



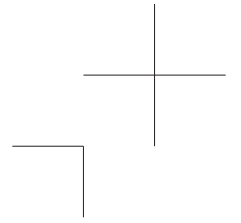
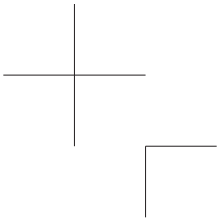
PROF. PAOLO GUGLIELMI

# APPUNTI DI ELETTRONICA INDUSTRIALE - PART I

Appunti del corso

**CLUT**





a Franco

Classe L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X: `clut.cls`

©2021 C.L.U.T. Editrice  
Proprietà letteraria riservata  
Stampato in Italia da XXX YYY, zzz, Torino, TO Italia  
Copyright C.L.U.T. - Torino - 2021

Edizioni C.L.U.T. - Torino  
Corso Duca degli Abruzzi, 24 - 10129 Torino  
Tel. (+39) 011 564 79 80 – Fax (+39) 011 54 21 92

I diritti di elaborazione, di traduzione, di memorizzazione anche digitale, su supporti di qualsiasi tipo, di riproduzione e di adattamento totale o parziale con qualsiasi mezzo (compresi i microfilm e le copie fotostatiche) sono riservati per tutti i paesi.

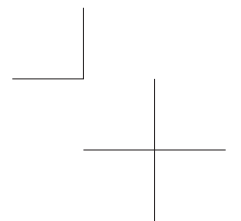
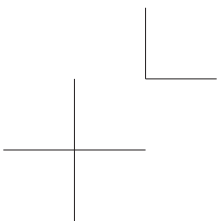
Fotocopie per uso personale (cioè privato ed individuale) nei limiti del 15% di ciascun volume possono essere effettuate negli esercizi che aderiscono all'accordo SIAE.—SNS e CNA Confartigianato, CASA, Confcommercio del 18 Dicembre 2000, dietro pagamento del compenso previsto in tale accordo, conformemente alla legge n. 633 del 23.04.1941.

Per riproduzioni ad uso non personale l'editore potrà concedere a pagamento l'autorizzazione a riprodurre un numero di pagine non superiore al 15% delle pagine del presente volume.

Le richieste per tale tipo di riproduzione vanno inoltrate esclusivamente all'indirizzo dell'Editore.

La messa a punto di un libro è un'operazione complessa ed articolata, che necessita di studi e progettualità grafica, nonché di numerosi controlli di testo, immagine, stili grafici e di stampa. È praticamente impossibile pubblicare un libro scevro da errori.

La CLUT ringrazia sin d'ora i lettori che vorranno segnalare all'indirizzo dell'Editore eventuali errori riscontrati nella lettura del libro.





## Presentazione

L'energia elettrica è attualmente il metodo più economico, pratico, efficiente e versatile di “spostare” energia in piccole, grandi e grandissime quantità.

Lo “spostamento” avviene generalmente tra una *Sorgente* ed un *Utilizzatore* con tecniche di trasmissione diverse. Sempre più spesso l'elettronica di potenza entra in questo meccanismo, più sovente a livello di utilizzatore e generatore, con minor impatto nella trasmissione. Il compito dell'elettronica di potenza è sempre quello realizzare una conversione dell'energia elettrica in forme diverse a seconda delle necessità della trasmissione se dal lato della generazione, oppure dell'utente.

Le *Sorgenti* di energia elettrica possono essere catalogate in modi diversi. In funzione della **Forma** della Corrente (Tensione) si parla di alimentazione AC (*Alternate Current*) o DC (*Direct Current*). Al differire della **Funzione** possiamo parlare di *Generazione* o *Distribuzione*.

Possiamo quindi inquadrare ogni *Sorgente* di energia elettrica in una combinazione di **Funzione** e **Forma**. Questo ci permetterà di confrontare le diverse tecniche a disposizione dell'elettronica di potenza per fornire un adeguato sistema di conversione tra *Sorgente* e *Utilizzatore* laddove necessario.

Tra le principali sorgenti di energia elettrica

- ▷ AC-Rete di distribuzione in bassa/media/alta e altissima tensione
- ▷ AC-generazione distribuita locale in isola
- ▷ AC-Generatori eolici, idroelettrici ed affini
- ▷ DC-Batterie
- ▷ DC-Pannelli fotovoltaici
- ▷ DC-Celle a Combustibile (Fuel-Cells)

Anche gli *Utilizzatori* possono essere inquadrati nello stesso identico modo per quello che riguarda la **Forma**. Una classificazione per **Funzione** dell'utilizzatore invece risulta decisamente ardua ma una veloce panoramica può aiutare a capire la vastità delle applicazioni possibili.

- ▷ Trazione: treni, metropolitane, navi, autoveicoli, carrelli elevatori

- ▷ Riscaldamento: domestico, industriale, fusione, saldatura, tempra, ...
- ▷ Alimentazione in continua: motori ed elettronica
- ▷ Trasmissione di potenza in continua
- ▷ Laser
- ▷ Filtri Attivi e Passivi
- ▷ Generazione
- ▷ Scaricatori
- ▷ Avviatori
- ▷ Alimentatori dei convertitori per azionamenti di qualsiasi tipo, domestici, industriali
- ▷ Movimentatori in genere

Una classificazione delle strutture per la conversione statica dell'energia elettrica può quindi essere posta come correlazione tra le diverse **Forme Sorgente/Utilizzatore**

- ▷ AC/DC da Sorgenti in Alternata ad utilizzatori in Continua
- ▷ DC/DC da Sorgenti in Continua a utilizzatori in Continua tipicamente a valori di tensione e corrente diversi
- ▷ DC/AC da Sorgenti in Continua a Utilizzatori in Alternata
- ▷ AC/AC Da Sorgenti in Alternata a Utilizzatori in Alternata

Una diversa classificazione vede invece le Strutture per la conversione statica dell'energia elettrica divise in:

- ▷ VSI *Voltage Source Inverter*
- ▷ CSI *Current Source Inverter*

dove con il termine *Inverter* si intende il *Convertitore* Statico (talvolta anche detto *Converter*), volendo evidenziare la natura della sorgente che fornisce l'energia al convertitore ovvero se può essere maggiormente assimilata ad un generatore di tensione o ad un generatore di corrente.

Come ben noto la maggior parte della distribuzione di energia elettrica viene effettuata in tensione per la particolare semplicità con cui un generatore di tensione è in grado di **non** fornire energia, se non richiesto, senza per questo dover dissipare energia.

I convertitori si possono ancora distinguere in funzione di

- ▷ Potenza *Reversibili* o *Irreversibili* in base alla capacità che ha la struttura di conversione di permettere lo scambio di **potenza** in una sola direzione (Sorgente→Utilizzatore o Utilizzatore→Sorgente) oppure in entrambe (Sorgente↔Utilizzatore)
- ▷ Tensione: *Bipolari* o *Unipolari* a seconda della loro capacità di generare **tensioni** con polarità diverse in uscita
- ▷ Corrente: *Bidirezionali* o *Unidirezionali* a seconda della capacità di erogare *corrente* con uno o due versi

Ne consegue quasi immediatamente che un convertitore Bipolare-Unidirezionale è anche Reversibile così come lo è un convertitore Unipolare-Bidirezionale.

Un'ultima distinzione è quella che separa i convertitori in *diretti* ed *indiretti* a-riore seconda della **connessione diretta** o meno tra l'ingresso e l'uscita. Ovvero manifestano la presenza di un **isolamento galvanico** tra ingresso e uscita.

Un'ultima distinzione, che sarà più chiara alla fine di questa dissertazione, è quella che associa alcune strutture della conversione statica alle diverse potenze di dimensionamento della struttura stessa. In questo ambito si possono individuare tre livelli di potenza, non nettamente delineati, entro i quali le strutture e le tecniche di conversione dell'energia sono simili.

- ▷ Potenza  $\simeq 1$  kW
- ▷  $1 \text{ kW} < \text{Potenza} < 500 \text{ kW}$
- ▷ Potenza  $> 500 \text{ kW}$

Altre distinzioni sono possibili e verranno proposte nel seguito.

Infine un elenco delle categorie di componentistica che è la base costitutiva dell'elettronica di potenza di questo periodo tecnologico:

- ▷ Semiconduttori: Diodi e componenti attivi
- ▷ Componenti Reattivi: R L C
- ▷ Cablaggi e connessioni
- ▷ Protettori e Sensori
- ▷ Circuiti di controllo e attuazione della regolazione

La conoscenza delle caratteristiche correlate di tutti questi elementi insieme alla conoscenza delle caratteristiche di Sorgenti e Utilizzatori (alla luce della diverse normative) sono gli elementi indispensabili per un progetto di dettaglio nella conversione statica dell'energia elettrica.

### **Limiti**

I limiti di un componente, la sua affidabilità e la sua durata sono concetti chiave nelle applicazioni dell'elettronica di potenza. Una parte sostanziale dell'analisi delle strutture di conversione è proprio quella di definirne i limiti di funzionamento tramite la definizione delle **sollecitazioni** a cui tutti i componenti di PE sono sottoposti. Noti i limiti intrinseci dei componenti e le sollecitazioni è possibile scegliere o progettare il componente o la struttura.

I principali limiti sono delle seguenti nature:

- ▷ Medi: **Termici** sia positivi ( $k \cdot 100^\circ\text{C}$ ) sia negativi ( $-k \cdot 10^\circ\text{C}$ )
- ▷ Istantanei: di tensione e quindi **Dielettrici**
- ▷ Istantanei: di corrente e quindi di **densità di corrente**
- ▷ Emissione: legati alle **derivate** di tensione e corrente.
- ▷ Altri: meccanici (vibrazioni sforzi elettromeccanici ecc.)

Il vincolo della temperatura rappresenta attualmente il vincolo di maggior sviluppo e di maggiore concentrazione sia nella tecnologia dei componenti sia nella realizzazione di sistemi.

Le caratteristiche di interesse principale nella conversione sono ovviamente collegate alle grandezze elettriche e quindi **tensione** e **corrente**. In realtà il progettista di convertitori o di sistemi di che utilizzano convertitori dovrebbe anzitutto preoccuparsi dell'ambiente circostante. Ambiente non solo inteso come *natura* ma principalmente inteso come combinazione di condizioni termiche e di inquinamento elettromagnetico ammesso.

Una volta realizzato un convertitore di elettronica di potenza, infatti, non genera null'altro nell'ambiente circostante che una determinata erogazione termica ed una quantità altrettanto definita, o definibile, di inquinamento elettromagnetico.

Pertanto la **temperatura** e le condizioni che permettono un adeguato scambio di calore sono da prendere in considerazione.

Il mancato rispetto delle corrette condizioni termiche di un convertitore genera tipicamente la sua distruzione o il suo degrado prestazionale. Un buon progettista dovrebbe sempre prevedere un *derating* termico ed una protezione estrema per il sistema.

Discorso analogo per ciò che riguarda le condizioni di funzionamento del convertitore stesso. Ogni forma di conversione statica dell'energia è, ad oggi, una sequenza di transitori talvolta molto violenti che tendono a generare disturbi elettromagnetici talvolta non ammessi.

Sono infine questi i limiti veri di un convertitore statico di energia elettrica. Nel mondo industriale (e non) queste indicazioni sono contenute nelle principali normative di riferimento che sono moltissime e del tutto indirizzate all'ambiente lavorativo o di applicazione del convertitore: si va dall'industria siderurgica alla medicina ai giochi, ovvero più o meno ogni attività umana dell'era moderna.



# Indice

<b>1</b>	<b>Principi</b>	<b>1</b>
1.1	Cenni storici . . . . .	1
1.2	Il diodo . . . . .	2
1.2.1	Diodi . . . . .	3
1.2.2	Esempio 1 . . . . .	7
1.2.3	Esempio 2 . . . . .	9
1.2.4	Esempio3 . . . . .	10
<b>2</b>	<b>AC-DC non controllata</b>	<b>15</b>
2.1	Conversione AC-DC: strutture semplici . . . . .	15
2.1.1	AC-DC Semionda con diodo di ricircolo . . . . .	18
2.1.2	AC-DC Controfase . . . . .	21
2.1.3	Parallelo e Serie di convertitori: il convertitore a Ponte . . . . .	22
2.1.4	Confronto tra il Controfase e il Ponte: Sollecitazioni . . . . .	24
2.2	Filtri di uscita a confronto . . . . .	31
2.2.1	Filtro RC . . . . .	31
2.2.2	Transitorio in un convertitore AC-DC monofase su carico RC . . . . .	32
2.2.3	Filtro RLC . . . . .	34
2.2.4	Confronto tra filtri . . . . .	38
2.2.5	Fattore di ondulazione per filtro RL . . . . .	39
2.2.6	Fattore di ondulazione per filtro RC . . . . .	40
2.2.7	Fattore di ondulazione per filtro RLC . . . . .	42
2.2.8	Transitori in un filtro RLC . . . . .	44
2.2.9	Equivalentente circuitale di un motore in corrente continua . . . . .	47
2.3	Simulazioni e grafici . . . . .	50
<b>3</b>	<b>Elementi Reattivi</b>	<b>59</b>
3.1	Condensatori e Induttanze: parametri . . . . .	59
3.1.1	Condensatori . . . . .	59
3.1.2	Induttori e Trasformatori . . . . .	66
3.2	Condensatori e Induttanze: progetto . . . . .	68

3.2.1	Condensatori . . . . .	68
3.2.2	Induttori e Trasformatori: strutture e considerazioni costruttive . . . . .	70
<b>4</b>	<b>AC-DC controllata . . . . .</b>	<b>93</b>
4.1	Diodi Controllati SCR . . . . .	93
4.1.1	Caratteristica VI del componente . . . . .	94
4.1.2	Strutture fisiche di tiristori . . . . .	101
4.1.3	Alimentazione del circuito gate-catodo . . . . .	107
4.2	Strutture a SCR monofase . . . . .	117
4.2.1	Tensioni dirette e tensioni inverse . . . . .	120
4.2.2	Perdita di controllo . . . . .	122
4.2.3	Comportamento in corrente pulsata . . . . .	124
4.3	Potenza Attiva, Reattiva, Apparente e Distorcente . . . . .	141
4.3.1	Ponte con SCR semicontrollato . . . . .	145
4.3.2	Ponte con SCR Total-Controllato monofase . . . . .	156
<b>5</b>	<b>AC-DC Trifase . . . . .</b>	<b>165</b>
5.1	Strutture a SCR trifase e multifase . . . . .	165
5.1.1	Convertitore semionda trifase . . . . .	165
5.1.2	Ponte semionda trifase con diodo di circolazione . . . . .	173
5.1.3	Impulsare un semionda Trifase . . . . .	175
5.1.4	Dimensionamento trasformatore trifase per Semionda Trifase . . . . .	177
5.1.5	Ponte trifase total controllato . . . . .	194
5.2	Strutture a SCR: commutazione . . . . .	209
5.2.1	Componenti reali: il recovery . . . . .	213
5.2.2	L'angolo limite . . . . .	215
5.2.3	Perdite di Tensione . . . . .	217
5.2.4	Il diagramma $V_{u,m} - I_{u,m}$ . . . . .	223
<b>A</b>	<b>APP . . . . .</b>	<b>227</b>
A.1	Appendice A: Definizioni . . . . .	227
A.1.1	Valor caratteristici delle forme d'onda periodiche . . . . .	227