley, 1995.
- ❑ Fundamentals of power electronics, **R.W. Erickson**, Kluwer, 1997.
- ❑ Power Semiconductor Circuits, S. B. Dewan, A. Straughen, J. Wiley, 1975.
- ❑ Power Electronics: Circuits, devices and applications, M. Rashid, Prentice Hall, 1993.
- ❑ Application notes di vari produttori di dispositivi e circuiti

Materiale didattico

Insegnamenti online <https://virtuale.unibo.it/>

Dispense

ESEMPI di simulazione di circuiti PSIM

The screenshot displays the user interface of the Virtuale.unibo.it platform. The browser address bar shows the URL virtuale.unibo.it/my/. The page features a navigation sidebar on the left with options like 'Dashboard', 'Home del sito', 'Calendario', 'File personali', and 'I miei corsi'. The main content area is titled 'Corsi da configurare' and lists two courses: 'Lab of High-Frequency Circuit Design M - Laboratory of High Frequency Electronic Circuit Design M' and 'Elettronica Industriale T-A - Elettronica per L'Automazione T'. Each course entry includes a 'Descrizione' link and a 'Configura Spazio' button. Below this, the 'I miei corsi' section shows a dropdown menu set to 'Tutti (eccetto eliminati dalla visualizzazione)' and a card for 'Elettronica Industriale M' with links for 'iscrizione da piano di studi' and 'Gestisci iscrizioni'.

Software di supporto

- PSIM: software di simulazione di circuiti elettronici di potenza
- Versione free (limitazione nel numero di componenti) dal sito Powersim: <http://powersimtech.com/products/psim/>
- Vari esempi di circuiti di potenza
- LT spice: free software scaricabile dal sito della Linear Tech
- <http://www.linear.com/designtools/software/#LTspice>
- Vari esempi di progetto da scaricare online:
http://www.linear.com/designtools/software/demo_circuits.ph

Modalità di Esame

- Esame orale
- Domande inerenti il materiale contenuto nelle slide corso e discusso in classe con il docente
- Descrizione del funzionamento di un circuito di conversione/controllo di potenza - applicazione
- Funzionamento dei dispositivi elettronici all'interno circuito
- Tipicamente 3-4 domande per 30 minuti
- Appelli ufficiali e possibilità di fissare l'esame in altro modo con il docente
- Ricevimento tramite appuntamento via email o telefono

Programma

- **Introduzione al corso**

Tipico sistema di controllo di un impianto industriale
definizione di un convertitore di potenza, rete di con
amplificatore di potenza, distinzione tra elettronica di
controllo (segnale) ed elettronica di potenza.

- **Richiami**

Valore efficace, potenza attiva e reattiva, potenza ap
trasformata di Fourier, serie di Fourier, segnali perio
Equazioni costitutive del condensatore e dell'indutto
Valori efficaci di forme d'onda comunemente utilizza

Programma

- **Classificazione dei convertitori**

In base alla funzione del circuito ed in base al funzionamento dei dispositivi.

Convertitori controllati e non controllati.

Convertitori AC/DC, DC/DC, DC/AC, AC/AC.

Convertitori quasi lineari (serie), convertitori operanti a commutazione (switching)

- **Prestazioni dei convertitori**

Distorsione (ingresso ed uscita), rendimento, fattore di potenza, guadagno/banda, regolazione, resistenza alla temperatura, coefficiente di temperatura

Programma

- **Dispositivi elettronici di potenza**

Principi di funzionamento e caratteristiche di base e dei principali dispositivi a semiconduttore utilizzati: diodi, MOSFET, IGBT, tiristori. Analisi dei fenomeni che limitano le massime tensioni, correnti e la velocità di commutazione dei dispositivi elettronici di potenza.

- **Circuiti driver**

Circuiti che permettono il funzionamento in commutazione dei dispositivi elettronici di potenza.

- **Snubber**

Principi di progetto delle reti che permettono la limitazione degli stress dinamici dei dispositivi elettronici di potenza.

Programma

- **Convertitori AC/DC non controllati: raddrizzatori**
Raddrizzatore a semionda. Raddrizzatore ad onda intera.
Filtri di ingresso ed uscita per il miglioramento del fattore di potenza e la riduzione della distorsione. Raddrizzatore trifase ad onda intera.
- **Convertitori controllati mediante tiristori**
AC/DC e AC/AC a tiristore
- **Convertitori DC/DC quasi lineari - Cenni**
Convertitore DC/DC di tipo serie con controllo in retroazione della tensione di uscita.
Amplificatore in classe A ed in Classe B: funzionamento e rendimento.

Programma

- **Convertitori Switching**
- **Struttura ed equazioni delle reti di commutazione**
Realizzazione tramite l'utilizzo di diversi tipi di dispositivi elettronici. Leggi di commutazione per la realizzazione di convertitori DC/DC, DC/AC, AC/DC e AC/AC.
- **Perdite - Rendimento**
Stima delle perdite di conduzione e di commutazione nei dispositivi elettronici di potenza.
- **Vincoli termici**
Dimensionamento dei componenti e dei sistemi di smaltimento del calore. Resistenza termica e transient thermal impedance. Dissipatori.

Programma

- **Convertitori Switching DC-DC senza isolamento** Conversione a discesa (buck), salita (boost), salita-discesa (buck-boost), Conversione
- **Convertitori Switching DC-DC con isolamento** Forward, flyback, convertitore full bridge.
- **Convertitori Switching DC-DC risonanti:** half and full bridge LLC converter, Phase Shifted Full Bridge ZVS converter
- **Componenti magnetici** Induttori e trasformatore di potenza.
- **Tipologie di condensatori** Tecnologie e caratteristiche principali
- **Controllo** : introduzione alle problematiche di controllo, descrizione di un PWM IC controller. Isolamento del sensore di feedback: opto-isolatori.

Programma

- **DC/AC (inverters):**

Introduzione al mezzo ponte e al ponte intero

- **Esempi di applicazione:** controllo motori elettrici, saldatura elettrica ad arco.

- **AC/DC controllati:** circuiti PFC (power factor correction), active rectifier

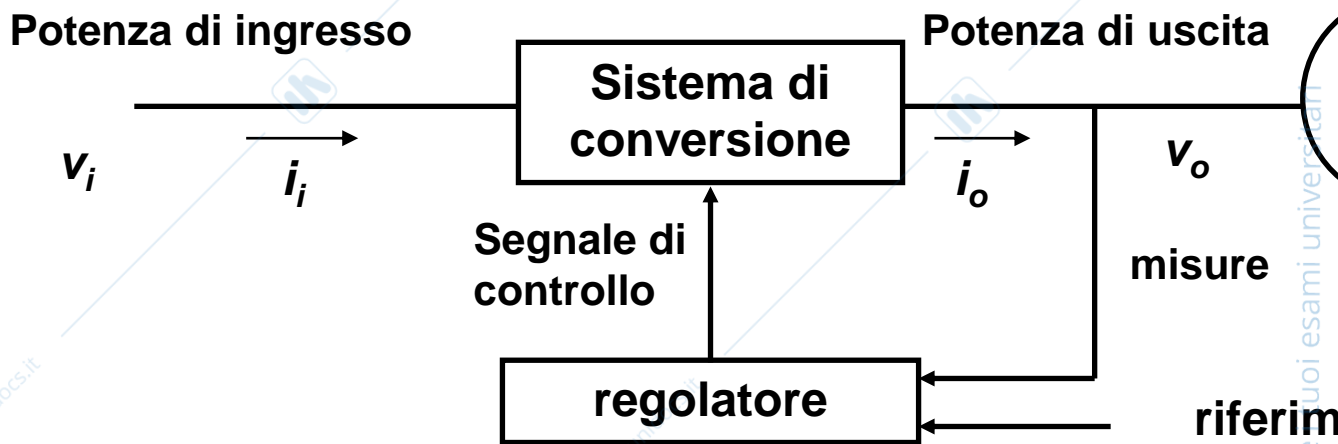
- **Sensing di corrente e sensing di tensione**

- **Esercitazioni:**

- Progetti al simulatore circuitale Psim o LT Spice

Elettronica di Potenza

- Compito dell'elettronica di potenza: gestire e controllare il flusso di energia elettrica fornendo tensioni e correnti nella forma ottimale per i carichi



Uscita: posso controllare/progettare tensione, corrente, frequenza e numero di impulsi

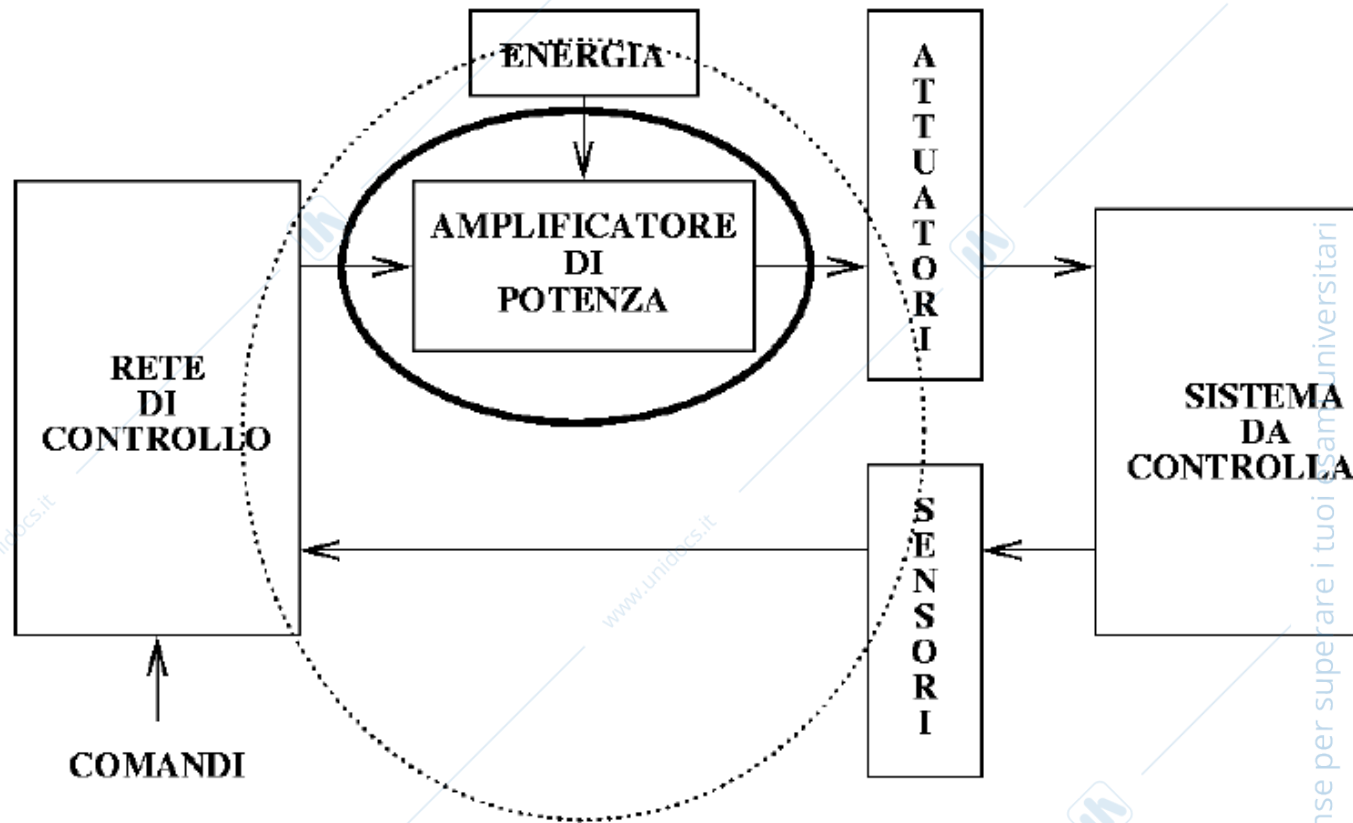
Controllo ad anello chiuso: confronto dell'uscita del sistema di conversione con il riferimento e l'errore tra i due è reso minimo dall'anello di controllo

Regolatore: elettronica di segnale a bassa potenza. Circuito integrato (analogico) o MCU/DSP/FPGA (Microcontrollore; Digital Signal Processor; Field Programmable Gate Array)

Sistema di conversione: elettronica di potenza, ovvero elevate tensioni e correnti

Miglioramenti tecnologici dei dispositivi di potenza: tensioni, correnti, frequenze di commutazione sempre maggiori

Sistema di controllo di un impianto indu

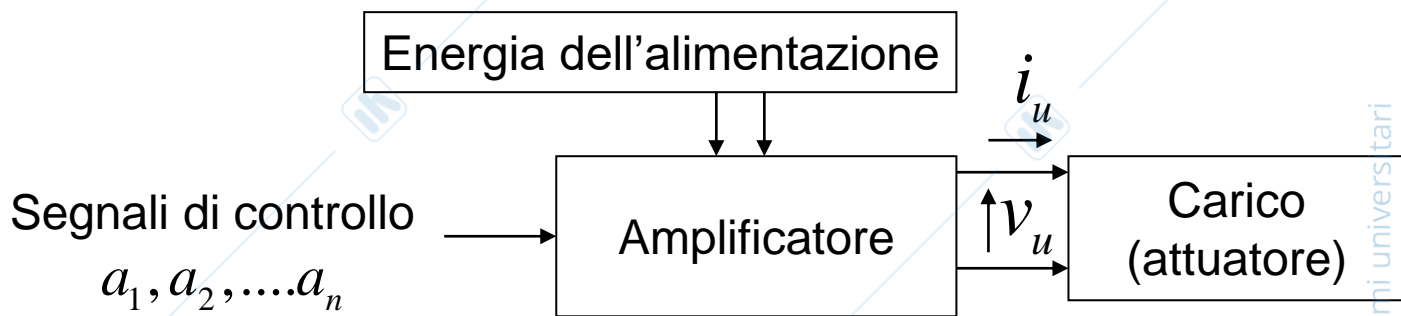


Multi- disciplinare: elettronica di potenza, elettronica di controllo (el del segnale), sensori, strumentazione, macchine elettriche, automaz informatica, conversione dell'energia

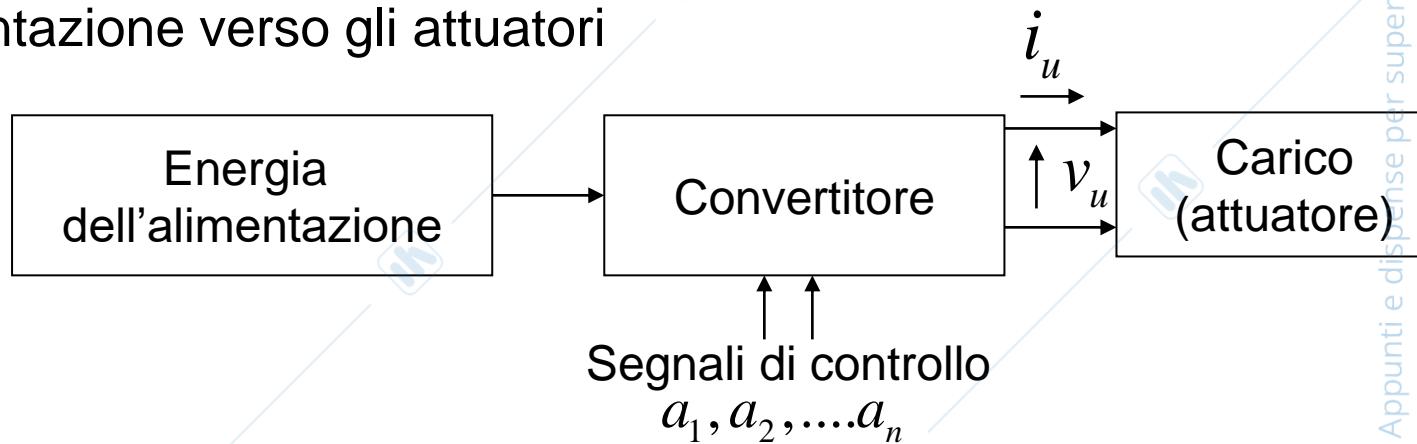
Focus: Amplificatore di potenza o convertitore elettronico di po

Definizioni

Amplificatore di potenza: amplifica i bassi livelli di potenza dei segnali di controllo (l'amplificazione avviene tramite lo sfruttamento dell'energia proveniente dall'alimentazione)



Convertitore elettronico di potenza: sulla base di segnali di controllo provvede alla conversione e al controllo del flusso di energia fornita dall'alimentazione verso gli attuatori



E' spesso la parte più costosa e critica di tutto il sistema di controllo

Classificazione amplificatori/conv

- In base alla **modalità di funzionamento dei dispositivi attivi** elettronici utilizzati nella loro realizzazione
 - **amplificatori lineari o quasi lineari** (dispositivi operanti in regione lineare, ovvero attiva diretta per il Bjt o saturazione per i dispositivi MOSFET)
 - **amplificatori (convertitori) in commutazione** (switching) (il dispositivo attivo è utilizzato come un interruttore (tra interdizione e saturazione per un Bjt, ed interdizione e saturazione per i MOSFET)

Classificazione amplificatori/conv

- In base **alla funzione** (convertitori)

AC/DC AC/AC DC/DC DC/AC

AC: sorgente/carico di energia alternata (sinusoidale)

DC: sorgente/carico di energia continua

Terminologia:

- Convertitori AC/DC non controllati: **rectifiers (raddrizzatori)**
- DC/DC di tipo serie: **regolatori**
- DC/AC lineari o quasi lineari: **amplificatori di potenza in classe**

Convertitori switching:

- Convertitori DC/DC : choppers
- Convertitori DC/AC : inverters
- Convertitori AC/DC : (controlled) rectifiers
- Convertitori AC/AC : AC voltage controllers

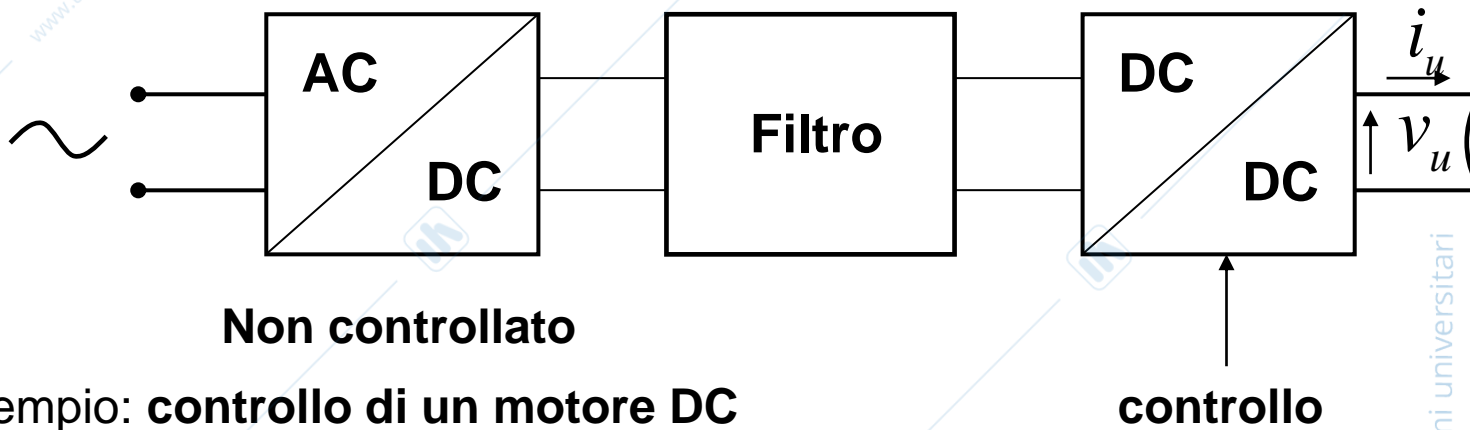
Classificazione convertito

- **Controllati e non controllati**

(esempio: il ponte a diodi o raddrizzatore è un AC/DC controllato)

- Controllo di frequenza (XX/AC)
- Controllo di livelli di tensione o corrente in uscita

Circuito di potenza



Esempio: controllo di un motore DC

Il circuito di potenza è formato da **più convertitori in cascata** separati da **filtranti** (elementi di immagazzinamento di energia)

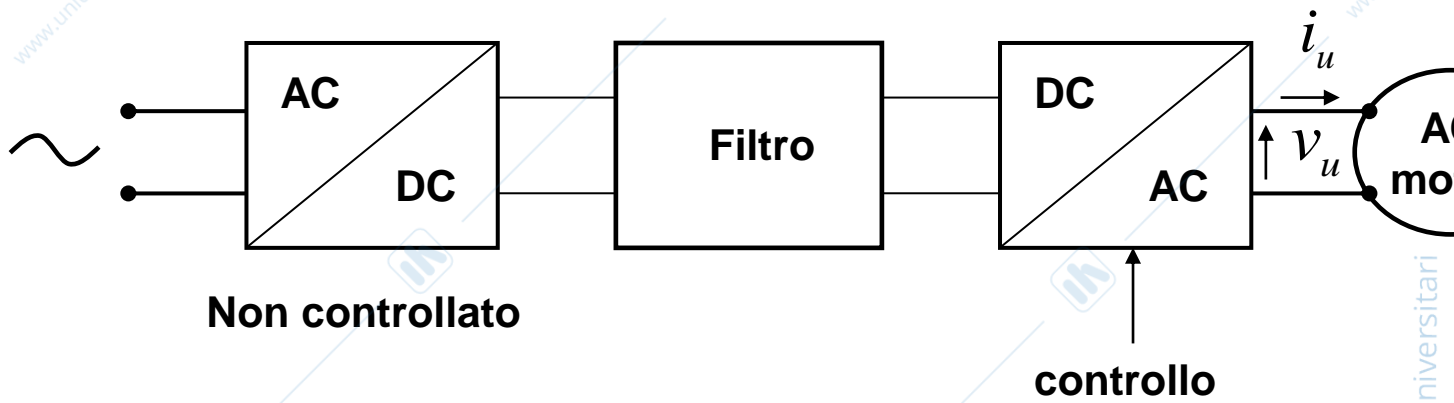
1° convertitore: **raddrizzatore non controllato**, converte la potenza AC

2° convertitore : **convertitore DC/DC (chopper) controllato**, controlla l'uscita della tensione di uscita per il controllo della velocità del motore (corrente)

Osservazione: **reversibilità dei convertitori**

Quando il **motore frena**, il flusso di potenza non va più dalla alimentazione ma in senso opposto: il convertitore DC/DC deve essere in grado di funzionare in senso inverso, ovvero assorbendo potenza dal carico (cambia il verso della corrente). L'energia viene accumulata nel filtro fino a quando è possibile e viene riutilizzata per caricare delle batterie o dissipata

Circuito di potenza



Esempio: controllo di un motore AC

Il circuito di potenza è formato da **più convertitori in cascata** separati da filtranti (elementi di immagazzinamento di energia)

1° convertitore: **raddrizzatore non controllato**, converte la potenza AC in DC

2° convertitore : **convertitore DC/AC (inverter) controllato**, converte la DC in AC controllando l'ampiezza e la frequenza della tensione di uscita per il controllo e della velocità del motore.

Osservazione: **reversibilità dei convertitori**: quando il motore frena, il primo convertitore diventa un **inverter** e il secondo convertitore diventa un **controlled rectifier**

Applicazioni: controllo di velocità di processi industriali (compressori, ventilatori), applicazioni di trasporto (veicoli elettrici, metro, locomotive), controllo di velocità

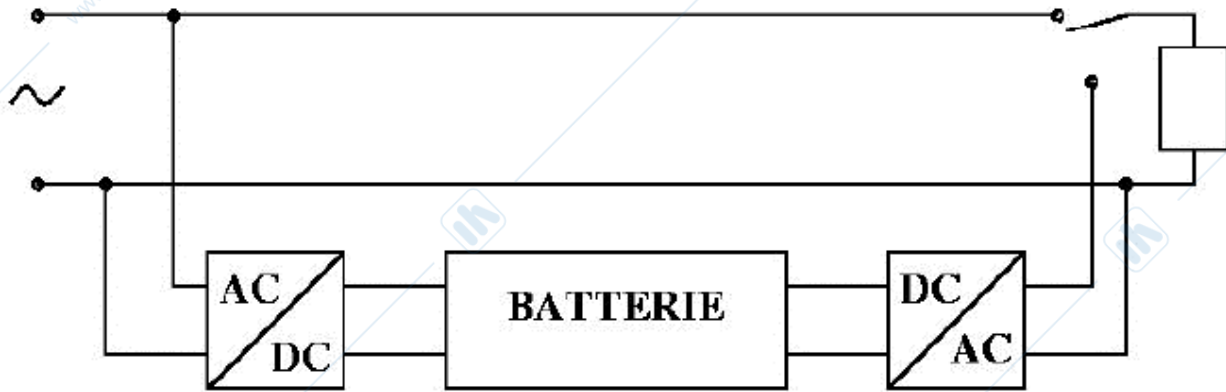
Applicazioni

- ❑ Alimentatori, carica batterie, gruppi di continuità (UPS)
- ❑ Controllo motori e trazione elettrica (trasporti, treni, aerei)
- ❑ Elettrodomestici ed utensili elettrici (saldatrice, fresatrice)
- ❑ Controllo illuminazione, riscaldamento, condizionamento
- ❑ Impianti di produzione industriale di cemento, materie plastiche, chimici, siderurgia
- ❑ Impianti eolici e fotovoltaici

Serve potenza o è necessario
manipolarla

Amplificatori o Convertitori

Applicazioni

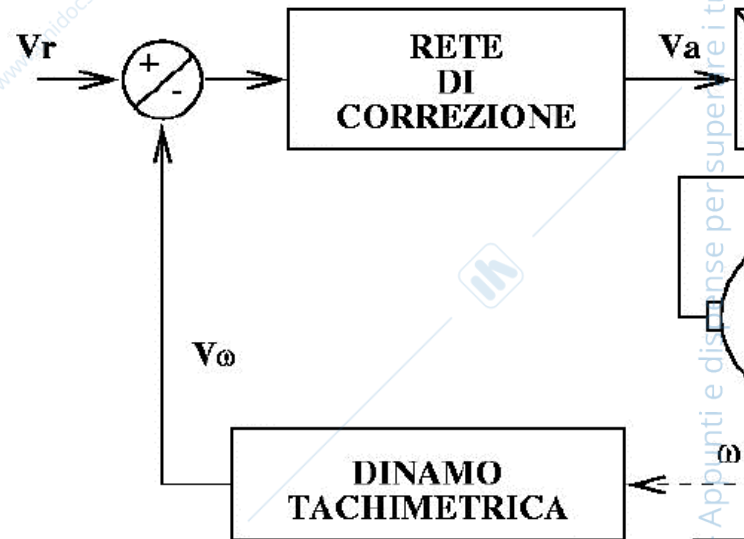


UPS: unit
power so

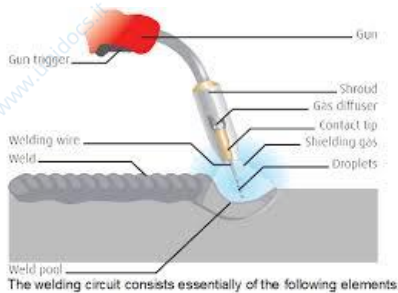
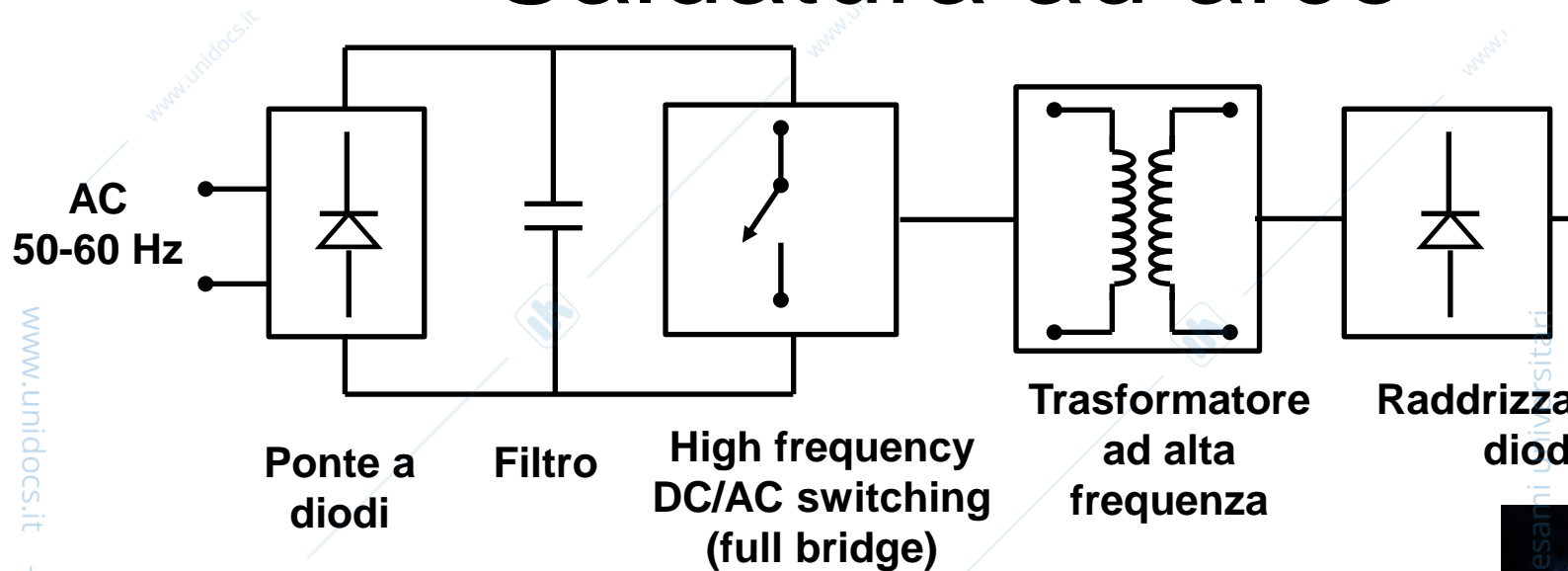
Controllo di un motore DC o AC

- Trazione elettrica
- Pompa azionata da motore
- Ascensore, montacarichi
- tornio/trapano
- Servo di posizione: robot

Controllo della velocità. controllo della accelerazione (coppia)



Saldatura ad arco

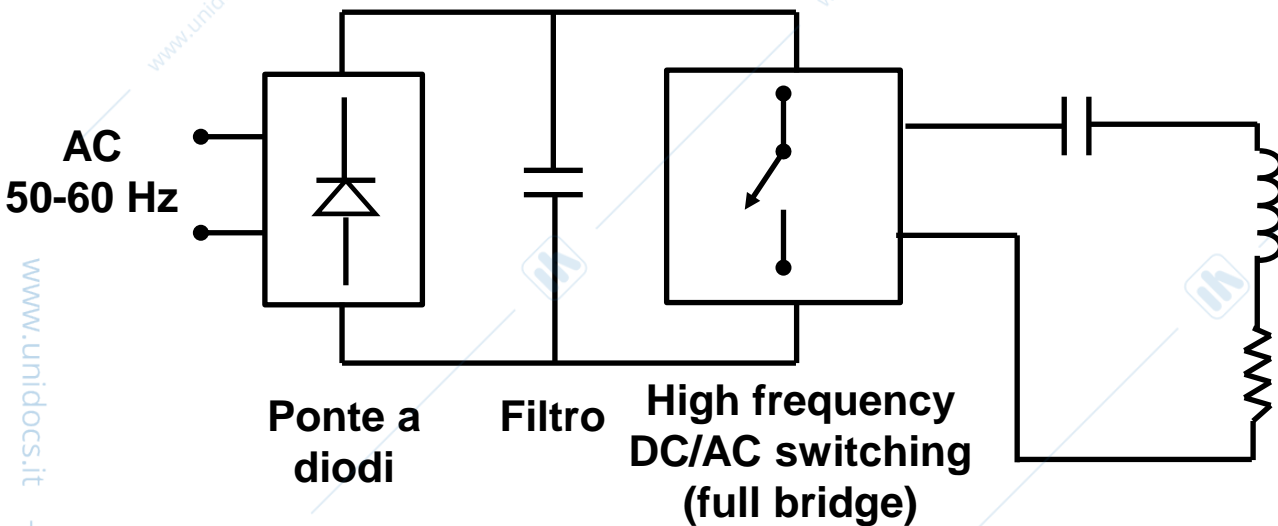


The welding circuit consists essentially of the following elements:



- Saldatura elettrica ad arco: l'energia per la fusione del materiale di salda da un arco elettrico tra due elettrodi, uno dei quali è il pezzo metallico da
- Caratteristica tensione/corrente di saldatura da controllare accuratamente convertitore elettrico di potenza (controllo di corrente in retroazione)
- Caratteristica V/I diverse a seconda del tipo di saldatura (valori tipici 50V)
- Importanza dell'isolamento (sicurezza)

Riscaldamento ad induzio



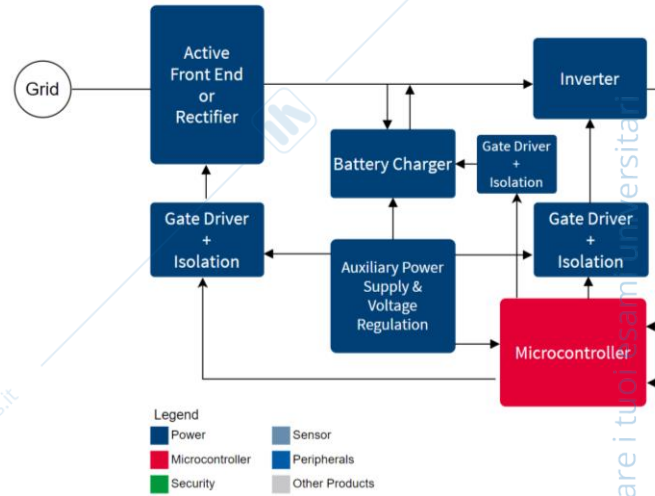
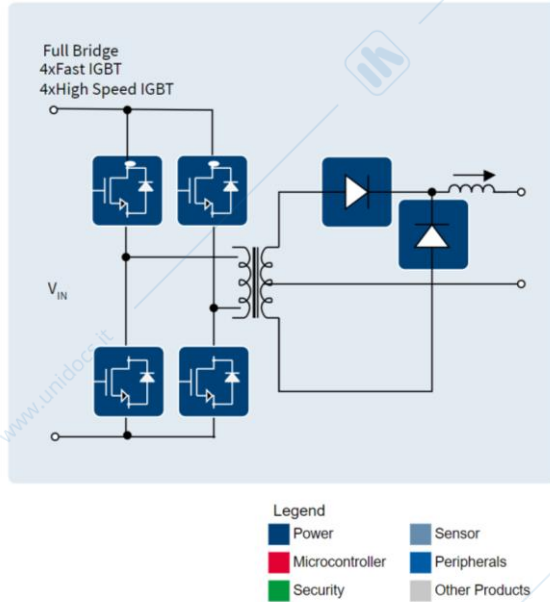
- Viene prodotto calore in un pezzo in lavorazione elettricamente conduttivo grazie alla circolazione di corrente elettrica generata per induzione elettromagnetica (legge di Faraday)
- Correnti parassite (Eddy currents o correnti di Foucault) sul pezzo conduttivo indotte da corrente sinusoidale AC sulla bobina
- Calore dovuto ad effetto Joule (correnti indotte su resistenza ohmica)
- Calore in funzione della distanza, della corrente AC e della frequenza AC
- Fornaci, saldatura, cottura, trattamenti, chiusure ermetiche



Industrial welding and heating, UPS

Industrial heating and welding system diagram

Hover over the diagram to see recommended products



Uninterruptible power supply system diagram 100kVA

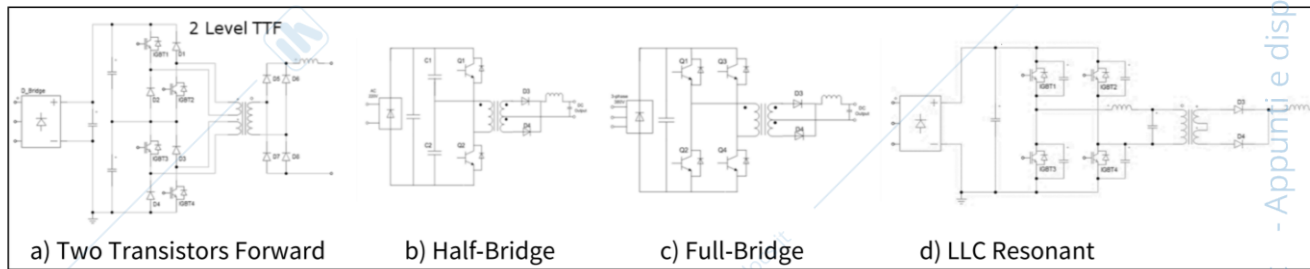
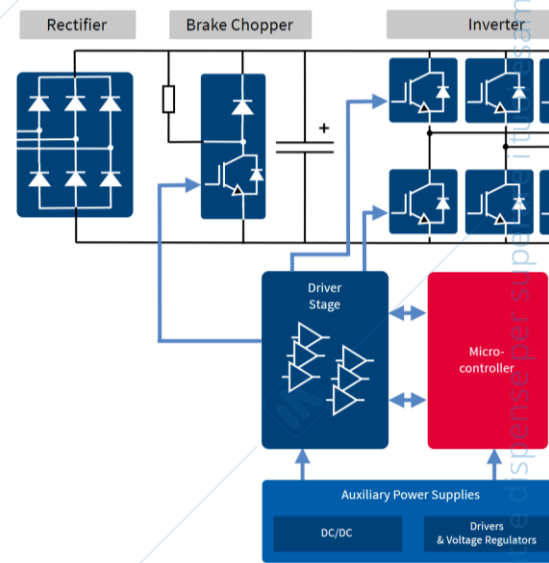
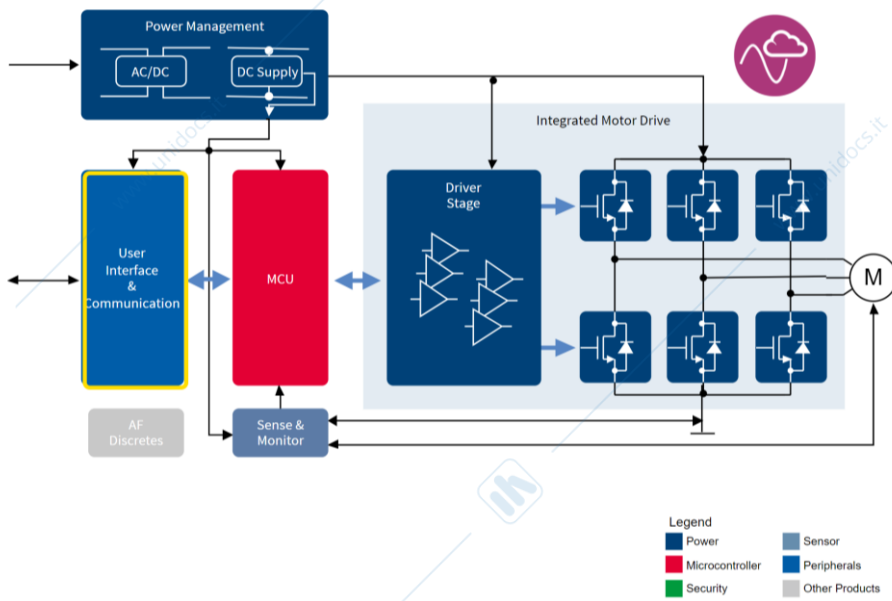


Figure 1 Typical DC-DC converter topologies used in medium-power welding machines

Industrial automation

Brushless DC motor

PMSM



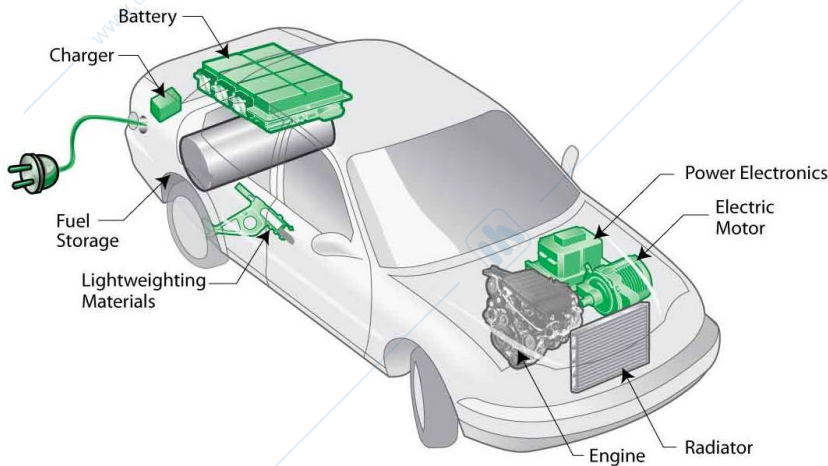
Elettronica per applicazioni automotive

L'utilizzo di un elevatissimo numero di sistemi elettronici nell'auto è ormai indispensabile:

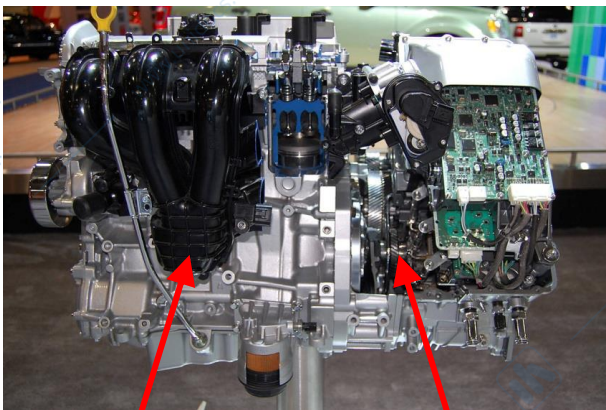


- Iniezione elettronica
- ABS, controllo di trazione, controllo di assetto, sospensione attive
- Climatizzazione, navigazione, GPS, entertainment
- Illuminazione, airbag
- Radar anticollisione, controllo della distanza tra veicoli
- Servosterzo, gestione motore e gas di scarico, sistemi di sicurezza, parking assistant

Veicoli elettrici ed ibridi

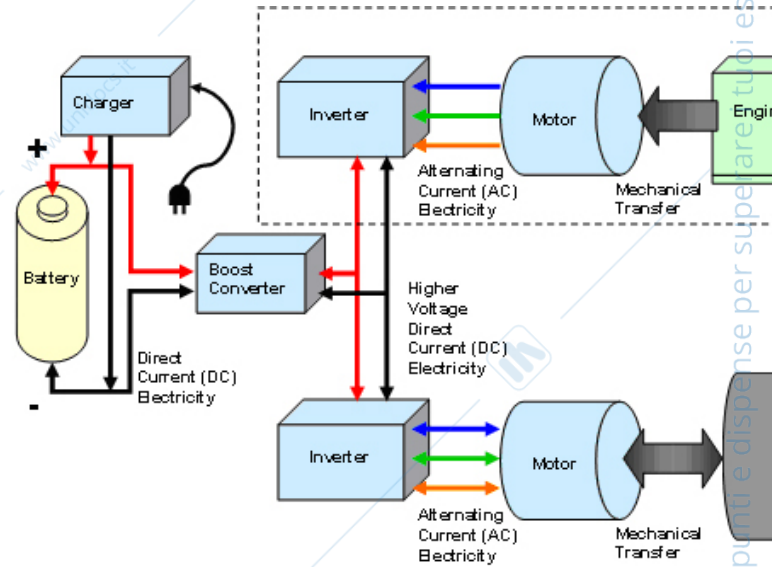


- ❑ Controllo motore elettrico tramite circuiti elettronici a potenza
- ❑ Circuiti di gestione delle batterie



Motore termico

Motore elettrico



Automotive: EV

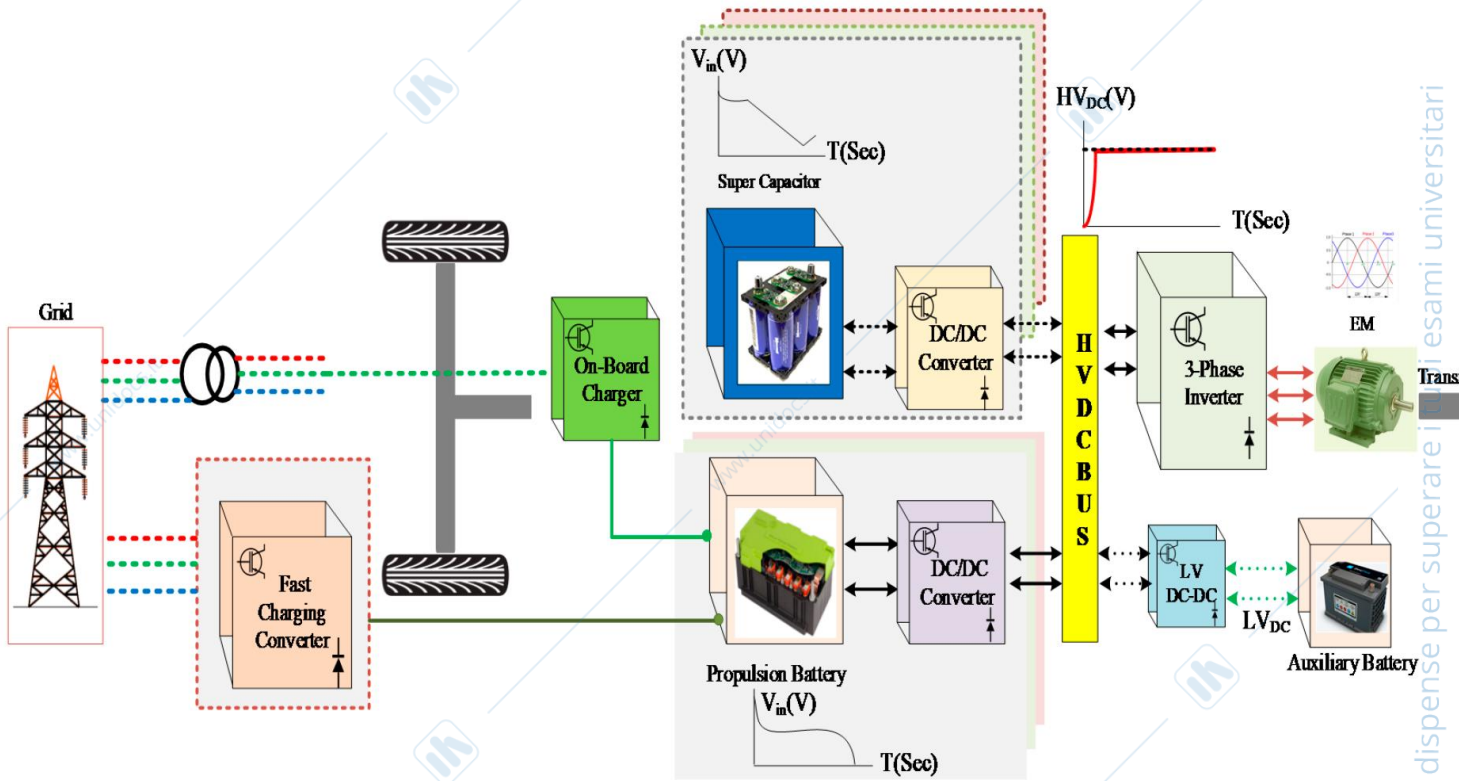
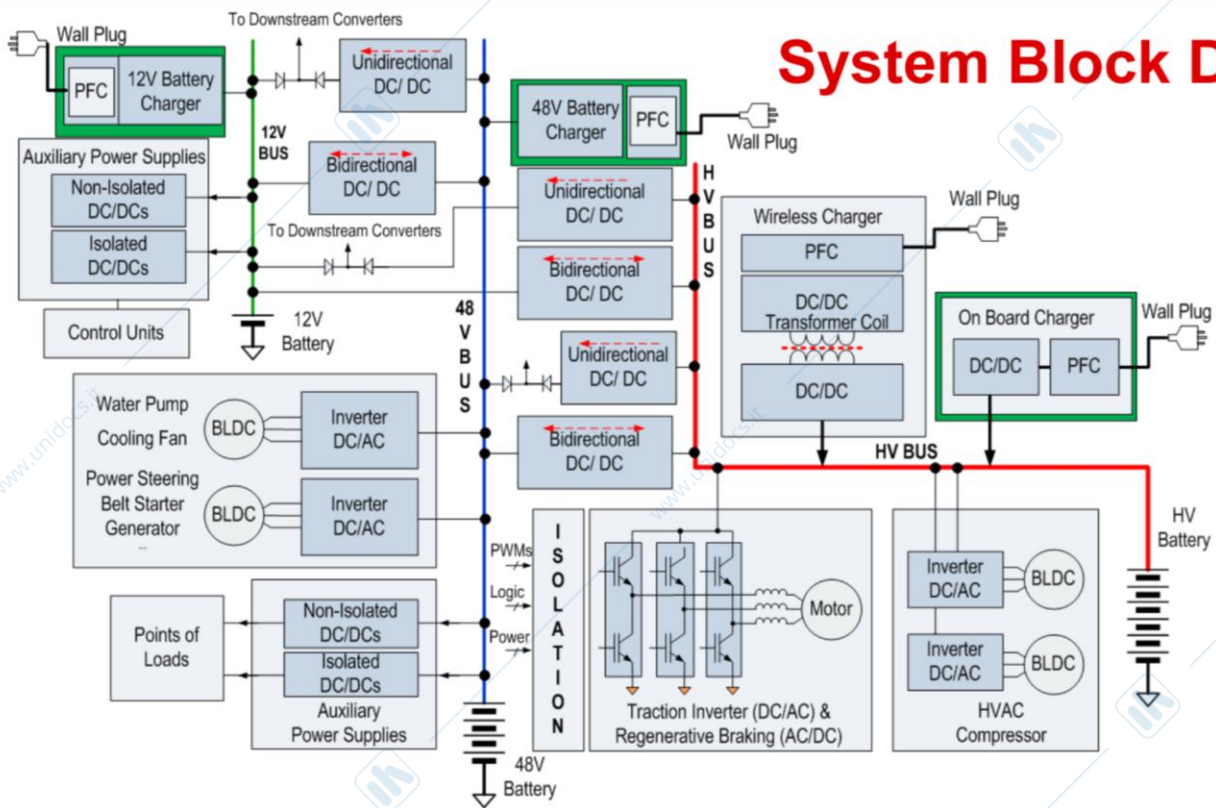


Figure 3. Block diagram of an electric vehicle powertrain.

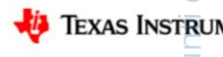
Automotive: EV



System Block Diagram

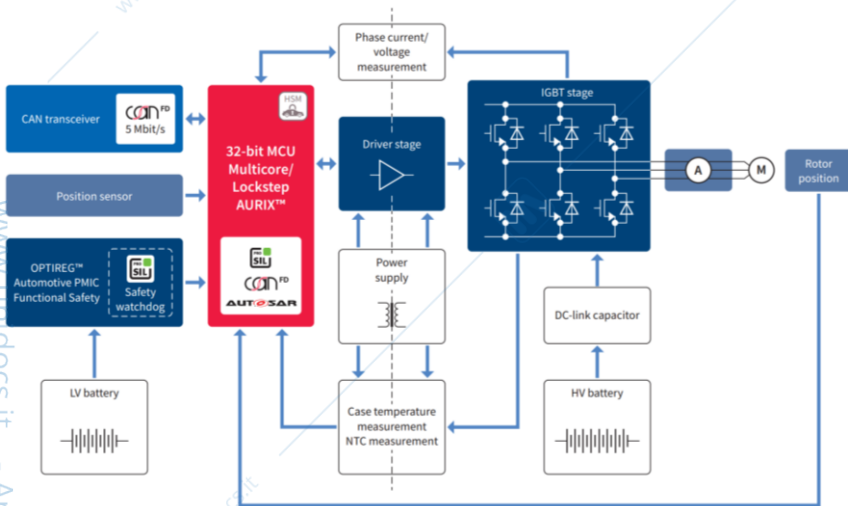
- Potential O Application (green)
- PFC
- Unidirection
- High Power
- ZVS for low on HV input
- Interleaved reduces str and EMI

TI Information – Selective Disclosure

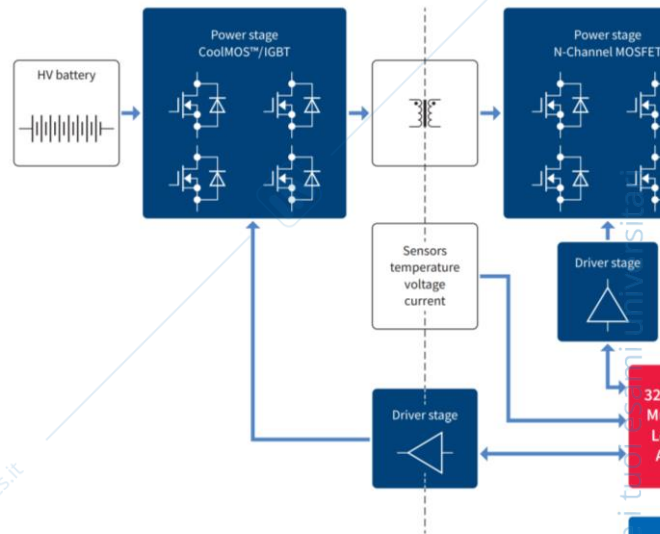


Automotive

Main traction inverter

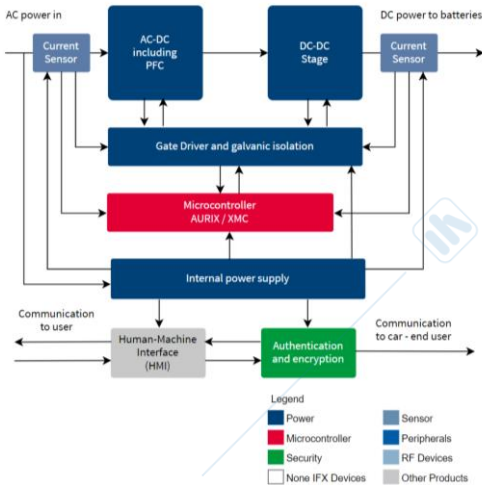


HV/LV DC-DC conversion



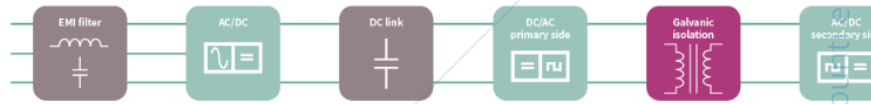
System diagram: DC EV chargers from 30 to 150 kW

Hover over the diagram to see recommended products

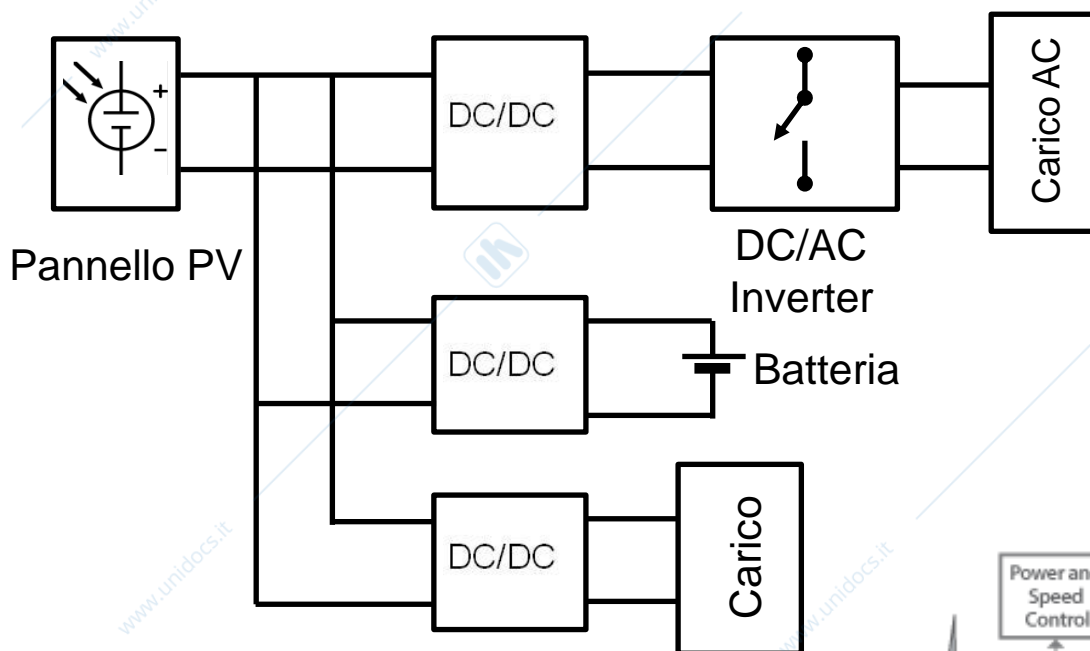


- Legend
- Power
 - Microcontroller
 - Security
 - None IFX Devices
 - Sensor
 - Peripherals
 - RF Devices
 - Other Products

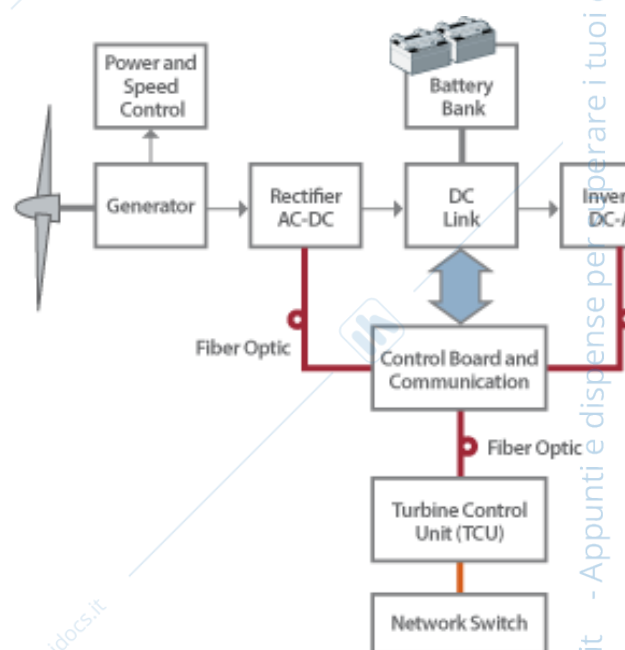
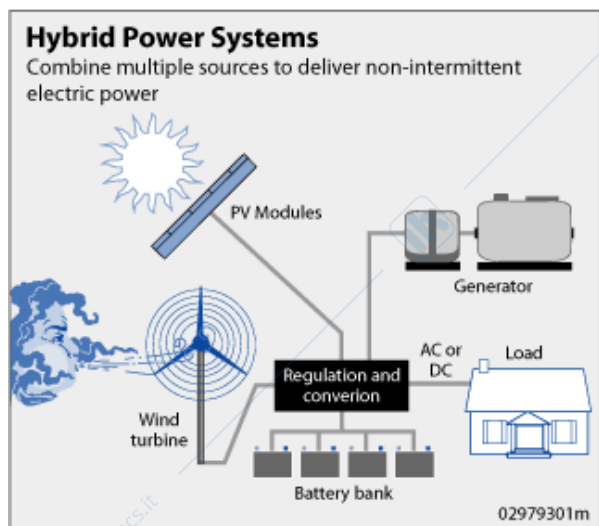
EV charger



Sistema fotovoltaico

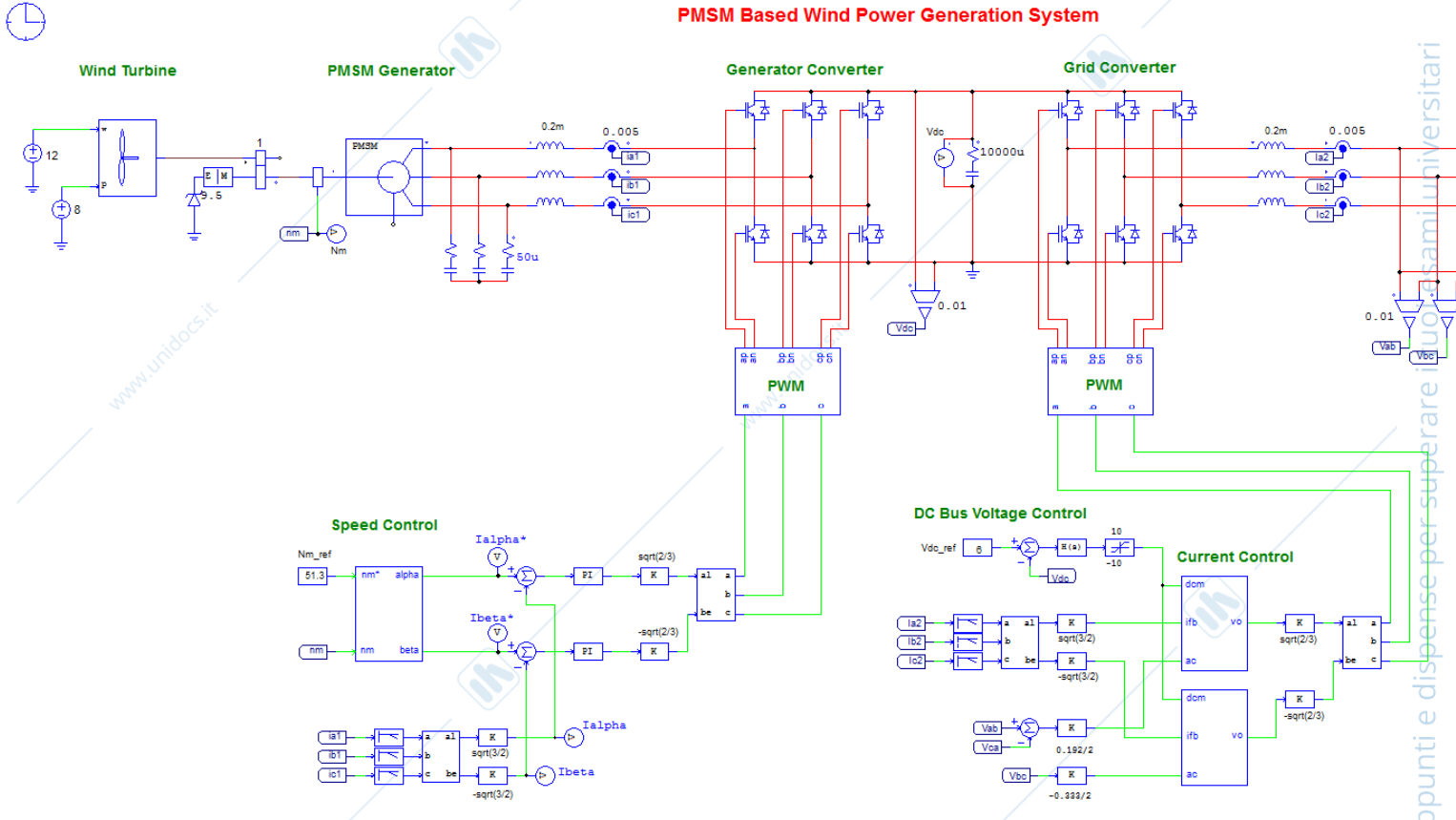


Wind po

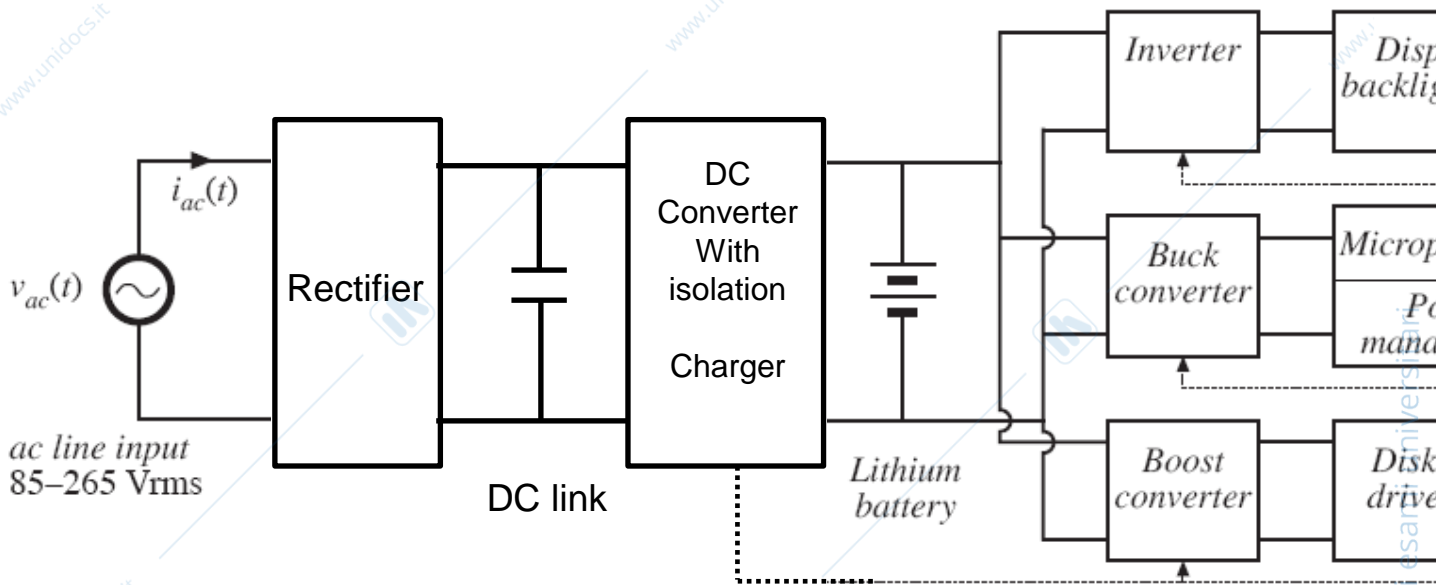


Simulazione di sistema Wind power system

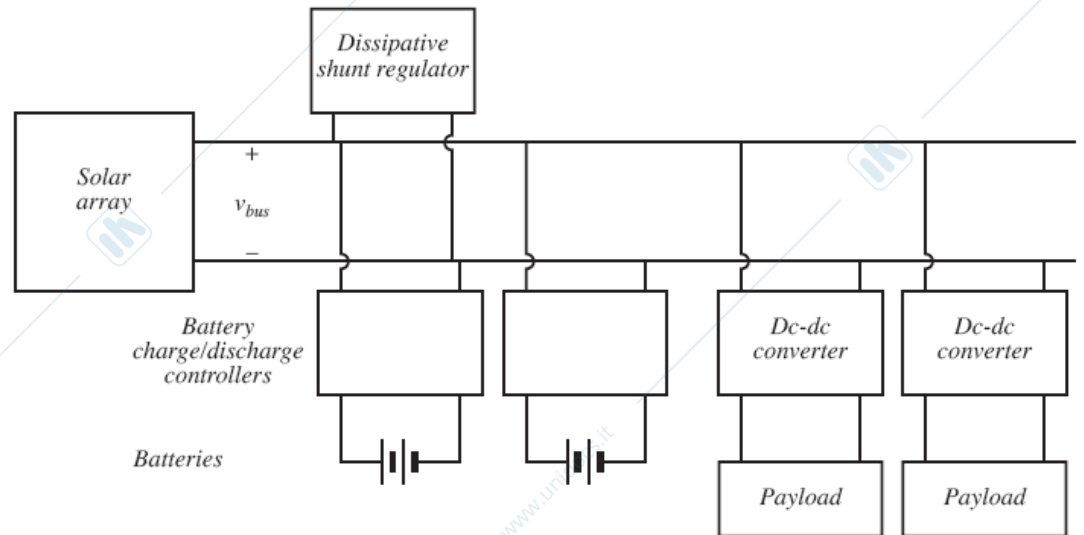
PMSM Based Wind Power Generation System



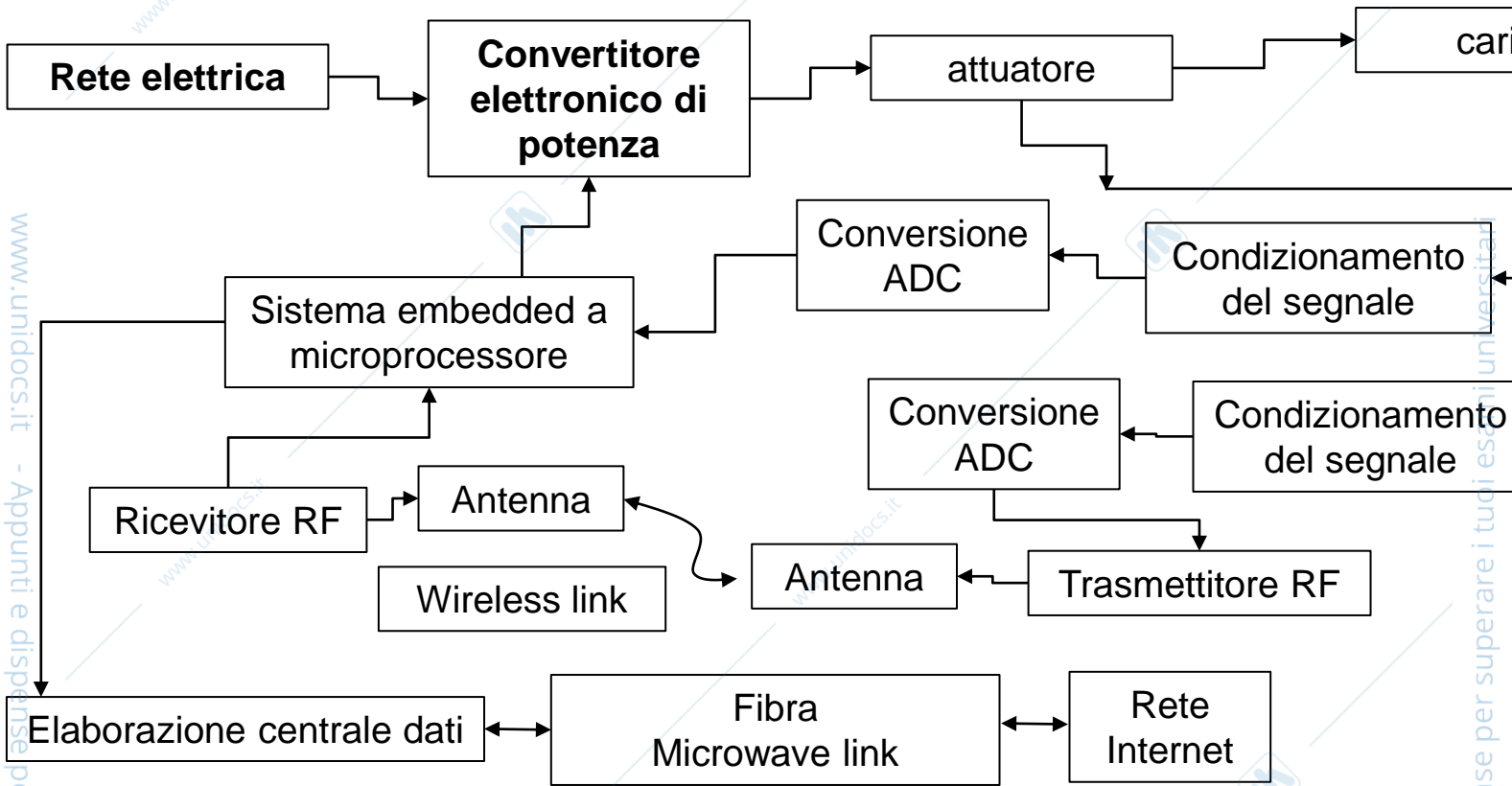
Personal computer power supply



Sistema di alimentazione di un satellite



Elettronica nei processi industriali – smart i



La visione di insieme del Sistema richiede delle conoscenze multidisciplin

Ovunque serva conversione dell'energia elettrica



(EN. ELETTRICA ↔ EN. MECCANICA)

ASSERVIMENTI (e reversibilità)

Motore CC

(Generatore CC)

Circuiti di pilotaggio motori DC
(ampiezza variabile)

Motore CA

(Alternatore)

Circuiti di pilotaggio motori AC
(ampiezza e frequenza variabile)

Pilotaggio pompe
Pilotaggio ventole

Circuiti di pilotaggio di dispositivi **PIEZOELETTRICI** (valvole)
Circuiti di pilotaggio onde sonore (casse, altoparlanti)

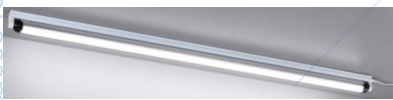
(EN. ELETTRICA ↔ EN. CHIMICA)

Circuiti di interfaccia per batterie ecc.

Circuiti di controllo di processi
(elettrolisi, saldatura)

(EN. ELETTRICA ↔ EN. LUMINOSA)

Circuiti di pilotaggio LED (DC)
Circuiti di pilotaggio lampade (AC)



(EN. ELETTRICA ↔ EN. TERMICA)

Dispositivi elettronici di potenza allo solido

- Dagli anni 50 in poi i dispositivi allo stato solido hanno dato un grande impulso allo sviluppo dell'elettronica industriale sostituendo velocemente tubi a vuoto
- **Cronologia dispositivi di potenza commerciali**
 - 1952 First Power Diode
 - 1956 SCR (Silicon Controlled Rectifier o tiristor)
 - 1960 Power Bjt
 - 1973 GTO
 - 1976 Power MOSFET
 - 1982 IGBT
 - 1990-2000 diodi e FET in SiC and GaN (semiconduttori composti III-V ad elevato gap energetico)

Dispositivi elettronici di pote

- Dispositivi elettronici in grado di gestire tensioni e correnti elevate (potenze)
- Dispositivi (spesso utilizzati come interruttori) sud non controllati e controllati
- Suddivisione in base il power rating (voltage and ratings)
- Suddivisione in base alla frequenza di funzionamento
- Suddivisione in base alle applicazioni
- Suddivisione in base ai semiconduttori utilizzati

Dispositivi elettronici di pote

- **Diodi**

PN (fast o slow recovery), Schottky

- **Tiristori o SCR (silicon controlled re**

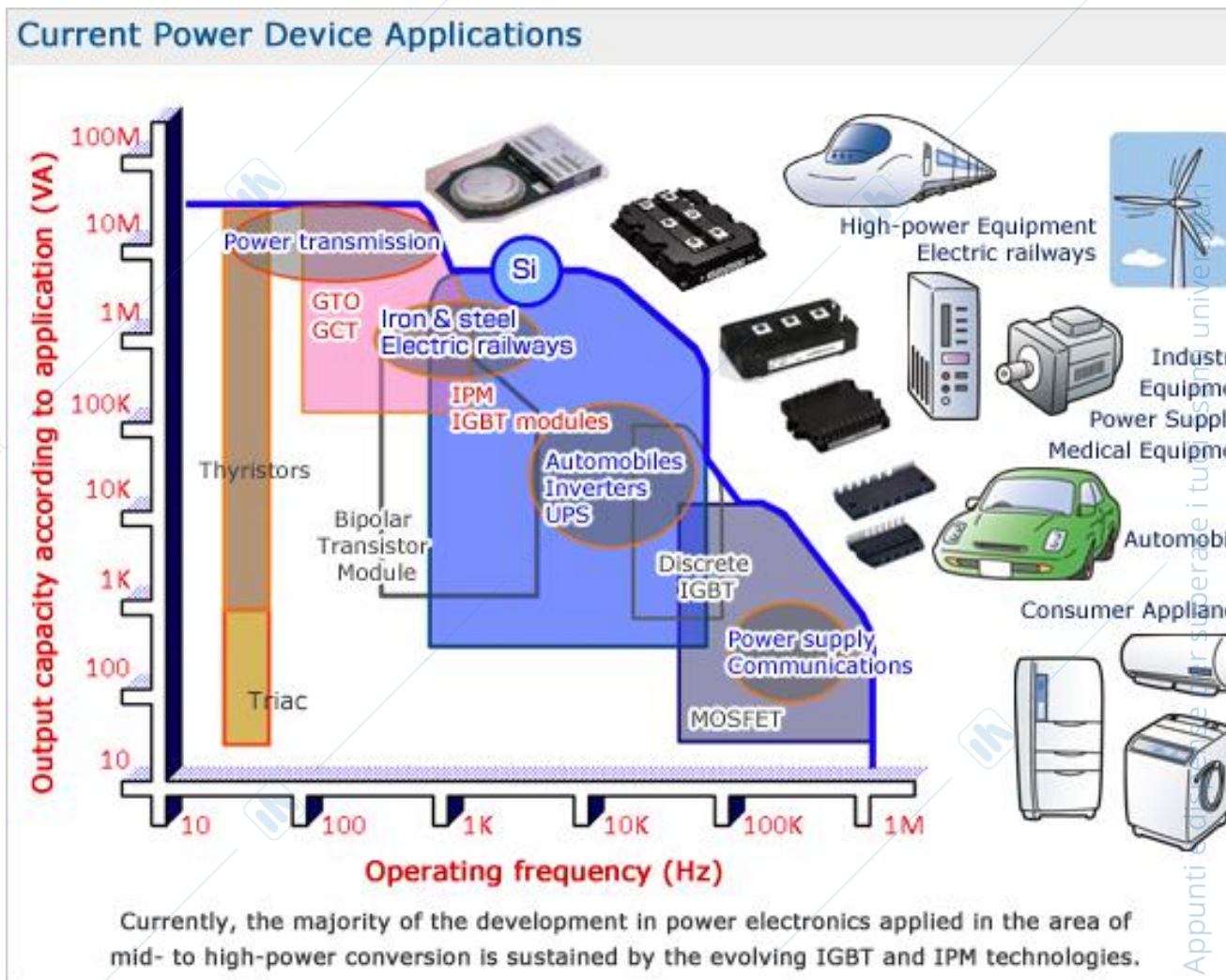
TRIAC (triode for AC), GTO (gate turn off thyristor)
(MOS controlled thyristor)

- **Bjt**

- **Power MOSFET**

- **IGBT (insulated gate bipolar transistor)**

Dispositivi elettronici di pote



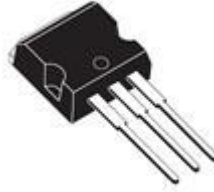
Package componenti descr



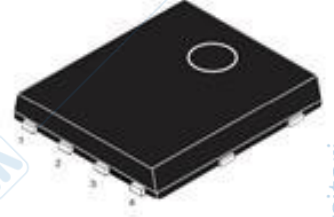
D2PAK



TO-220



I2PAK



Powerfl



SOT-227B



SOT-223



VSON



assiale

Montaggio: Through Hole , SMD o screw

Montaggio

Through Hole

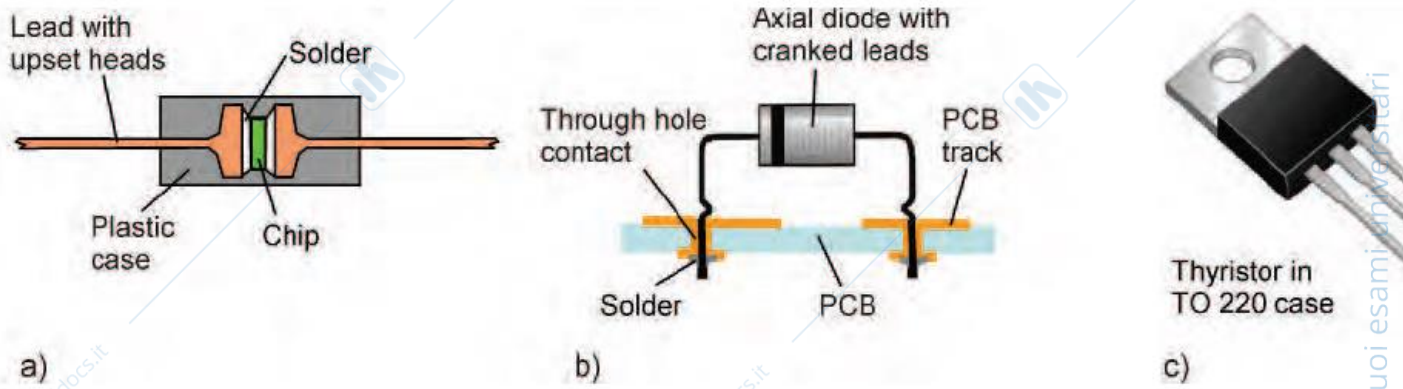
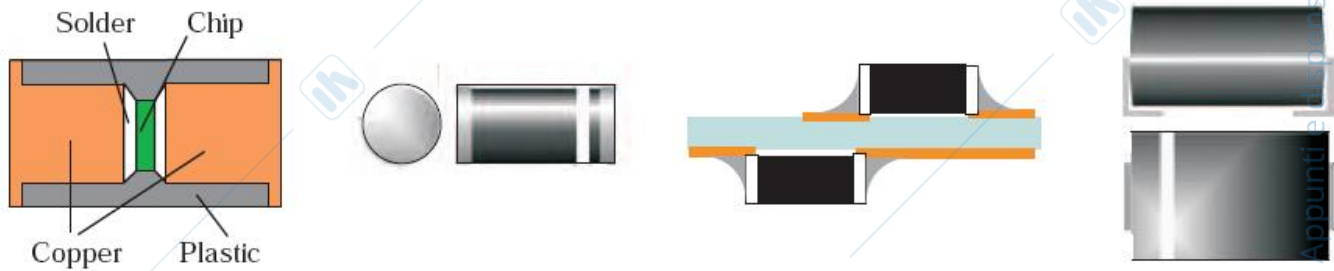
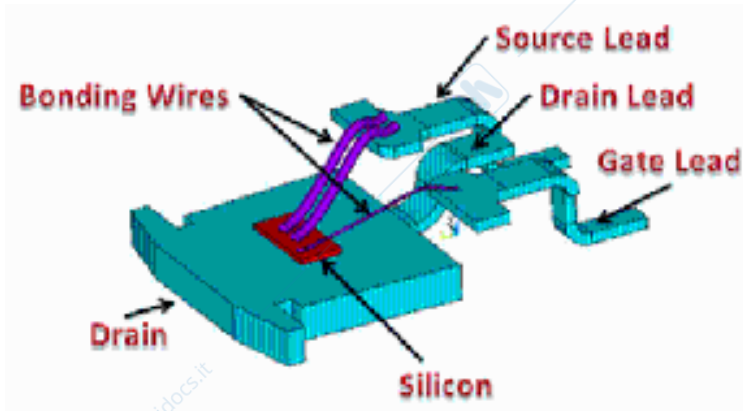


Figure 2.5.29 a) Structure of an axial diode (diagram); b) Mounting of axial diode on a PCB; c) Wired component with cooling and mounting plate

SMD



Dentro al package

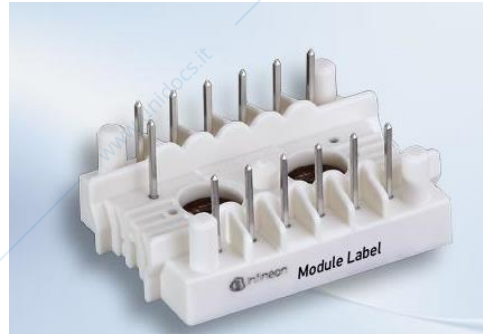


Die (o chip) di silicio
connettorizzato ai lead
tramite wire bonding
(alluminio, rame, oro..)



Figure 2:
An example of wire bonding inside a power semiconductor package

Moduli



Moduli IGBT moduli (full bridge, half bridge)
Moduli di diodi (ponte, mezzo-ponte, ponte trifase ...)

Package tiristori



Dischi oltre ai soliti package

Dischi

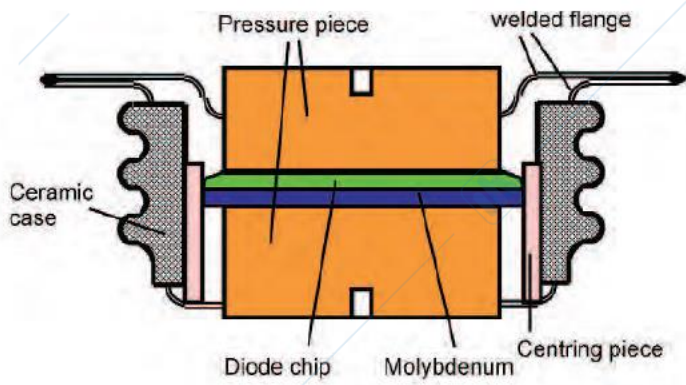
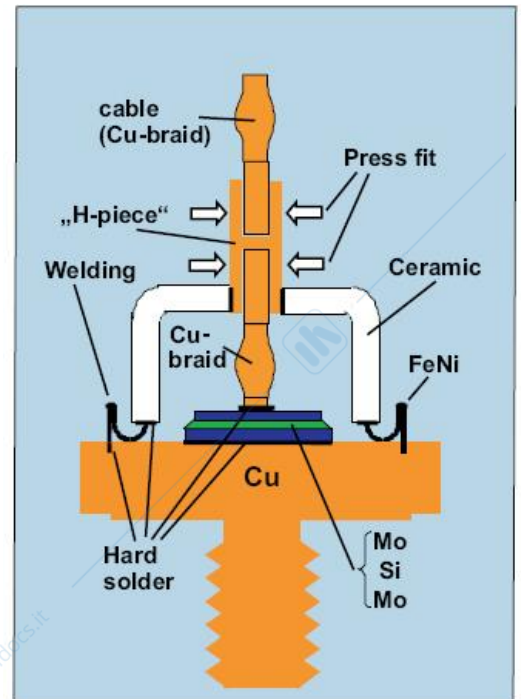
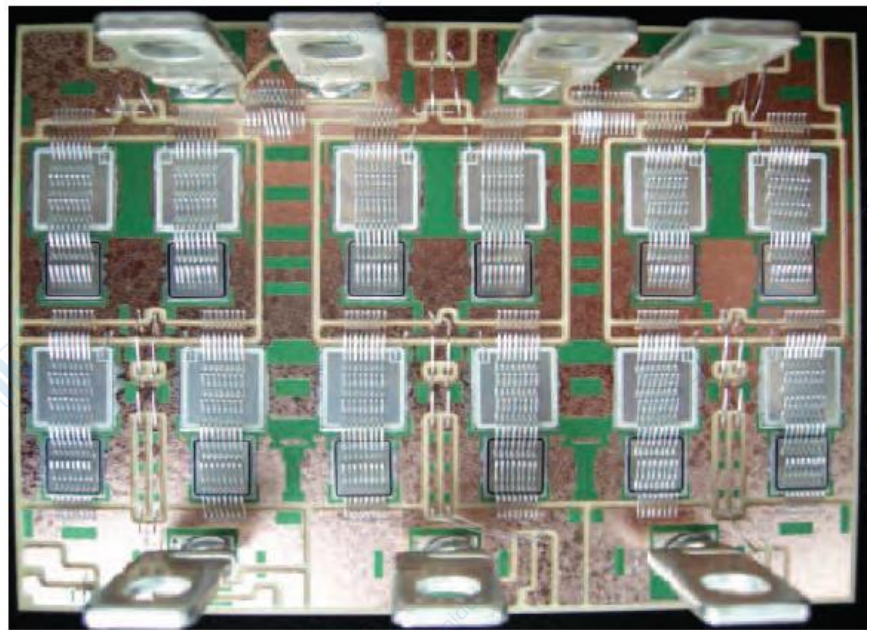
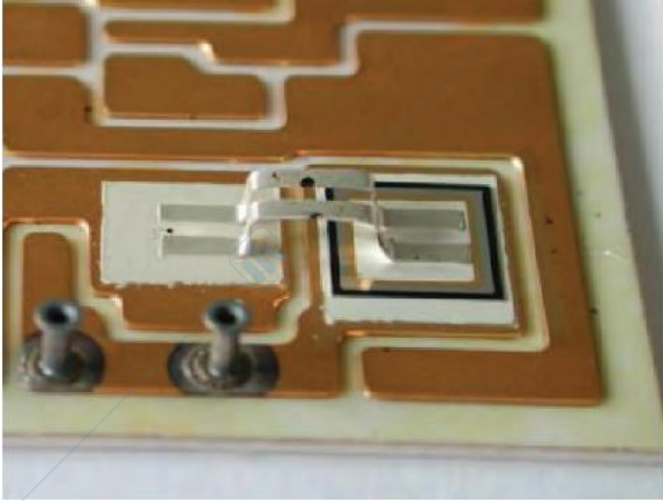


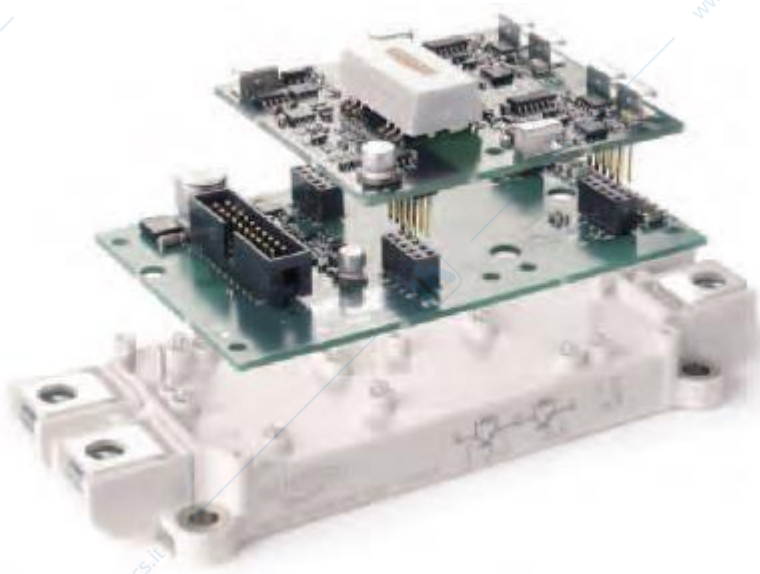
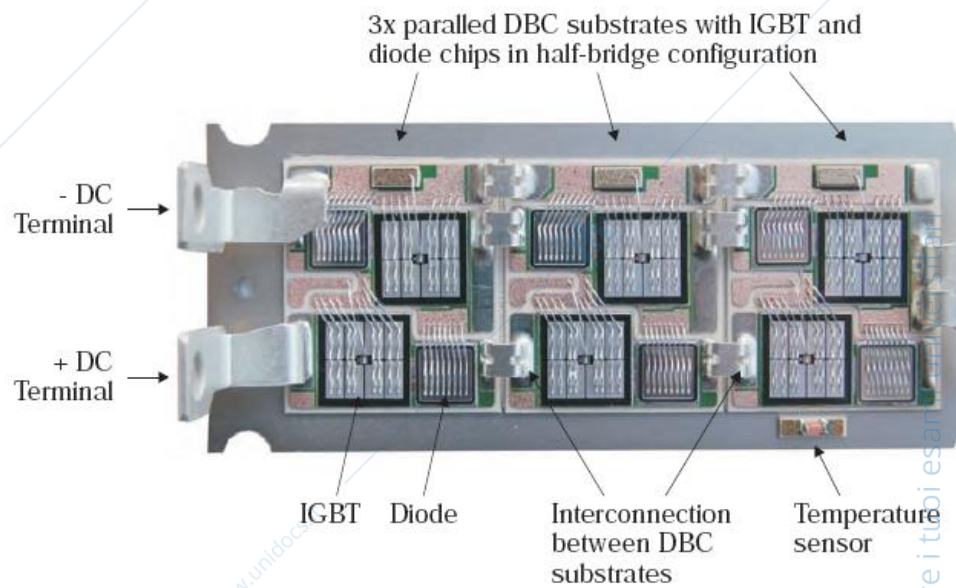
Figure 2.5.32 Sectional view of a disk cell and view of a thyristor disk cell



Dentro al modulo

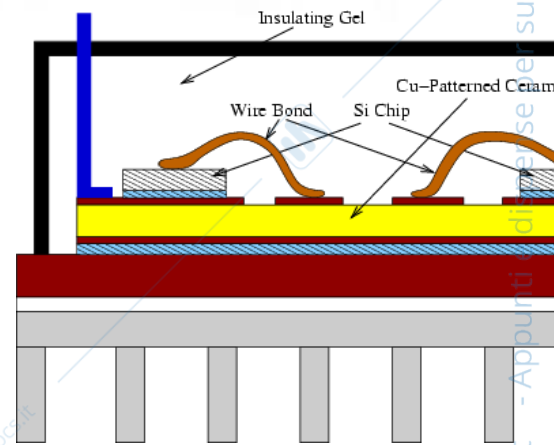
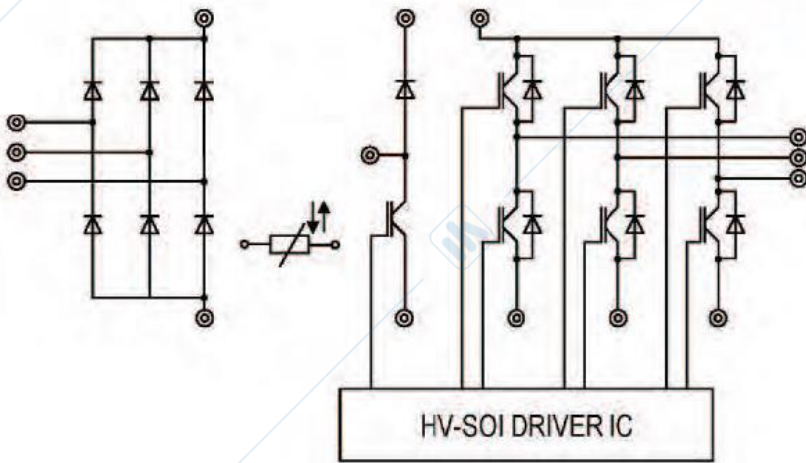
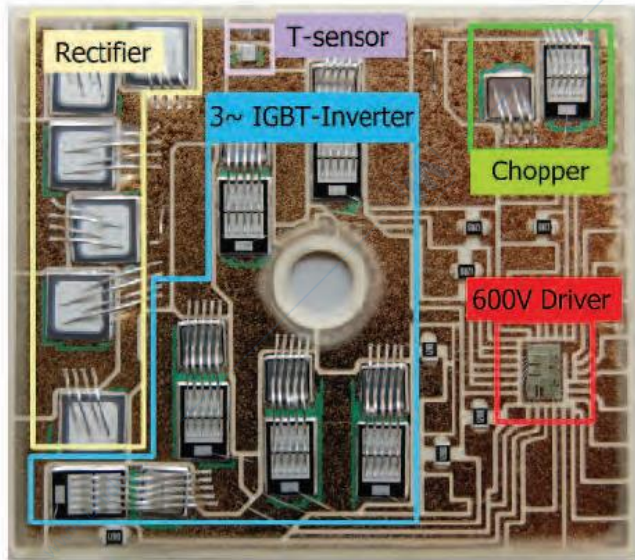


Moduli IGBT

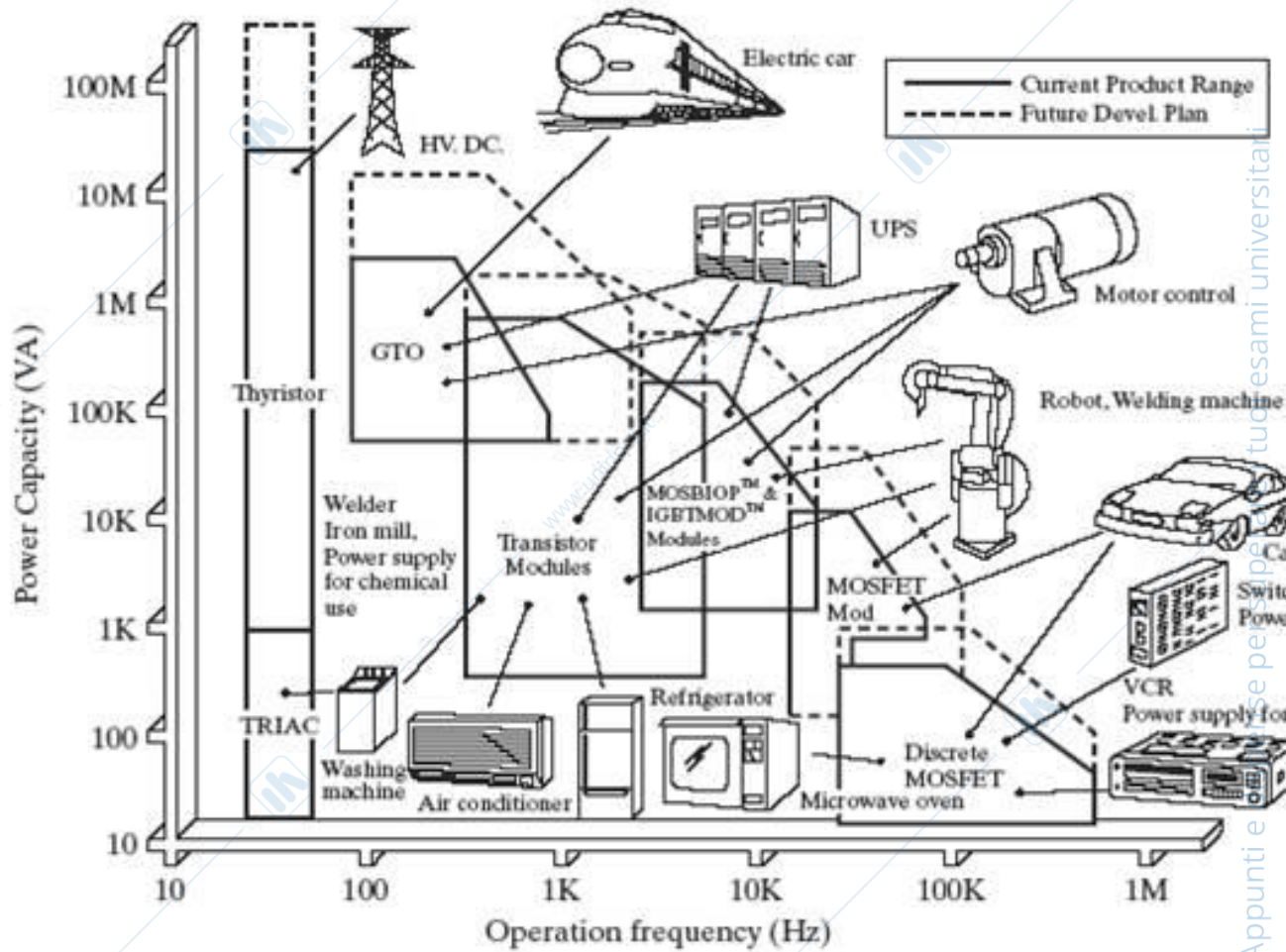


Strutture molto complesse
Driver over module

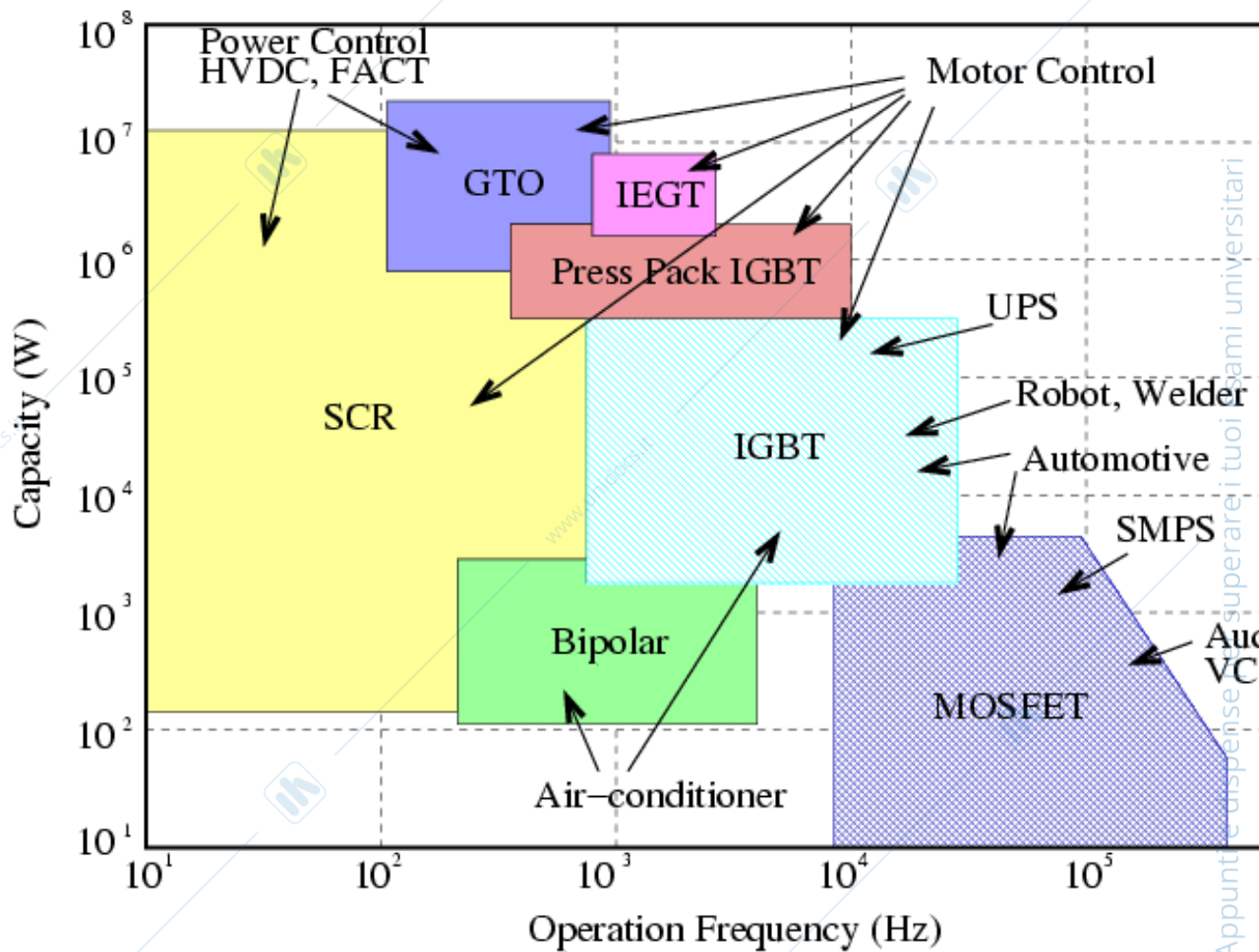
Inverter trifase con driver



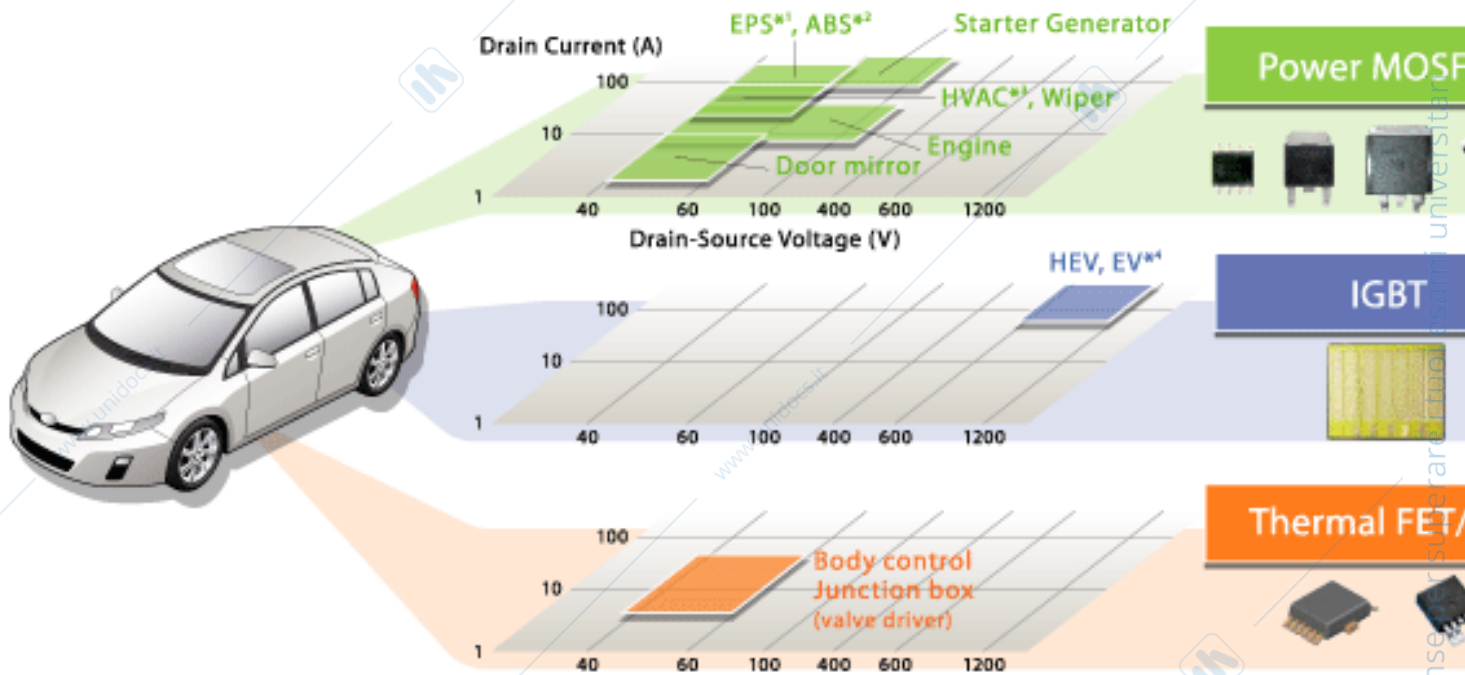
Dispositivi elettronici di pote



Dispositivi elettronici di pote



Dispositivi elettronici di pote

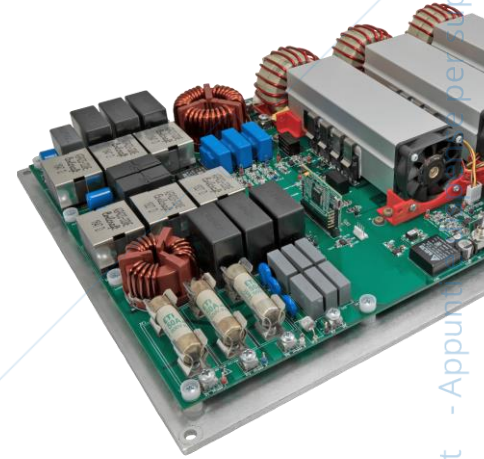


*1 EPS: Electric Power Steering *2 ABS: Antilock Brake System *3 HVAC: Heating Ventilation Air Conditioning *4 HEV: Hybrid Electric Vehicle, EV: Electric Vehicle

Altri dispositivi elettronici

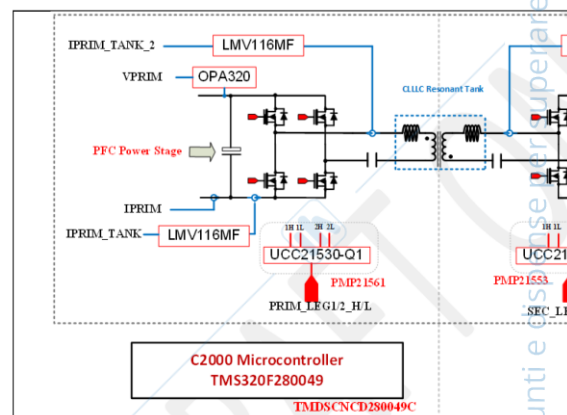
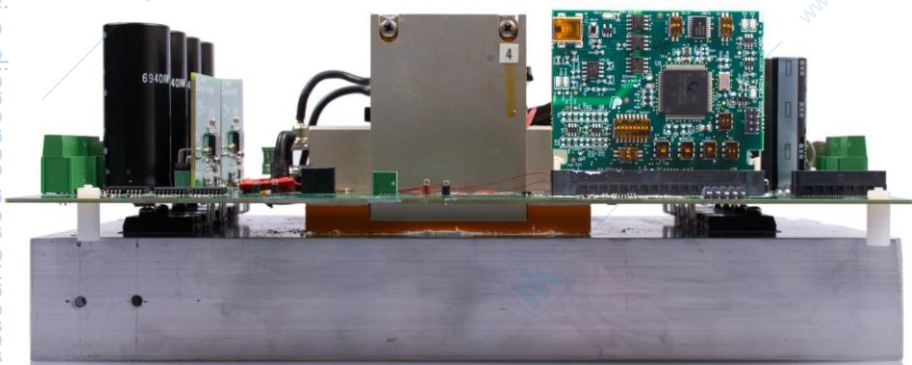
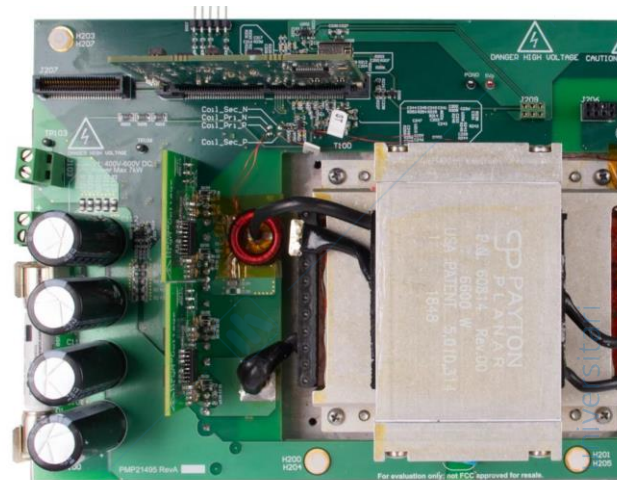
- Induttori di potenza (air core and ferromagnetic energy storage, filter, EMI, peak current limiting resonance tuning...)
- Trasformatori (isolamento, trasformazione di im
- Condensatori (plastici, ceramici, elettrolitici): en storage, filter, EMI, noise suppression, resonan
- Sensori: sensori di corrente, sensori di tempera sensori optoelettronici, sensori capacitivi
- IC controller: analogici, digitali (PWM analog co IC, MCU-microcontrollori, FPGA, PLD, DSP...)

PCB board of power converters

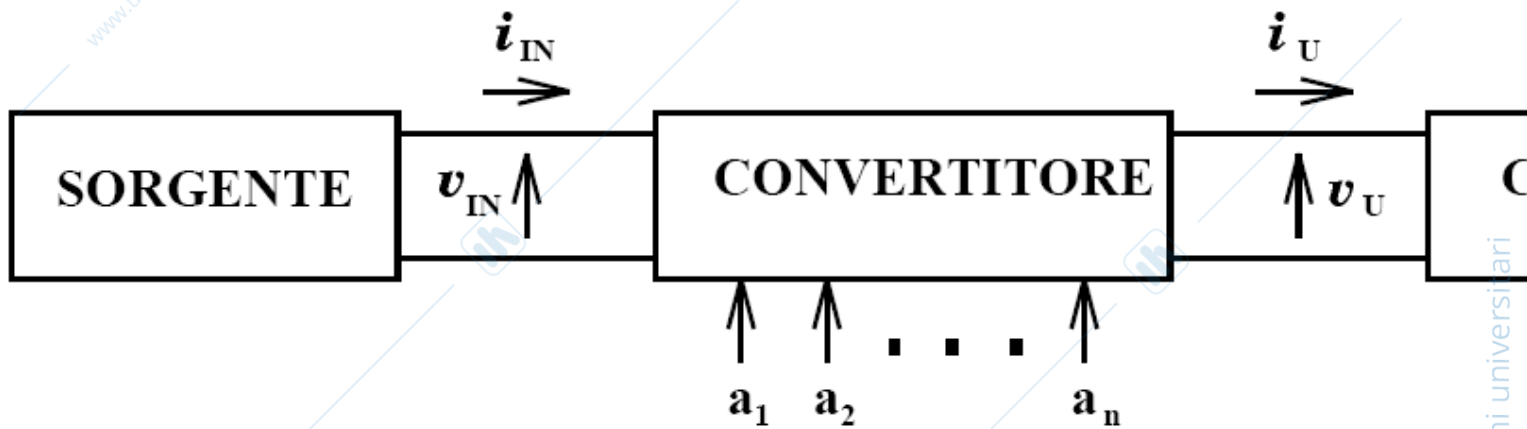




Board + sink: 14 cm x 25 cm x 8 cm



Prestazioni dei convertito



Distorsione (in/out)

$v_u^*(t)$ DESIDERATO $v_u^* = v_u^*(t)$

Rendimento

Fattore di potenza

$v_u(t)$ REALE $v_u = v_u(t, \underline{a}, i_u, v_u, \theta)$

Banda/guadagno

Regolazione

Vettore delle variabili di c

Resistenza di uscita

Condizioni di car

Coefficiente di temperatura

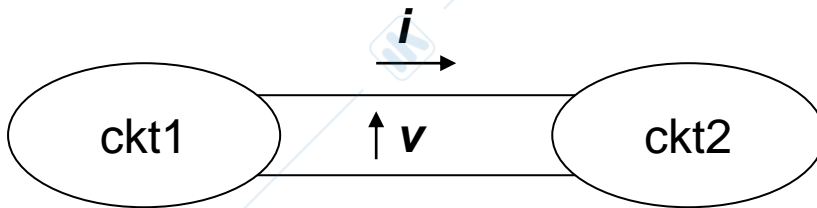
Richiami

- Regime periodico stazionario
- Potenza media e valore efficace (RMS)
- Metodo simbolico di rappresentazione delle grandezze elettriche tramite fasori
- Impedenza
- Potenza attiva, potenza reattiva e fattore di potenza
- Serie di Fourier di un segnale periodico
- Equazioni costitutive di capacità ed induttanza

Richiami

Circuiti in **regime periodico stazionario**: le forme d'onda si ripetono con

$$v_u(t-T) = v_u(t) \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \quad \omega : \text{Pulsazione } \omega = 2\pi f$$



Flusso di potenza istantanea
circuiti elettronici

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad \text{Potenza istantanea, } v \text{ e } i \text{ variano nel tempo}$$

A regime le forme d'onda di **v** e **i** si ripetono con periodo **T**, definisco

$$P_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) i(t) dt \quad \text{Potenza media erogata e trasferita d}$$

Se ckt 2 è un carico puramente resistivo $v=RI$

$$P_{av} = R \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt \quad I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) \cdot dt} \quad \Rightarrow \quad P_{av} = RI_{RMS}^2$$

**POTENZA MEDIA
CARICO RESISTIVO**

Definisco : **valore efficace della corrente (RMS)**

Richiami

Valore efficace : RMS *root mean square*: radice della media dei quadrati

Se $i(t)$ è costante $i(t)=I_0$ (DC) $I_{RMS}=I_0$

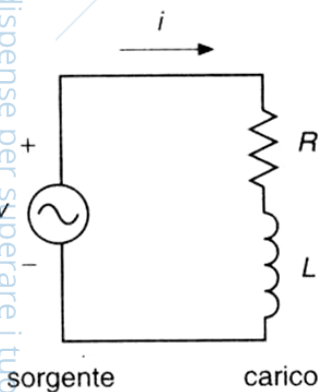
Se $i(t)$ è sinusoidale $i(t)=I \cdot \cos(\omega t)$ $\longrightarrow I_{RMS} = \frac{I}{\sqrt{2}}$

Rappresentazione **vettoriale** di correnti e tensioni sinusoidali a regime (I)

Rappresentazione mediante **Fasori**: vettori rotanti nel piano complesso in senso antiorario con velocità angolare ω

Ad ogni grandezza sinusoidale con pulsazione ω è associata una **ampiezza** (di picco) e una **fase** Φ (rispetto ad una posizione di riferimento)

Esempio: generatore di tensione sinusoidale con carico induttivo



$$v(t) = V \cos \omega t$$

$$\bar{V} = V e^{j0}$$

$$I_p = I \cdot \cos \Phi$$

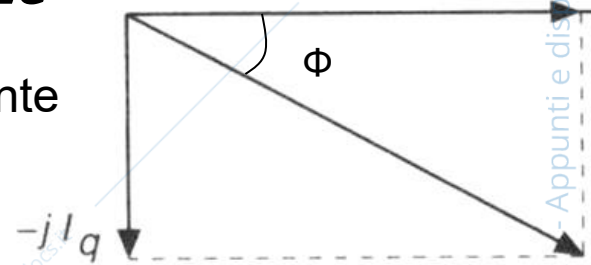
$$i(t) = I \cos(\omega t - \phi)$$

$$\bar{I} = I e^{-j\phi}$$

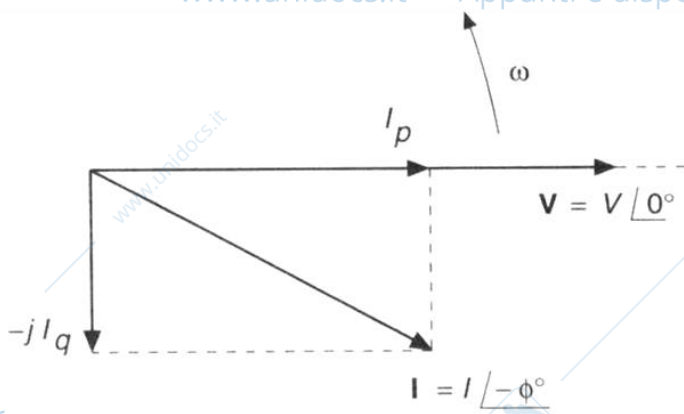
$$I_q = I \cdot \sin \Phi$$

Diagramma dei fasori all'istante in cui la tensione assume il valore massimo positivo

La corrente è in ritardo di Φ



Richiami



La corrente ha una componente in fase con v (I_p) ed una in quadratura (I_q), ovvero sfasata

V e I sono legati dall'impedenza del

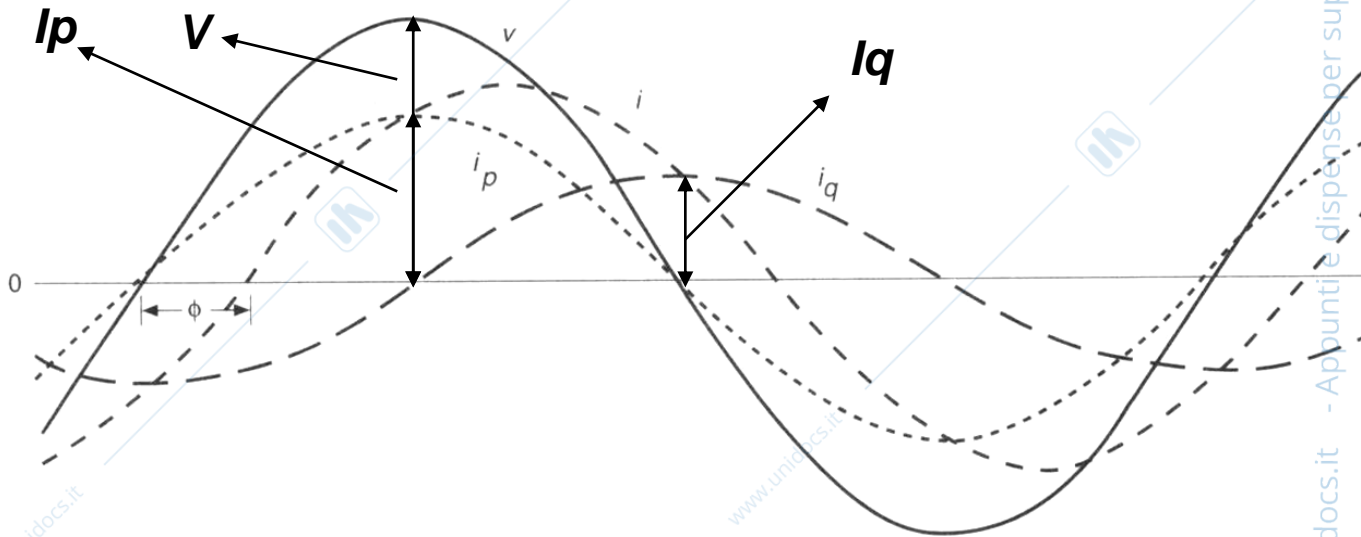
$$\bar{Z} = R + j\omega L = Z e^{j\phi} \quad \phi = \arctan$$

$$\bar{I} = \frac{\bar{V}}{\bar{Z}} = \frac{V e^{j0}}{Z e^{j\phi}} = \frac{V}{Z} e^{-j\phi} = I e^{-j\phi}$$

i è sfasata di Φ rispetto a v

i_p è in fase rispetto a v : le forme d'onda nel dominio del tempo si annullano allo stesso istante e raggiungono il valore di picco allo stesso istante

i_q è in quadratura rispetto a v : quando v raggiunge il valore di picco i_q è nulla e



Potenza complessa, apparente, attiva e reattiva

Potenza complessa $\bar{S} = \bar{V}_{RMS} \cdot \bar{I}_{RMS}^* = V_{RMS} e^{j0} \cdot I_{RMS} e^{j\phi} = \frac{1}{2} VI e^{j\phi} = S e^{j\phi}$

Potenza apparente $P_{App} = |\bar{S}| = \frac{1}{2} VI = V_{RMS} I_{RMS}$ [volt-ampere]

Potenza attiva $P = \text{Re}[\bar{S}] = \frac{1}{2} VI \cos \phi = \frac{1}{2} VI p = V_{RMS} I_{RMS} \cos \phi$ [Watt]

La potenza attiva è reale ed è data dal prodotto dei valori efficaci della tensione e della componente di corrente in fase con la tensione (i_p)

Potenza reattiva $Q = \text{Im}[\bar{S}] = \frac{1}{2} VI \sin \phi = \frac{1}{2} VI q = V_{RMS} I_{RMS} \sin \phi$ [volt-ampere reattivi]

La potenza reattiva è puramente immaginaria ed è data dal prodotto della tensione e della componente di corrente in quadratura (i_q)

$$i(t) = i_p(t) + i_q(t)$$

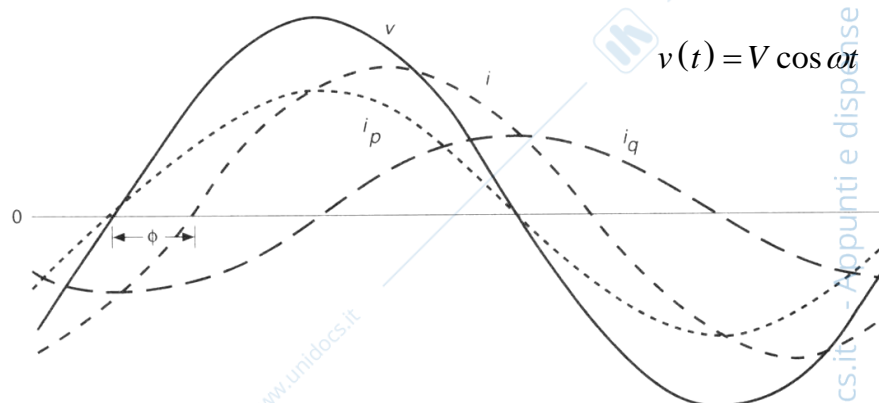
$$i_p(t) = I_p \cos \omega t = (I \cos \phi) \cos \omega t$$

$$i_q(t) = I_q \sin \omega t = (I \sin \phi) \sin \omega t$$

$$p_1(t) = v(t) i_p(t)$$

$$p_2(t) = v(t) i_q(t)$$

$$p(t) = p_1(t) + p_2(t)$$



Potenza complessa, apparente, attiva e reattiva

$$i(t) = i_p(t) + i_q(t)$$

$$i_p(t) = I_p \cos \omega t = (I \cos \phi) \cos \omega t$$

$$i_q(t) = I_q \sin \omega t = (I \sin \phi) \sin \omega t$$

$$\cos^2(\alpha) = \frac{1 + \cos(2\alpha)}{2}$$

$$\frac{\sin(2\alpha)}{2} = \sin \alpha \cos \alpha$$

Potenze istantanee

$$p(t) = p_1(t) + p_2(t)$$

$$p_1(t) = v(t)i_p(t) = V \cos \omega t \cdot I \cos \phi \cos \omega t = VI(\cos^2 \omega t) \cos \phi = \frac{1}{2}VI \cos \phi + \frac{1}{2}VI \cos 2\omega t$$

$$p_2(t) = v(t)i_q(t) = V \cos \omega t \cdot I \sin \phi \sin \omega t = VI(\cos \omega t \sin \omega t) \sin \phi = \frac{1}{2}VI \sin 2\omega t \sin \phi$$

Potenze medie

$$P_{1av} = \frac{1}{T} \int_0^T p_1(t) dt = \frac{1}{2}VI \cos \phi = V_{RMS} I_{RMS} \cos \phi \quad P_{2av} = \frac{1}{T} \int_0^T p_2(t) dt = 0$$

Le due potenze istantanee pulsano con una pulsazione doppia della sorgente.

Il valore medio della $P_1 =$ **potenza attiva**, potenza effettivamente ceduta al carico.

Il valore medio della $P_2 = 0$ (potenza reattiva)

Solo la componente della I in fase con la V trasferisce potenza

Potenza complessa, apparente, attiva e reattiva

$$\bar{S} = P + j Q$$

Potenza complessa

$$P_{app} = |\bar{S}| = S = \sqrt{P^2 + Q^2} = V_{RMS} I_{RMS}$$

Potenza apparente

$$Q = \frac{1}{2} VI \sin \phi = \sqrt{S^2 - P^2}$$

Potenza reattiva

Potenza

Significato fisico di S, P e Q

$$P = \text{Re}[\bar{S}] = \frac{1}{2} VI \cos \phi =$$

P potenza attiva (reale): è la potenza effettivamente trasformata in lavoro

Ma il costo degli apparati elettrici aumenta con $S = V_{RMS} I_{RMS}$ potenza apparente

Lo sforzo è quindi quello di minimizzare (annullare) la potenza reattiva Q

Fattore di potenza (carico lineare)

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{\text{potenza attiva}}{\text{potenza apparente}} = \frac{V_{RMS} I_{RMS} \cos \phi}{V_{RMS} I_{RMS}} = \cos \phi \quad (\text{Displacement Factor})$$

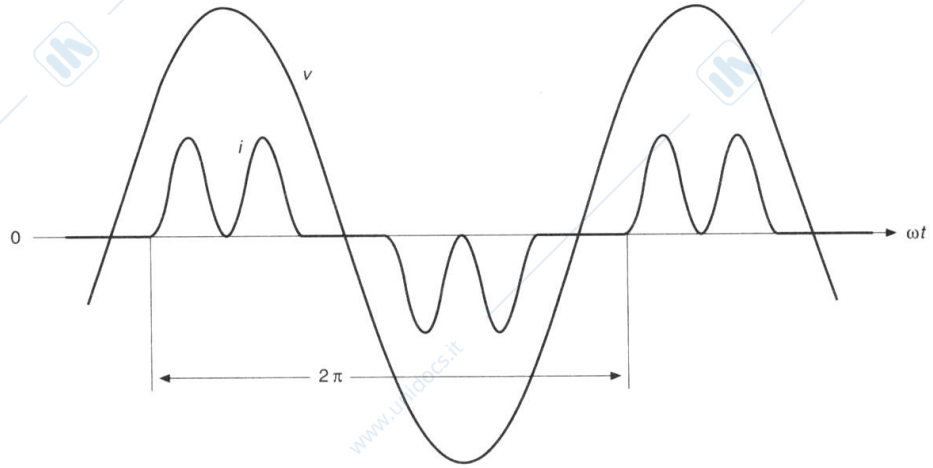
Indica come il carico assorbe la potenza reale

Caso ideale: corrente e tensione in fase, $\Phi=0$, $PF=1$, potenza reattiva $Q=0$
la potenza apparente (disponibile) viene trasferita al carico come potenza attiva

A parità di potenza attiva trasferita al carico se $PF=1$, **allora tale trasferimento è**
realizzato con la corrente minima, quindi minime perdite nella rete e nessun

Grandezze non sinusoidali in regime pe

- Nei circuiti elettronici di potenza le forme d'onda di corrente e tensione sono spesso fortemente distorte
- Esempio (tensione sinusoidale, corrente distorta)



Anche se distorte sono comunque periodiche: si ripetono nel periodo T ed una frequenza $f=1/T$

Questa frequenza prende il nome di Fondamentale (pedic

Oltre alla fondamentale che è la componente solitamente la forma d'onda contiene anche componenti con frequenze della fondamentale: armoniche

Serie di Fourier

Una grandezza periodica con periodo T può essere rappresentata delle frequenze come sviluppo in serie di Fourier

$$f(t) = F_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \bar{F}_k(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \{a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)\}$$

Forma
o cart

$$F_0 = \frac{1}{2} a_0 \quad \text{valore medio}$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(k\omega t) dt$$

Reali se
f(t) è reale

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(k\omega t) dt$$

Ogni componente della serie può essere rappresentato con un fasore

$$\bar{F}_k = F_k e^{j\Phi_k} \quad F_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$$

$$\phi_k = a \tan \frac{(b_k)}{a_k}$$

Valore medio $F_0 = \frac{1}{2} a_0 = \frac{1}{2} \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$

Esempio: tensione (corrente) distorte, sviluppo della serie di Fourier polare o armonica (utilizzo i fasori di V o I):

$$\bar{V}_k = V_k e^{j\Phi_k} = a_k + j b_k$$

$$v(t) = V_0 + \sum_{k=1}^{\infty} V_k \cdot \cos[k\omega t + \Phi_k]$$

$$\phi_k = a \tan \frac{(b_k)}{a_k} = \arg(a_k + j b_k)$$

Valor medio

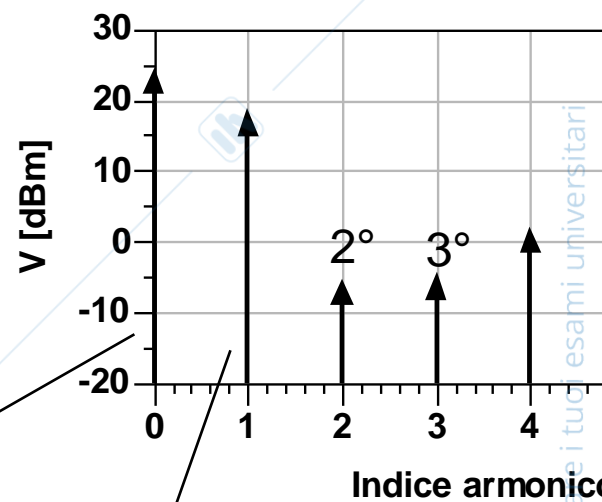
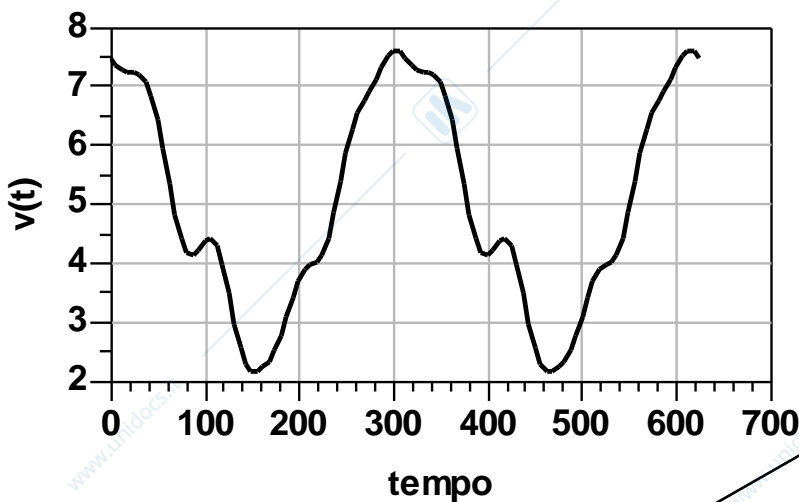
Armoniche

$$V_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$$

Sviluppo in serie di Fourier

$$v(t) = V_0 + \sum_{k=1}^{\infty} V_k \cdot \cos[k\omega t + \Phi_k]$$

$$\bar{V}_k = V_k e^{j\Phi_k} = a_k + j b_k$$



V_0 valore medio

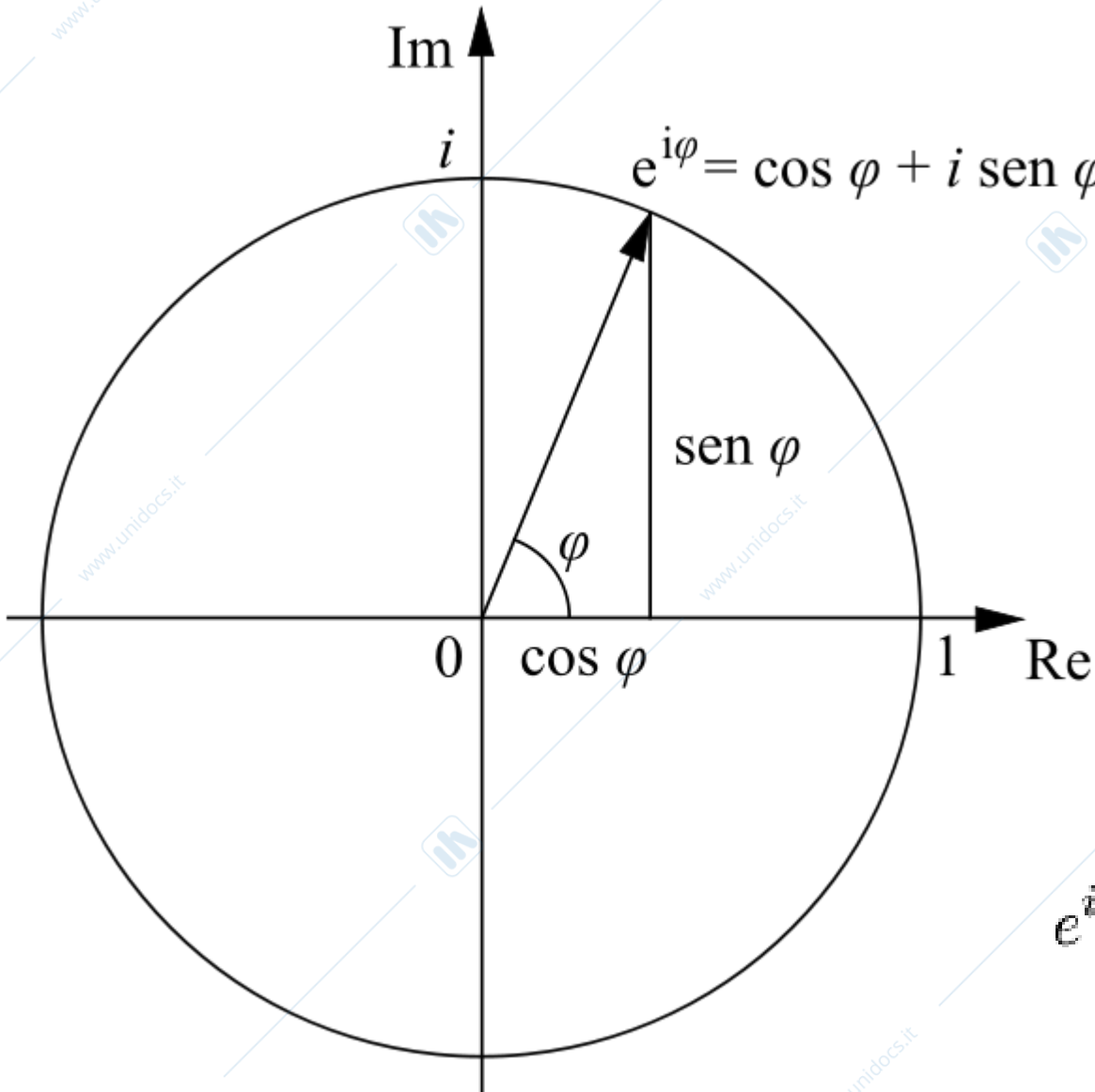
V_1 prima armonica o fondamentale (fase)

Ad ogni armonica è associata una ampiezza V_k ed una fase ϕ_k

La potenza media del segnale è data dalla somma delle potenze delle armoniche:

$$P = \sum_{k=0}^{\infty} P_k$$

Formula di Eulero



$$e^{ix} = \cos x$$

Proprietà del Valore Efficace

$$v(t) = V_0 + \sum_{k=1}^{\infty} V_k \cdot \cos[k\omega t + \Phi_k]$$

$$\omega_k = \frac{2\pi}{T} k$$

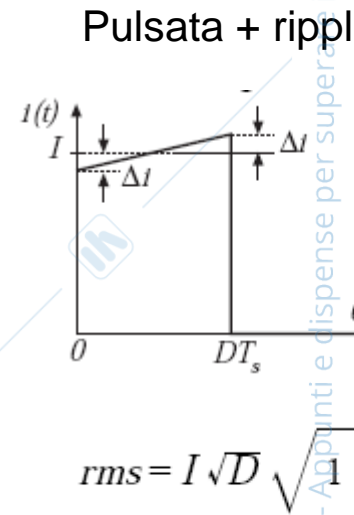
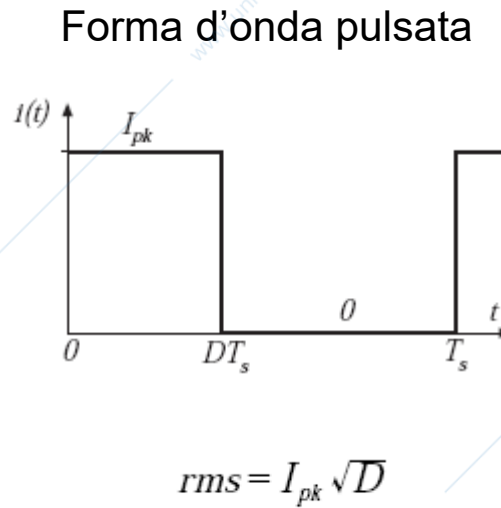
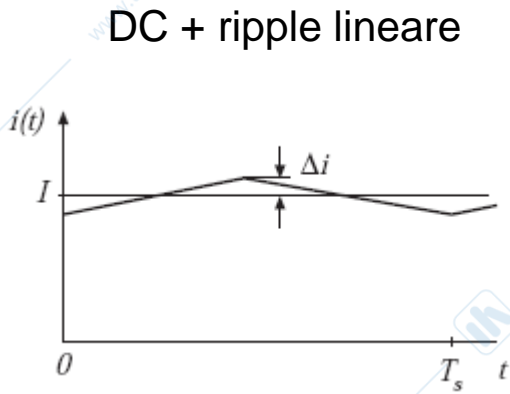
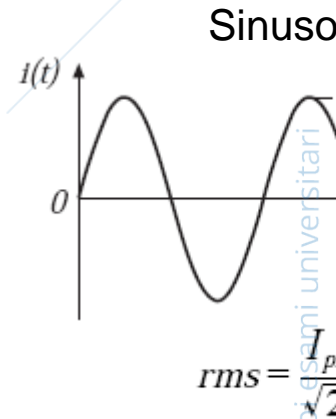
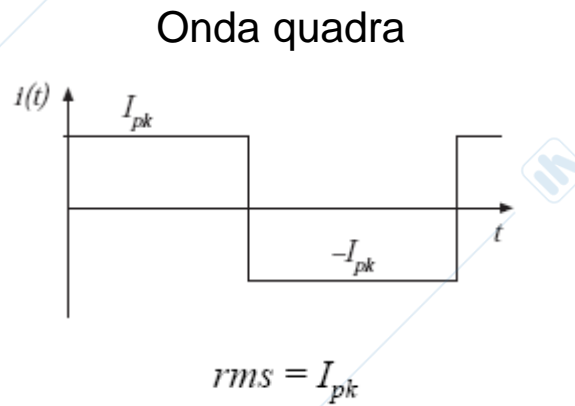
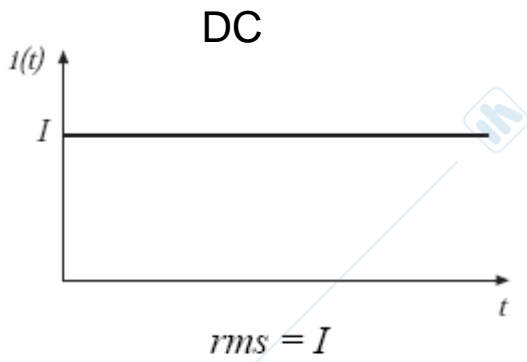
$$V_{RMS}^2 = V_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} V_k^2$$

$$V_{RMS}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T [v(t)]^2 dt = V_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{V_k^2}{2} = \sum_{k=0}^{\infty} V_{kRMS}^2$$

Facendolo l'integrale se ne vanno tutto tutti i termini col coseno con $k \neq 0$ (tra componenti armonici diversi detti prodotti misti)

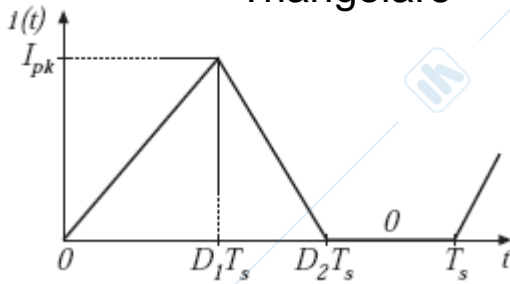
Proprietà importante: posso trattare il segnale armonica per armonica (valori efficaci delle singole armoniche)

Valori RMS di forme d'onda notevoli



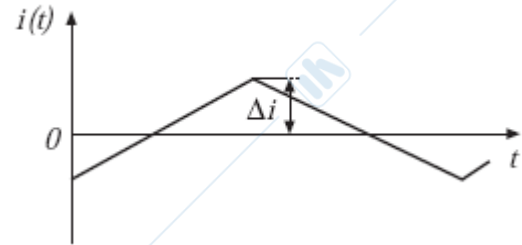
Valori RMS di forme d'onda notevoli

Triangolare



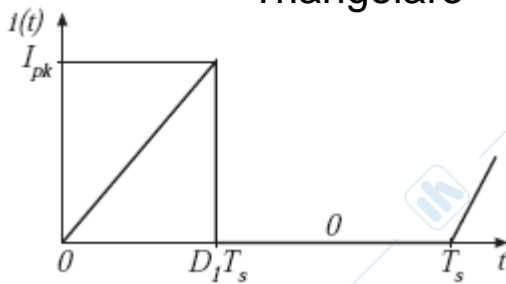
$$rms = I_{pk} \sqrt{\frac{D_1 + D_2}{3}}$$

Triangolare a valor medio nullo



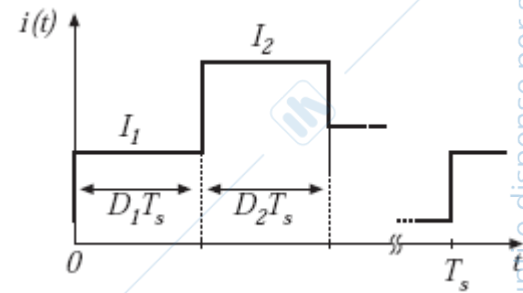
$$rms = \frac{\Delta i}{\sqrt{3}}$$

Triangolare



$$rms = I_{pk} \sqrt{\frac{D_1}{3}}$$

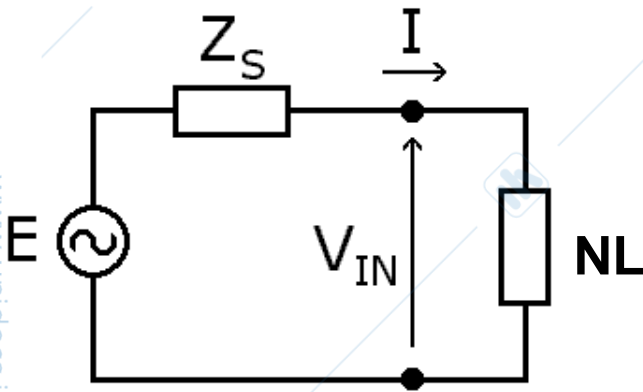
A gradini



$$rms = \sqrt{D_1 I_1^2 + D_2 I_2^2 + \dots}$$

Sorgente di potenza con carico Non lineare

Carico NL è distorto e genera armoniche di corrente
(distorsione della corrente di linea)



$$i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_k \cos[k\omega t - \phi_k]$$

$$v(t) = V_0 + \sum_{k=1}^{\infty} V_k \cdot \cos[k\omega t + \phi_k]$$

$$P_{app} = V_{RMS} I_{RMS} = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} V_{kRMS}^2} \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} I_{hRMS}^2} = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} V_k^2 I_k^2}$$

$$P_{ass} = V_0 I_0 + \operatorname{Re} \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2} \bar{V}_k \bar{I}_k^* \right\} = V_0 I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2} V_k I_k \cos(\phi_k)$$

$$= \operatorname{Re}[\bar{S}] = \operatorname{Re}[\bar{V}_{RMS} \cdot \bar{I}_{RMS}^*]$$

$$P_{erogata} = \frac{1}{2} E I_1 \cos(\phi_1) \quad \text{attiva}$$

$$P_{Diss} = R_S \cdot I_{RMS}^2$$

$$P_{Imp}^{MAX} = E_{RMS} \cdot I_{RMS}^{MAX}$$

Potenza dissipata sulla resistenza di sorgente
Massima potenza impegnabile (disponibile alla sorgente)

Le sorgenti sono limitate in corrente

Importante: facendo il calcolo della potenza attiva si annullano tutti i termini incrociati (a frequenze diverse) e quindi calcolo la potenza armonica per armonica e poi sommo

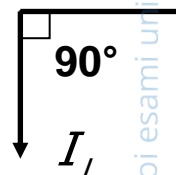
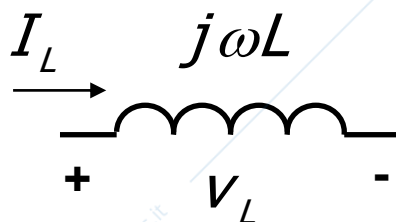
Induttore e condensatore

In regime sinusoidale in un induttore la corrente è in ritardo di 90° rispetto alla tensione, mentre in un condensatore la corrente è in anticipo (precede) rispetto alla tensione

Tensione e corrente sono correlate dalle seguenti relazioni (impedenza)

INDUTTORE

$$I_L = \frac{V_L}{j\omega L} = \left(\frac{V_L}{\omega L} \right) e^{-j\pi/2}$$

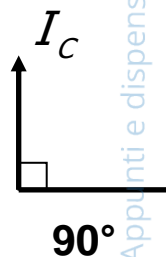
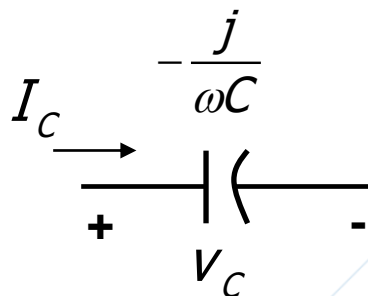


$$Z_L = j\omega L$$

Impedenza induttore

CONDENSATORE

$$I_C = j\omega C V_C = (\omega C V_C) e^{j\pi/2}$$



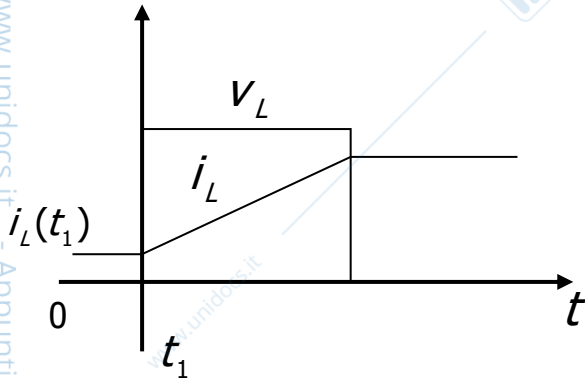
$$Z_C = -\frac{j}{\omega C} \quad Y_C = j\omega C$$

Impedenza (ammettenza) condensatore

Induttore e condensatore

Equazione costitutiva dell'induttore :

$$v_L(t) = L \frac{di_L}{dt} \quad \Longrightarrow \quad i_L(t) = i_L(t_1) + \frac{1}{L} \int_{t_1}^t v_L d\xi \quad \text{per } t > t_1$$



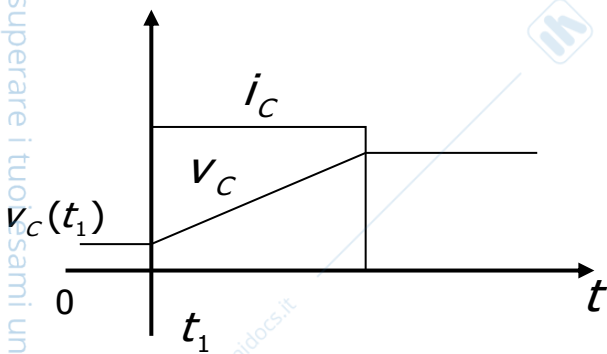
Risposta di un induttore ad un impulso di tensione: la corrente non cambia istantaneamente

L'induttore ritarda la corrente rispetto alla tensione

La corrente di L non può subire variazioni istantanee

Equazione costitutiva del condensatore :

$$i_C(t) = C \frac{dv_C}{dt} \quad \Longrightarrow \quad v_C(t) = v_C(t_1) + \frac{1}{C} \int_{t_1}^t i_C d\xi \quad \text{per } t > t_1$$

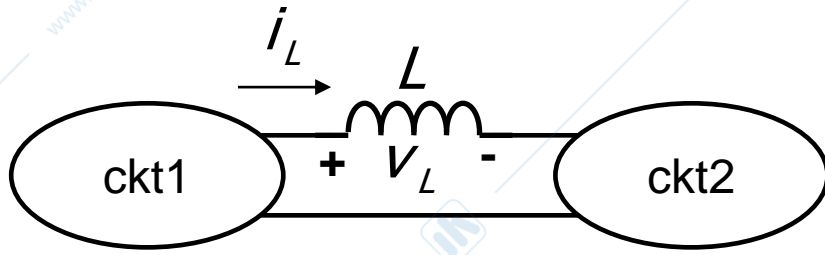


Risposta di un condensatore ad un impulso di corrente: la tensione non cambia istantaneamente

Il condensatore ritarda la tensione rispetto alla corrente

La tensione di C non può subire variazioni istantanee

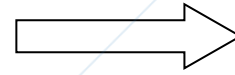
Induttore: valore medio di V_L a regime



A regime (anche in condizioni lineari) deve essere:

$$i(t + T) = i(t) \quad v(t + T) = v(t)$$

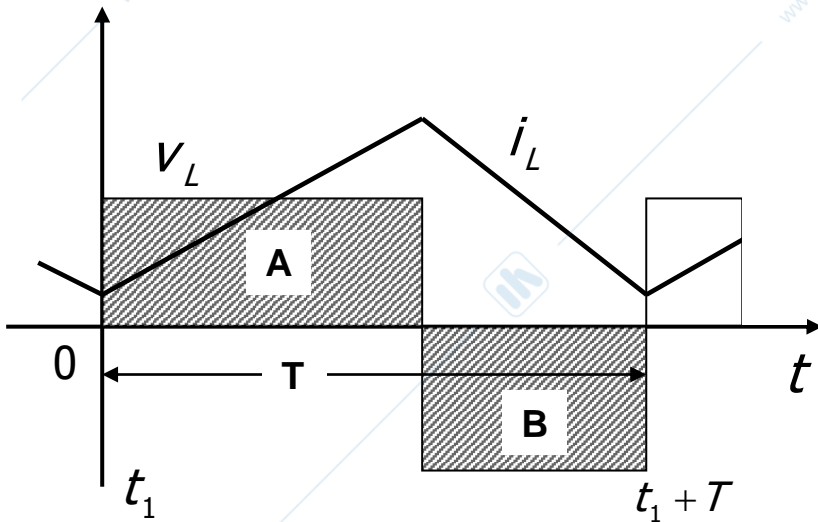
$$i_L(t) = i_L(t_1) + \frac{1}{L} \int_{t_1}^t v_L d\xi \quad \text{per } t > t_1$$



$$\int_{t_1}^{t_1+T} v_L d\xi = 0$$

$$\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} v_L d\xi = 0$$

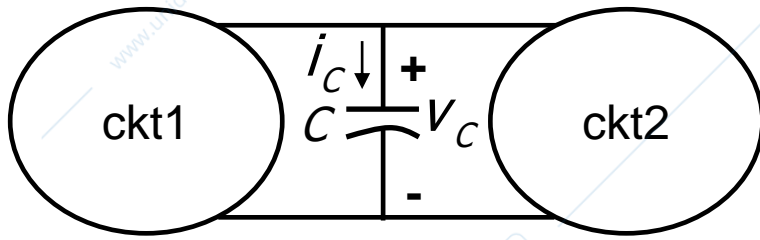
A regime la tensione media su un induttore è nulla



A e B hanno inevitabilmente la stessa area

$$v_L(t) = L \frac{di_L}{dt}$$

Condensatore: valore medio di I_C a regime



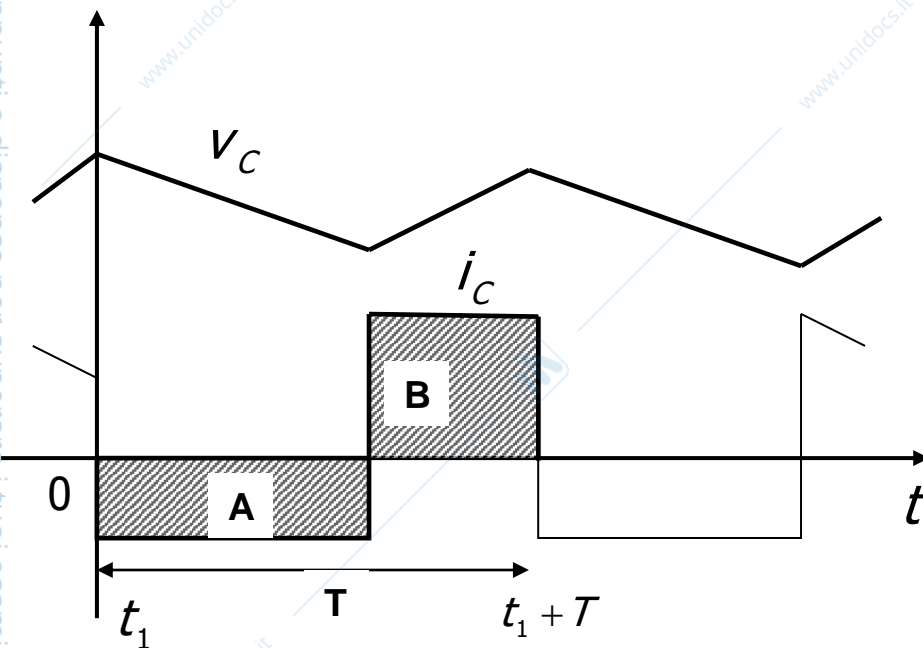
A regime (anche in condizioni lineari) deve essere:

$$i(t + T) = i(t) \quad v(t + T) = v(t)$$

$$v_c(t) = v_c(t_1) + \frac{1}{C} \int_{t_1}^t i_c d\xi \quad \text{per } t > t_1 \quad \Longrightarrow \quad \int_{t_1}^{t_1+T} i_c d\xi = 0$$

$$\Longrightarrow \quad \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} i_c d\xi = 0$$

A regime la corrente media in un condensatore è nulla



A e B hanno inevitabilmente la stessa area

$$i_c(t) = C \frac{dv_c}{dt}$$

Induttore e condensatore

- L e C sono elementi reattivi, ovvero non dissipativi
- Siccome corrente e tensione sono sempre in quadratura tra di loro, la potenza attiva è sempre nulla (non dissipativi)
- Sono dei serbatoi di energia per i circuiti di potenza
- Sono componenti che accumulano energia puramente reattiva e la rilasciano (in un funzionamento a regime)
- In un periodo completo di regime periodico tutta l'energia accumulata (rispetto al valore medio nominale) viene anche rilasciata al resto del circuito: potenza dissipata nulla (idealmente, vedi Q factor per le risonanze)

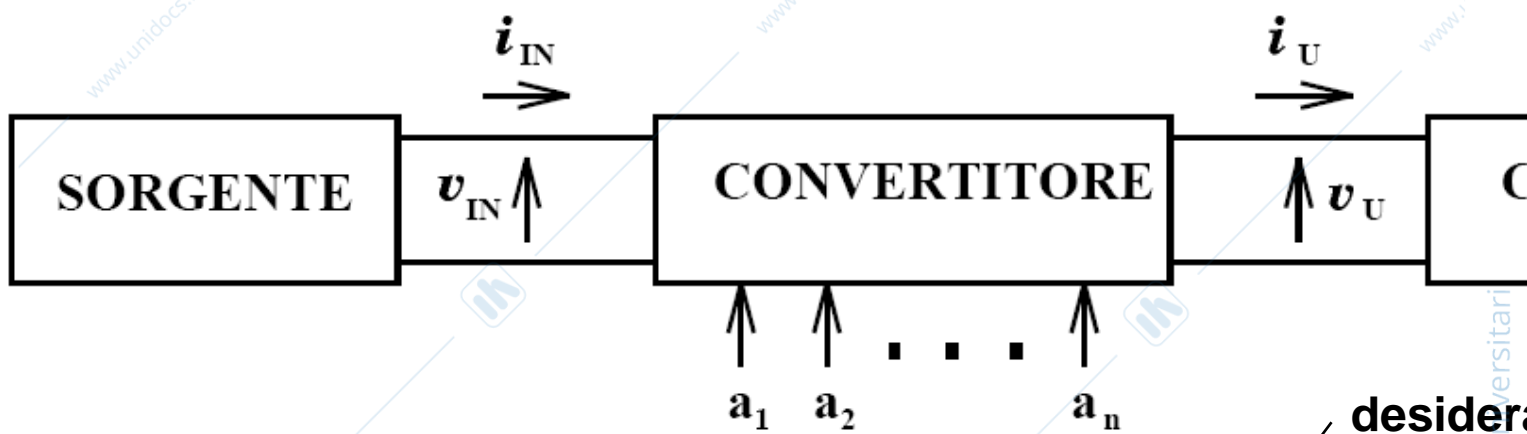
Energia assorbita/accumulata in un condensatore ed in un induttore

$$E_C = \int_{-\infty}^t p(\tau) d\tau = \int_{-\infty}^t v(\tau) C \frac{dv}{d\tau} d\tau = \int_{v(-\infty)=0}^{v(t)} v(\tau) C dv = \frac{1}{2} C v^2(t)$$

$$E_L = \int_{-\infty}^t p(\tau) d\tau = \int_{-\infty}^t i(\tau) L \frac{di}{d\tau} d\tau = \int_{i(-\infty)=0}^{i(t)} L i di = \frac{1}{2} L i^2(t)$$

In un periodo (regime periodico stazionario) il bilancio è nullo

Distorsione



Distorsione istantanea

$$\Delta(t) = v_u(t) - v_u^*(t)$$

Parametro scomodo da quantificare e maneggiare in fase di progetto e caratterizzazione : è funzione del tempo (possiamo eliminare tale dipendenza in regime periodico) e non è normalizzata

Definizione: **COEFFICIENTE DI DISTORSIONE D**

$$D = \frac{\Delta_{\text{RMS}}}{v_{u\text{RMS}}^*} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \Delta^2(t) dt}}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [v_u^*(t)]^2 dt}}$$

Non dipende dal tempo

E' una grandezza normalizzata

Distorsione di uscita

$$v_u(t) = V_{u0} + \sum_{k=1}^{\infty} V_{uk} \cos(\omega_k t + \phi_k) \quad \omega_k = \frac{2\pi}{T} k$$

$$v_{uRMS}^2 = V_{u0}^2 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{V_{uk}^2}{2}$$

Convertitori XX/DC

$$v_u^* = V_{u0}^*$$

Tramite il con
componenti c

FATTORE DI ONDULAZIONE ($V_{u0} = V_u^*$)

$$D^2 = \frac{\Delta_{RMS}^2}{V_{uRMS}^{*2}} = \frac{[V_{u0} - V_u^*]^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} V_{uk}^2}{V_u^{*2}}$$

$$D^2 = \frac{\sum_{k=1}^{\infty} V_{uk}^2 / 2}{V_{u0}^2} = \frac{V_{uaRMS}^2}{V_{u0}^2} = \frac{V_u^2_{RMS}}{V_{u0}^2}$$

$$= \frac{V_{uaRMS}^2}{V_{u0}^2}$$

Rapporto tra il contr
componenti alternat
medio

Distorsione di uscita

$$v_u(t) = V_{u0} + \sum_{k=1}^{\infty} V_{uk} \cos(\omega_k t + \phi_k) \quad \omega_k = \frac{2\pi}{T} k$$

$$v_{uRMS}^2 = V_{u0}^2 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{V_{uk}^2}{2}$$

Convertitori XX/AC

$$v_u^* = V_u^* \cos(\omega_u^* t + \phi_u^*)$$

Supponendo che l'armonica utile sia la prima

DISTORSIONE ARMONICA ($V_{u0} = 0$, $V_u^* = V_{u1}$)

$$D^2 = \frac{\Delta_{RMS}^2}{V_{uRMS}^{*2}} = \frac{\cancel{V_{u0}^2} + \frac{1}{2} [V_{u1} - V_u^*]^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=2}^{\infty} V_{uk}^2}{V_u^{*2} / 2}$$

filtraggio

$$D^2 = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} V_{uk}^2 / 2}{V_{u1}^2 / 2} = \frac{V_{uRMS}^2}{V_{u1}^2}$$

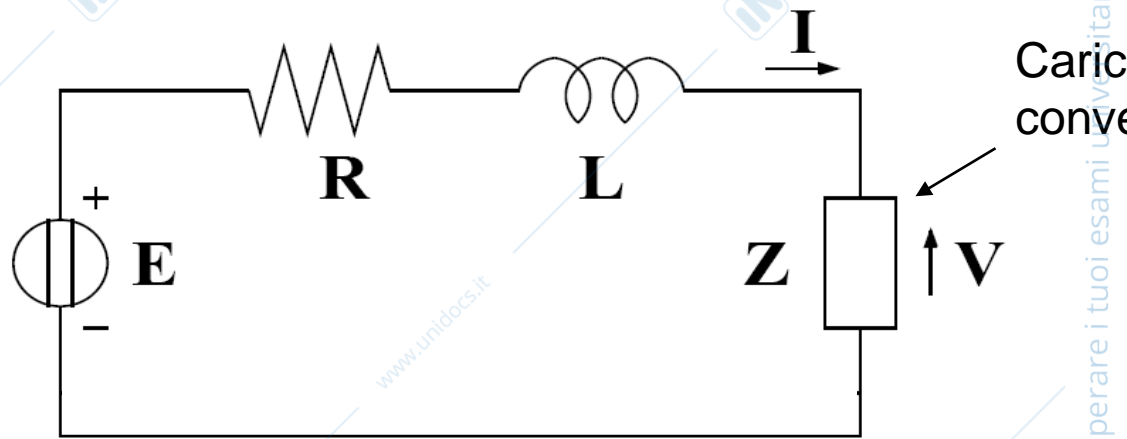
La componente continua

Distorsione in Ingresso

Problema di rilievo: inquinamento della sorgente di potenza (energia)

Sorgente: generatore di tensione ideale / sorgente reale: impedenza di

SORGENTE CON CARICO LINEARE



Impedenza di sorgente $Z_S = R + j\omega L$

Per ogni frequenza (componente spettrale) vale: $V(\omega) = \frac{Z}{Z + Z_S} E(\omega)$

Ovvero se: $E(\omega) = 0 \implies V(\omega) = 0, I(\omega) = 0$

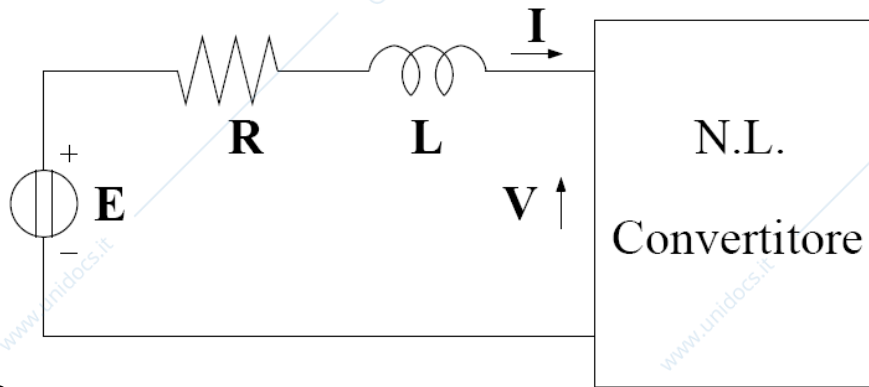
Ho componenti spettrali solo a frequenze per cui la sorgente ha valore non

Quindi se la sorgente è pura, non ho distorsione di ingresso

Distorsione in Ingresso

- Problema: il convertitore è di solito (non sempre, es. convertitori lineari o serie) un circuito non lineare, quindi un carico non lineare

SORGENTE CON CARICO NON LINEARE



I e V non sono più legati da una relazione lineare (impedenza)

$$V(\omega) = E(\omega) - I(\omega)Z_S$$

Per una data ω :

$$Z_S = R + j\omega L$$

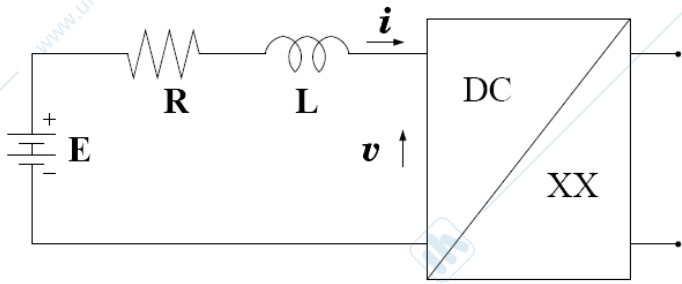
Anche se : $E(\omega) = 0$ Posso avere $V(\omega) \neq 0$, $I(\omega) \neq 0$

La non linearità del bipolo di carico fa nascere componenti spettrali a frequenze diverse da quella della sorgente

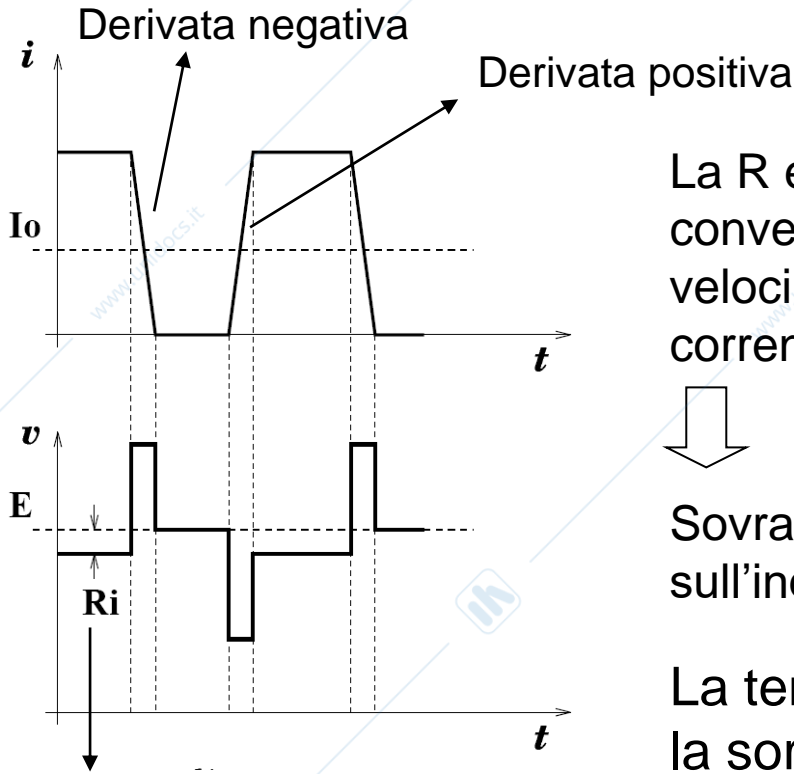
EFFETTI

- **Inquinamento della sorgente** (altri utenti)
- **Maggiore dissipazione sulla linea** (cattivo sfruttamento)

Esempio DC/XX distorsione in ing



Forma d'onda generica della corrente assorbita dalla linea da un convertitore con funzionamento fortemente non lineare (carico non lineare per la sorgente)



$$v = E - Ri - L \frac{di}{dt}$$

La R e la L della linea sono piccole, ma il convertitore è realizzato con dispositivi veloci e funziona in regime switching, la corrente assorbita quasi istantanea



Sovratensioni dovute ai picchi di caduta di tensione sull'induttanza in commutazione

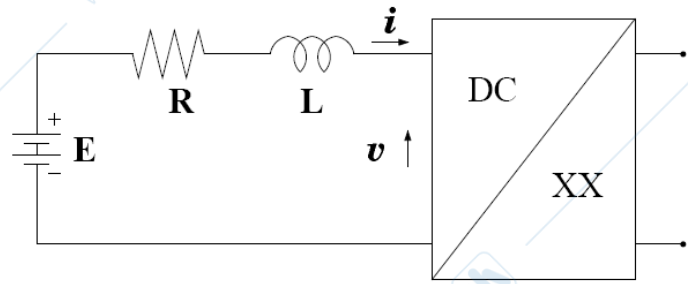
La tensione di linea v è tutt'altro che costante, la sorgente è sporcata anche per gli

In continua non ho caduta sull'induttore

INQUINAMENTO DI SORGENTE

Esempio DC/XX distorsione in ingr

distorsione dovuta alla non linearità di funzionamento del convertitore



$$i(t) = I_0 + i_a(t) \quad (I_0 \text{ termine utile})$$

Potenza attiva erogata dalla sorgente

$$\longrightarrow P_E = \frac{1}{T} \int_0^T E i dt = EI_0$$

La compon
valor medi

Potenza attiva che entra nel convertitore (ceduta al carico)

$$\longrightarrow P_{IN} = P_E - P_R = \frac{1}{T} \int_0^T v i dt$$

Dissipazio
dovuta all

Potenza dissipata sulla resistenza di linea

$$\longrightarrow P_R = RI_0^2 + \frac{R}{2} \sum_{k=1}^{\infty} I_k^2$$

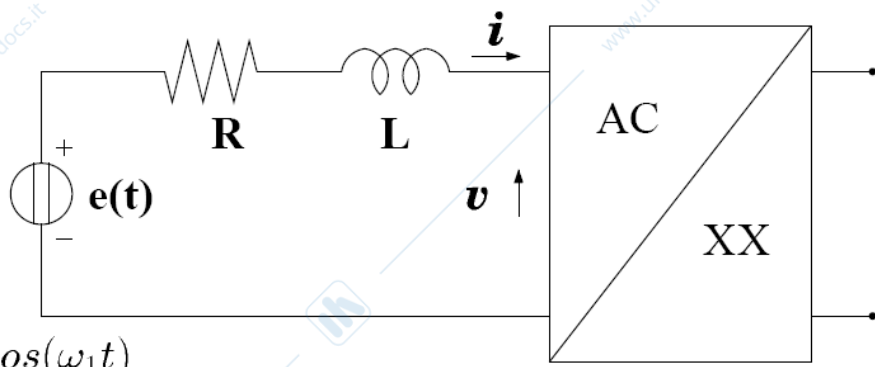
$$RI_{RMS}^2$$

$$D_{IN}^2 = \frac{\sum_{k=1}^{\infty} I_k^2 / 2}{I_0^2}$$

Distorsione di ingresso:

- Sfrutto male la potenza disponibile dalla sorgente
- Componenti spurie inquinano la sorgente per tutti

Esempio AC/XX distorsione in ingresso



Φ_1 sfasamento tra la
armonica di tensione
armonica di corrente

$$e(t) = E \cos(\omega_1 t)$$

$$i(t) = I_0 + I_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1) + \sum_{k=2}^{\infty} I_k \cos(k\omega_1 t + \phi_k)$$

$I_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1)$ termine utile

$$P_E = \frac{1}{T} \int_0^T e i dt = \frac{E I_1}{2} \cos \phi_1 \rightarrow$$

Potenza attiva erogata dalla sorgente

$$P_{IN} = P_E - P_R = \frac{1}{T} \int_0^T v i dt$$

A parità di P_E posso variare (progettando il convertitore) I_1 e $\cos \Phi_1$ (uno cresce l'altro diminuisce)

$$P_R = \frac{R}{2} I_1^2 + R I_0^2 + \frac{R}{2} \sum_{k=2}^{\infty} I_k^2 \rightarrow$$

Si può minimizzare facendo grande I_1 e $\cos \Phi_1 = 1$ mantengo in fase tensione e corrente

Dissipazione aggiuntiva dovuta alle spurie

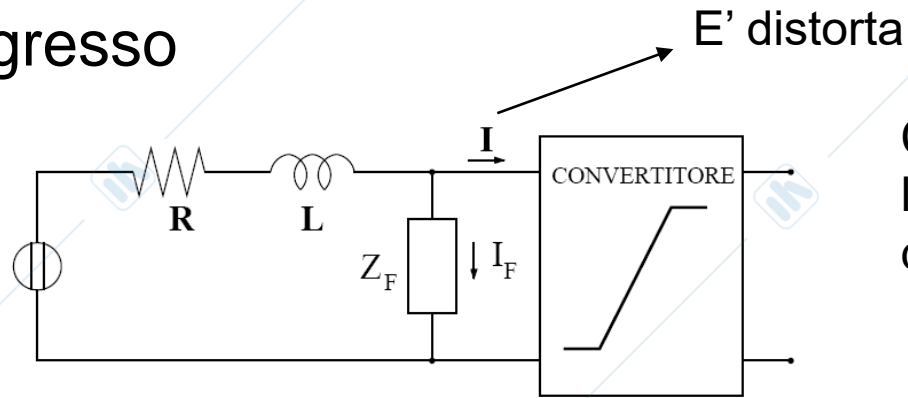
$$D_{IN}^2 = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2 / 2 + I_0^2}{I_1^2 / 2}$$

DISTORSIONE INGRESSO

OSSEVAZIONE: anche v non è puramente sinusoidale come la sorgente

Riduzione distorsione ingresso

- Utilizzo un convertitore meno distorcente
- Filtro in ingresso



Con Z_F cercare le componenti di distorsione

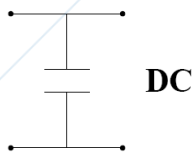
$\hat{\omega}$ = "spurie" ω_{IN} = "utile"

$|Z_F(\hat{\omega})| \ll |Z_S(\hat{\omega})|$ Idealmente CC alle spurie

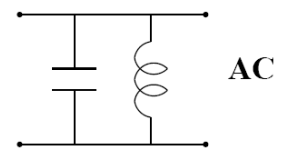
$|Z_F(\omega_{IN})| \gg |Z_S(\omega_{IN})|$ Idealmente CA alla componente utile

Esempio (concettuale, in realtà i filtri sono più complessi)

Alimentazione DC: capacità (assorbe le componenti AC)



Alimentazione AC: bipolo serie (antirisonante a ω_{IN})



Distorsione in ingresso: Fattore di potenza

- E' una misura del cattivo/buono sfruttamento della sorgente

$$\alpha = \frac{P_{IN}}{V_{RMS}I_{RMS}}$$

PF: Power Factor

Rapporto tra **potenza attiva** in ingresso e **potenza apparente**

$V_{RMS}I_{RMS}$ potenza apparente \longrightarrow

L'apparato deve essere dimensionato per (e deve essere in grado di) **soportare** questi valori di potenza (e di correnti sui dispositivi), anche se non riesco a sfruttarla tutta

Il costo delle apparecchiature elettriche cresce al crescere della potenza

Devo quindi cercare di sfruttare al meglio tutta la potenza apparente del generatore, ovvero devo massimizzare il PF

Il PF tiene conto sia delle **dissipazioni** dovute alle **spurie** indesiderate, sia delle **perdite** dovute al fatto che la tensione e la corrente **non sono in fase** (cos'è, ovvero dovute alla **non-linearità ed effetti reattivi**)

La condizione ideale è il carico **RESISTIVO LINEARE**

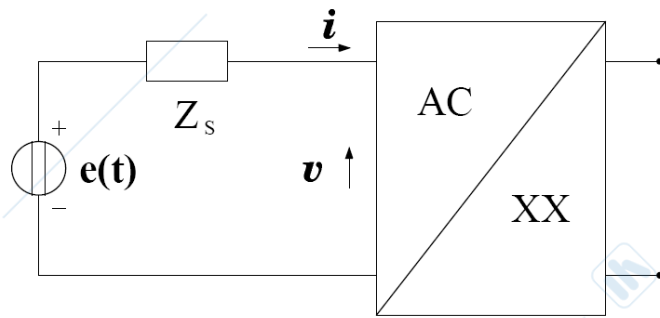
$$P_{IN} = V_{RMS}I_{RMS} \quad \Rightarrow \quad PF = 1$$

L'ente che fornisce l'energia richiede un determinato PF minimo: se non lo hai sulla linea e non lo pago

$$0 \leq \alpha \leq 1 \quad (\alpha < 0 \text{ se } P_{IN} < 0)$$

(in realtà può essere anche < 0)

Fattore di potenza: sorgente AC (ret)



Sorgente di buona qualità: ovvero impedenza della linea Z_s piccola
 suppongo che la potenza dissipata sulla linea sia trascurabile

$$v(t) \simeq e(t), P_{IN} = P_E - P_R \simeq P_E$$

$$P_E = \frac{1}{T} \int_0^T e i dt$$

Nelle ipotesi fatte, ovvero PF elevati, ovvero $P_{IN} \approx P_E$

$$\alpha = \frac{P_{IN}}{V_{RMS} I_{RMS}} \simeq \frac{E_{RMS} \frac{I_1}{\sqrt{2}} \cos \phi_1}{V_{RMS} I_{RMS}} = \frac{\frac{I_1}{\sqrt{2}} \cos \phi_1}{\sqrt{I_0^2 + \frac{I_1^2}{2} + \frac{1}{2} \sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}$$

Per avere PF
 avere $\cos \phi = 1$
 resistivo

Se il carico è lineare non ho generazione armonica (v e i sono sinusoidali)

$$\alpha = \cos \phi_1 \quad \text{Displacement Factor : fattore di sfasamento}$$

Tiene conto delle perdite di potenza dovute agli effetti reattivi che sfasano

Fattore di potenza

- La sorgente ha una massima potenza erogabile che prende il nome di potenza disponibile
- La potenza disponibile dipende dalla tensione della sorgente e dalla massima corrente erogabile (la sorgente reale è sempre limitata)

$$P_{DISP} = V_{RMS} I_{RMS}^{lim} \geq V_{RMS} I_{RMS} = P_{APP} = \frac{P_{IN}}{\alpha}$$



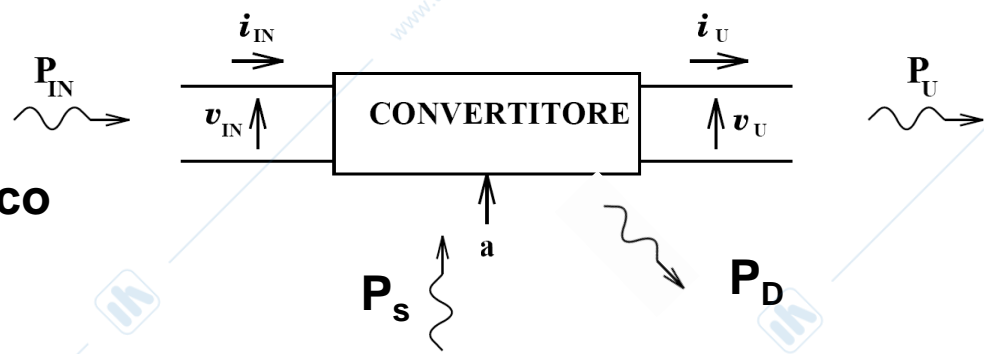
$$P_{IN} \leq \alpha P_{DISP}$$

Essendo $\alpha < 1$, a parità di P_{IN} devo avere tanta più potenza disponibile quanto più basso è il PF

Vincolo ENEL PF > 0.95

Lavorare con bassi PF, significa non solo dissipare (sprecare) potenza sulla linea e sporcare la sorgente per gli altri utenti, ma anche di sovradimensionare gli impianti

RENDIMENTO



Bilancio energetico

$$P_{IN} + P_S = P_U + P_D$$

Funzionamento come amplificatore a grandi segnali: la potenza di uscita al carico è rilevante

Problemi di natura energetica: convertitore elettronico (controllato) di energia prelevata dalla sorgente di alimentazione, in potenza utile da fornire al carico di tensioni e correnti con ampiezze ed andamenti temporali determinati dal controllo (se controllato)

Necessità di impiegare in modo ottimale la potenza di sorgente:

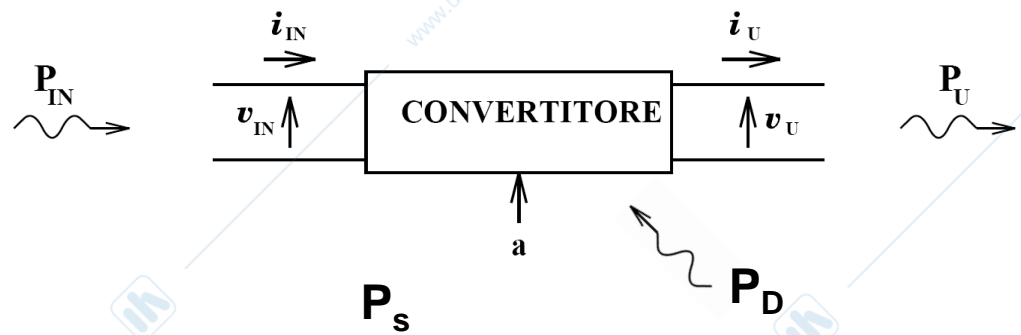
- Per ottimizzarne lo sfruttamento (costi)
- Per limitare i fenomeni di riscaldamento dovuti alla dissipazione di calore
- Parametro fondamentale: RENDIMENTO

$$\eta = \frac{P_U}{P_{IN} + P_S} \approx \frac{P_U}{P_{IN}}$$

P: valori medi delle potenze

$$P_D = P_U - P_U \eta$$

RENDIMENTO



$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{P_D}{P_U}}$$

$$\eta^{min} = \frac{1}{1 + \frac{P_D^{max}}{P_U}}$$

$$P_{IN} = \frac{1}{T_{IN}} \int_0^{T_{IN}} v_{IN} i_{IN} dt$$

$$P_U = \frac{1}{T_U} \int_0^{T_U} v_U i_U dt$$

$$P_D = P_{IN} - P_U \text{ (potenza dissipata)}$$

La differenza tra i valori medi delle potenze entranti e quelle uscenti dal convertitore/amplificatore rappresenta per motivi di bilancio energetico la potenza media dissipata sul dispositivo sotto forma di calore (effetto Joule)

E' necessario lavorare con rendimenti molto elevati (prossimi a 1)

$$P_D = P_U \frac{1-\eta}{\eta} \rightarrow \text{Il rendimento è tanto più importante quanto più sono le potenze in gioco}$$

RENDIMENTO

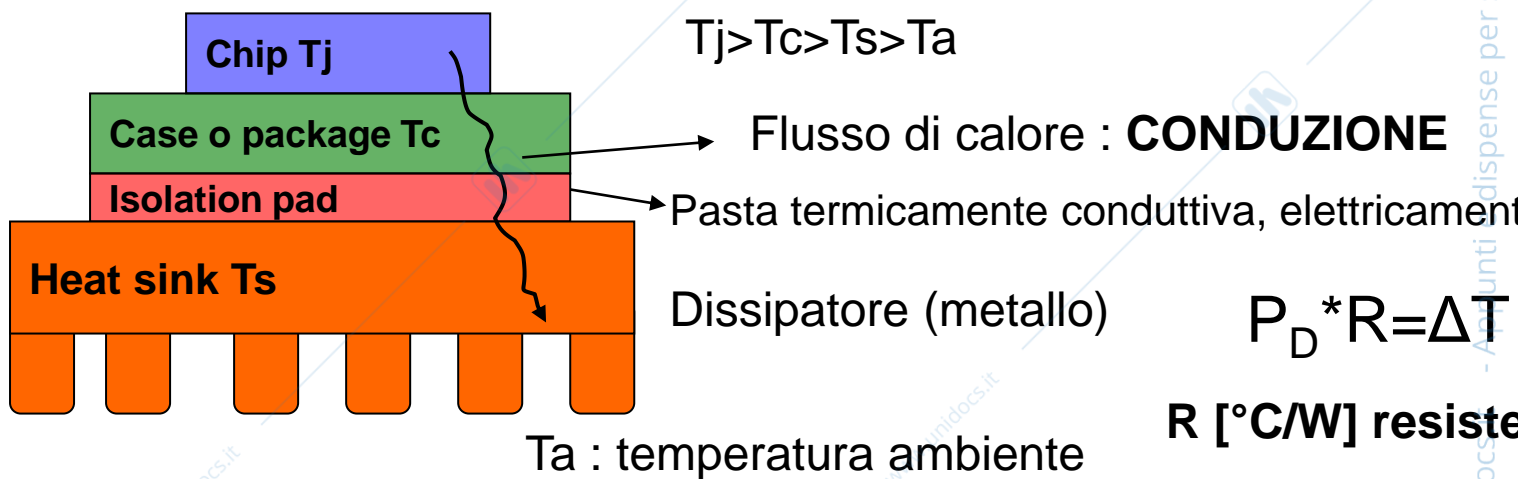
$$P_D = P_U \frac{1-\eta}{\eta}$$

Se diminuisce il rendimento, aumenta la potenza dissipata, e aumenta la **temperatura di funzionamento** dei dispositivi elettronici

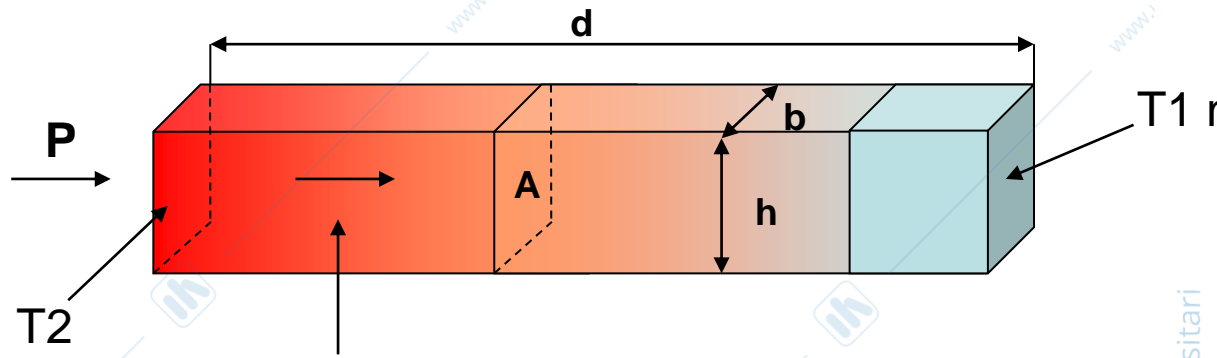
L'aumento della temperatura dei dispositivi elettronici oltre a provocare variazioni delle prestazioni, aumenta la probabilità di guasto, ovvero diminuisce la **vita media del componente** e quindi dell'apparato

Data una temperatura massima di funzionamento del componente, ed una potenza dissipata, è necessario progettare e dimensionare un opportuno **dissipatore** per favorire lo scambio termico dal componente verso l'esterno

A parità di temperatura di funzionamento se dissipo più potenza devo aumentare l'efficienza di scambio termico, ovvero diminuire la **resistenza termica**



Resistenza termica



Flusso di calore per conduzione (P_D)

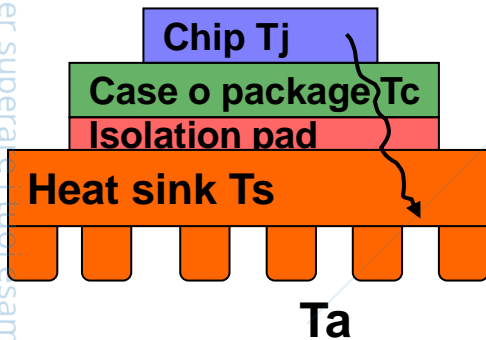
$$P_D = (T_2 - T_1) \lambda \frac{A}{d} = (T_2 - T_1) G = (T_2 - T_1) / R$$

λ Conducibilità termica [$Wm^{-1}C^{-1}$]

G conduttanza termica [W/C]

R resistenza termica [$^{\circ}C/W$]

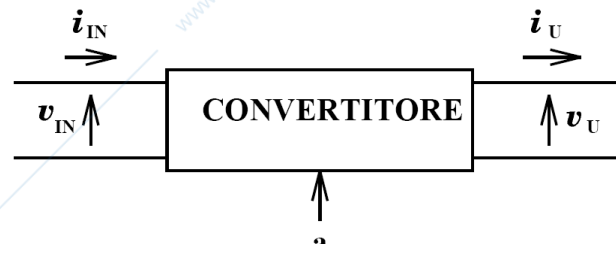
Occorre minimizzare la resistenza termica totale $R_{JA} = R_{JC} + R_{CS} + R_{SA}$



Scambio di calore per **convezione** libera o forzata: dissipatore e l'aria (ventola) o un altro fluido (liquido)

NB: Tutto questo vale in condizioni di equilibrio termico: in condizioni dinamiche è necessario considerare l'impedenza termica (capacità termica)

Altri Parametri : guadagno



$$v_U = v_U(a, v_{IN}, i_U, \theta)$$

$$\Delta v_U = \frac{\partial v_U}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial v_U}{\partial v_{IN}} \Delta v_{IN} + \frac{\partial v_U}{\partial i_u} \Delta i_u + \frac{\partial v_U}{\partial \theta} \Delta \theta$$

$$G = \frac{\partial v_u}{\partial a} \quad \text{Guadagno (Banda)}$$

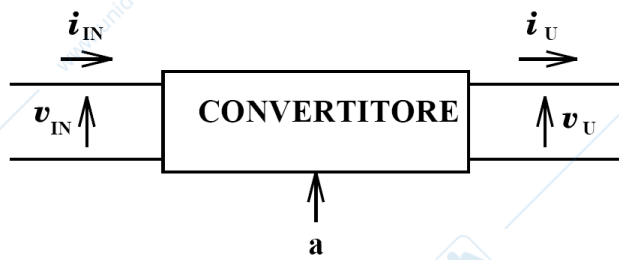
Considero il mio convertitore come un amplificatore di potenza che amplifica un segnale a basso livello di controllo in un segnale di potenza in uscita (senza l'energia fornita dalla alimentazione, che non dovrebbe variare)

Normalmente si cerca di **massimizzare il guadagno**

La banda (di frequenza) dell'amplificatore è un indice di quanto il sistema riesce a rispondere alle variazioni del controllo: cerco di massimizzarla.

Purtroppo banda elevata con guadagno elevato sono due specifiche in conflitto (stabilità)

Altri Parametri



$$v_U = v_U(a, v_{IN}, i_U, \theta)$$

$$\Delta v_U = \frac{\partial v_U}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial v_U}{\partial v_{IN}} \Delta v_{IN} + \frac{\partial v_U}{\partial i_u} \Delta i_u$$

$$F = \frac{\partial v_u}{\partial v_{in}}$$

Regolazione:

variazioni dell'uscita a fronte di variazioni della sorgente di

Cerco di minimizzarla

$$\frac{1}{F}$$

Reiezione all'alimentazione: devo massimizzarla

$$\frac{\partial v_U}{\partial i_u} = -R_U$$

Resistenza di uscita (equivalente): cerco di minimizzarla
avvicinarmi ad una condizione di generatore ideale di t
($R_u=0$, riesco a pilotare allo stesso modo qualunque ca

$$\frac{\partial v_U}{\partial \theta} = K$$

Coefficiente di temperatura: dipendenza dell'uscita dal
variazioni di temperatura : da minimizzare

NOTA: con un controllo in retroazione del convertitore riesco a migliorare i
parametri a spese di una diminuzione del guadagno. E' più difficile miglio