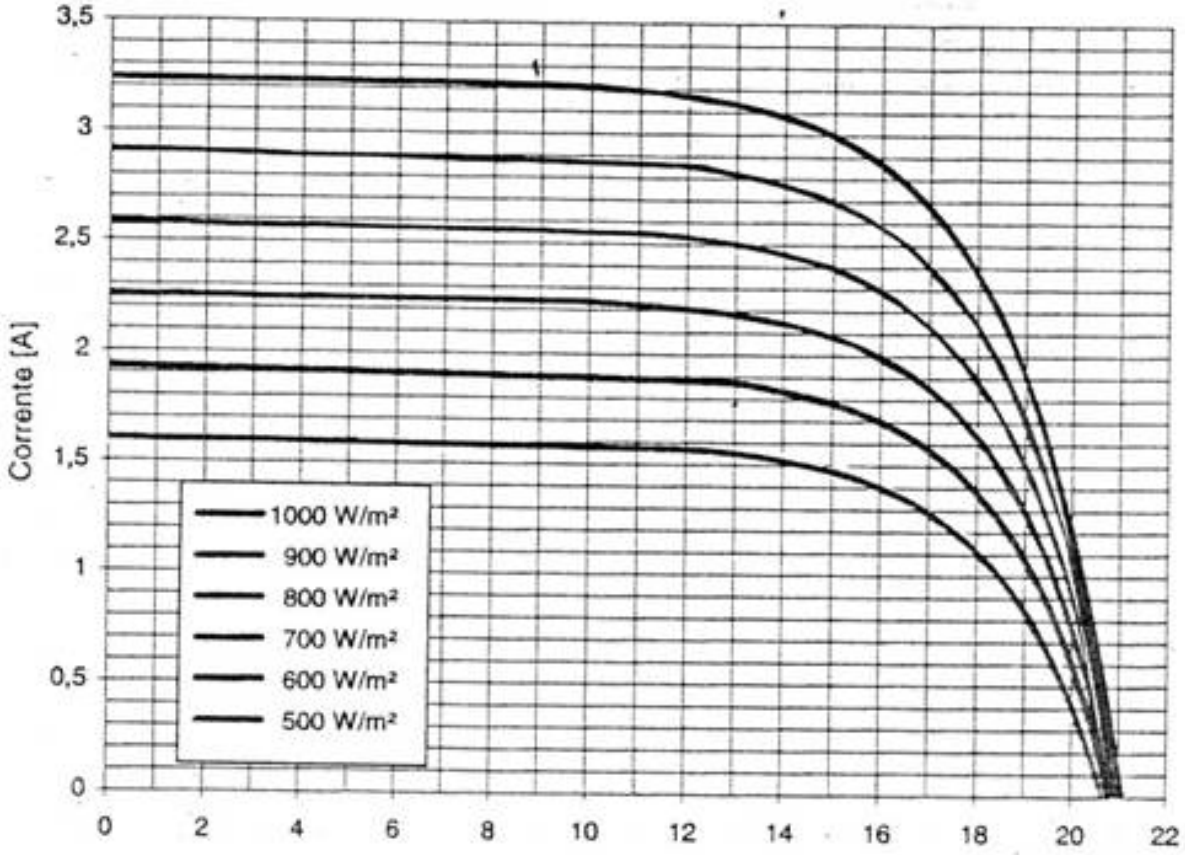


Figura 1.6 – Curva caratteristica I-V di un modulo commerciale da 50 Wp a 40 °C

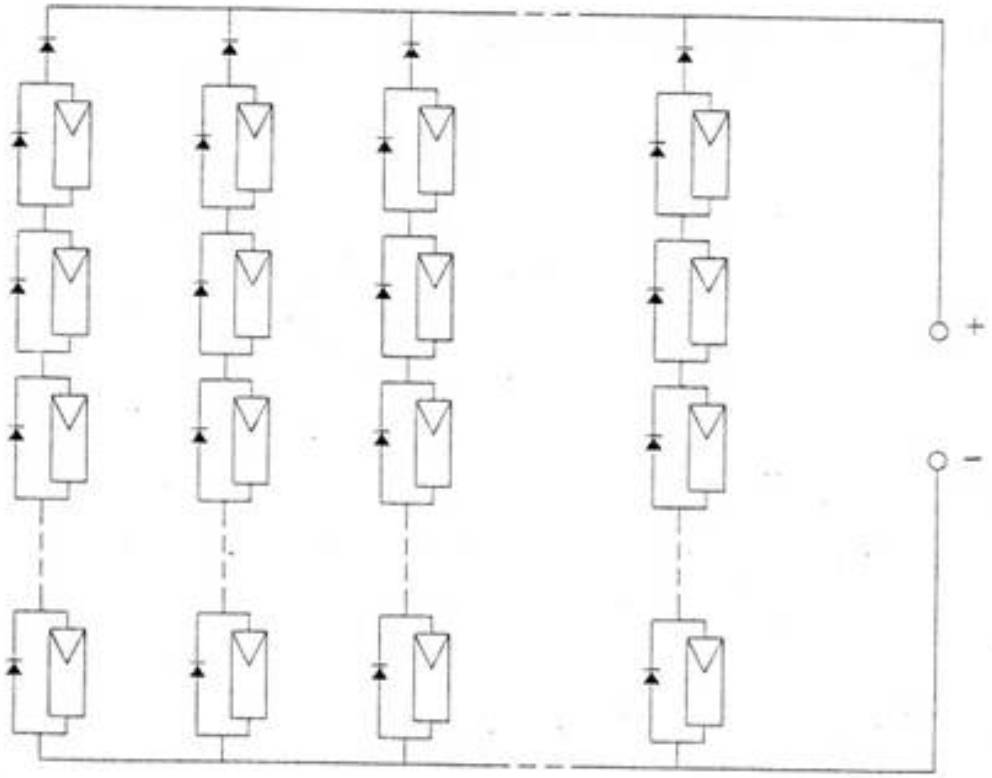


Figura 1.7 – Schema di collegamento di stringhe fotovoltaiche in parallelo

CAPITOLO 4

CONVERTITORI STATICI

4.1 Considerazioni generali

I convertitori statici sono apparecchi elettronici in grado di convertire le grandezze elettriche tensione e corrente di un circuito in valore e/o in forma. Fra le varie tipologie di convertitori statici di potenza, quelli in grado di convertire la corrente continua in corrente alternata vengono, in genere, identificati con la dizione tecnica, di derivazione anglosassone, *inverter*.

Pur basandosi sullo stesso principio di funzionamento degli inverter per applicazioni industriali, principalmente legate all'azionamento di motori elettrici o all'alimentazione di continuità e di emergenza (UPS), gli inverter dedicati alle applicazioni fotovoltaiche presentano caratteristiche e funzionalità proprie, tanto che i costruttori prevedono quasi sempre, per questi ultimi, delle linee di prodotti espressamente dedicate.

Negli impianti collegati alla rete, la tensione continua da convertire in alternata è quella del generatore fotovoltaico mentre, in quelli per servizio isolato, è quella presente al nodo generatore-batteria di accumulatori.

Benché la differenza non sia sempre così netta, si può affermare che, nel caso di applicazioni per servizio isolato, l'uscita del convertitore in corrente alternata è idonea ad alimentare mini-reti composte da sistemi di carichi, mentre, se l'impianto è parallelabile, l'uscita deve essere in grado di immettere

energia in una rete di distribuzione collegata al sistema elettrico nazionale.
Fra le innumerevoli varianti applicative, vi sono inverter che risultano idonei sia al funzionamento in isola che in parallelo alla rete (usati anche quando quest'ultima non offre sufficienti garanzie di continuità e qualità del servizio), oppure che alimentano costantemente carichi isolati attraverso le batterie e, qualora si manifesti un surplus di energia (batterie in stato di massima carica), consentono la cessione alla rete elettrica della quantità in eccesso prodotta dal generatore fotovoltaico o, viceversa, se le batterie raggiungono il minimo consentono alla rete di integrarne la carica.

Commercialmente è possibile acquistare inverter idonei per le applicazioni fotovoltaiche con potenze che partono da un centinaio di watt (moduli AC) per arrivare a decine o, addirittura, centinaia di kilowatt (queste ultime taglie solo per il parallelo alla rete).
Le funzioni svolte dalle principali sezioni in cui è logicamente possibile suddividere un inverter sono riassunte nel seguito.

Maximum Power Point Tracker (MPPT)

Il dispositivo MPPT ha lo scopo di individuare istante per istante quel particolare punto sulla caratteristica *I-V* del generatore fotovoltaico per cui risulta massimo il trasferimento di potenza verso il carico posto a valle. Graficamente, il punto di massima potenza, corrisponde al punto di tangenza tra la caratteristica del generatore fotovoltaico per un certo valore della radiazione solare e l'iperbole di equazione $I \cdot V$ = costante corrispondente (fig. 4.1).
Come si è visto, la curva caratteristica *I-V* di una cella fotovoltaica, e quindi di un generatore fotovoltaico, non rimane costante, ma varia istantaneamente al modificarsi delle condizioni di irraggiamento solare e col variare della temperatura: queste continue variazioni provocano il conseguente spostamento del punto di massima potenza del generatore a diversi valori di coppia *I, V*.
Considerazioni pratiche, legate alle innumerevoli possibilità di accoppiamento tra generatore fotovoltaico e inverter, sconsigliano una soluzione analitica del problema, la quale dovrebbe essere basata sulle curve di funzionamento dei moduli fotovoltaici opportunamente memorizzate e sulla loro elaborazione in dipendenza dei valori di irraggiamento e temperatura misurati da opportuni sensori.

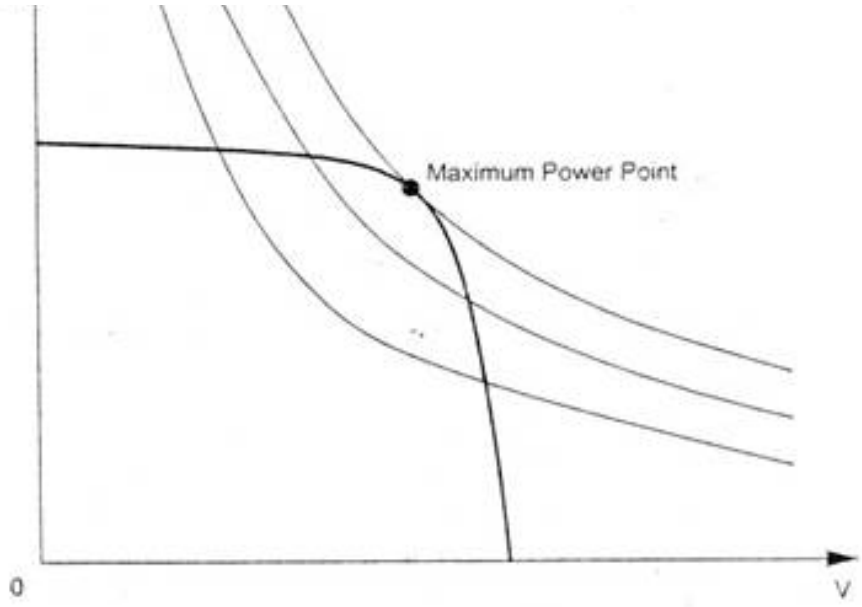


Figura 4.1 – Punto di massima potenza per un generatore fotovoltaico

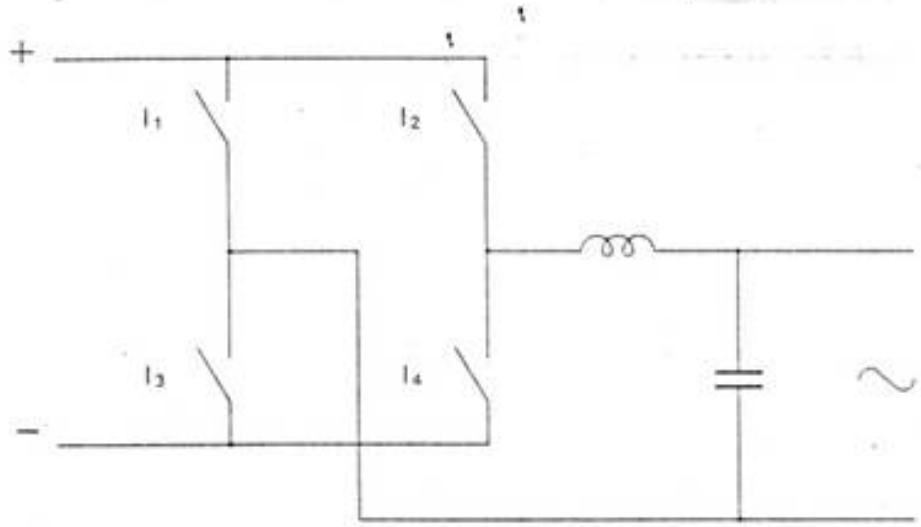


Figura 4.2 – Schema di principio di un ponte di conversione full-bridge

Una delle tecniche utilizzate dai moderni MPPT si basa su metodi che si sono rivelati precisi ed affidabili e che consistono, nella maggioranza dei casi, nell'individuare il punto di massima potenza sulla curva caratteristica del generatore provocando, a intervalli regolari, delle piccole variazioni di carico che si traducono in scostamenti dei valori di tensione e di corrente, valutando poi se il nuovo prodotto $I \cdot V$ è maggiore o minore del precedente.

Se si registra un aumento si continua a procedere allo stesso modo nella direzione considerata fintantoché non si registra una diminuzione, altrimenti si prova con variazioni di carico di segno opposto adottando lo stesso criterio di ricerca.

Ponte di conversione

Il ponte di conversione è il cuore del convertitore e permette di passare dalla corrente continua alla corrente alternata facendo uso di dispositivi semiconduttori pilotati con sequenze di impulsi di comando controllati.
In figura 4.2 è mostrato il principio di funzionamento di un convertitore full-bridge dotato di filtro in uscita in cui i dispositivi di potenza sono schematizzati con interruttori. Chiudendo ed aprendo alternativamente le coppie I_1 - I_4 e I_2 - I_3 si ottiene la conversione da continua in alternata.
La commutazione del ponte può avvenire alla frequenza di rete o a frequenza più elevata. Nel primo caso si ottiene all'uscita un'onda quadra, mentre nel secondo si può cercare di approssimare la forma d'onda ad una sinusoidale con dei treni di impulsi a larghezza variabile (tecnica PWM).
Le caratteristiche del filtro presente all'uscita del ponte dipendono necessariamente dal tipo di ponte di conversione utilizzato, dalla sua modalità di funzionamento e dall'ampiezza massima delle armoniche che si è disposti a tollerare. In generale, operando alla frequenza di lavoro, il contenuto di armoniche risulta essere piuttosto elevato anche a valle della sezione di filtraggio. Un caso particolare riguarda la conversione cc/ca negli impianti di sollevamento acqua di dimensioni medio-grandi: in questi casi, il ponte di

conversione rende disponibile in uscita una tensione ed una frequenza variabili in modo da consentire lo spunto del motore (coassiale alla pompa) anche a bassi valori di irraggiamento.

Trasformatore

Le funzioni svolte dal trasformatore sono essenzialmente due:

– adeguamento del livello di tensione del circuito primario (uscita del ponte di conversione) con il valore richiesto dal carico;

– separazione galvanica tra generazione fotovoltaica e utenza.

Nei casi in cui non sia richiesta la separazione galvanica tra i circuiti a monte e a valle del trasformatore, la presenza di quest'ultimo non è strettamente indispensabile in quanto l'innalzamento o la diminuzione della tensione del

ratore ai valori richiesti dal carico può essere realizzata elettronicamente.
Una soluzione interessante si presenta quando a monte del ponte di conversione principale se ne realizza un altro (cc/ca o cc/cc): il trasformatore può così essere posto tra il primo e il secondo stadio di conversione e lo si può realizzare in modo che lavori in alta frequenza, col vantaggio di ridurne considerevolmente le dimensioni.

Protezione di massima corrente

La protezione di massima corrente, presente all'interno dell'inverter, provvede a sezionare l'uscita dei circuiti di potenza quando viene superata una determinata soglia di corrente. In genere, ogni macchina è dotata anche di un dispositivo di protezione con intervento magnetotermico utilizzato come rincalzo a salvaguardia dell'inverter stesso.
Un caso particolare si presenta in impianti per servizio isolato, in cui la corrente di cortocircuito viene limitata, elettronicamente e per un tempo prestabilito, al valore massimo consentito dal dimensionamento elettrico e termico del ponte di conversione.

Protezioni di interfaccia con la rete elettrica

Gli impianti fotovoltaici che immettono energia in rete devono essere in grado di disconnettersi automaticamente in caso di malfunzionamento di quest'ultima come, ad esempio, quando avviene un'interruzione della fornitura di energia elettrica.
Nella configurazione più semplice, questa funzione è svolta da un dispositivo che interviene qualora la tensione o la frequenza di rete si discostino dai valori nominali.

4.2 Principali caratteristiche costruttive

Benché gli inverter commerciali possano differire tra loro anche notevolmente, lo schema a blocchi del funzionamento presentato nella figura 4.3 relativo ad una tipologia di inverter per servizio isolato e quello di figura 4.4

Figura 4.3 – Schema a blocchi di principio di un inverter per applicazioni stand-alone

per una tipologia parallelabile alla rete, pur con qualche aggiunta o variante, hanno validità generale.

Come si può vedere dalla figura 4.3, gli inverter per applicazioni stand-alone sono costituiti essenzialmente da un ponte di conversione (generalmente con trasformatore a valle) ed un regolatore interno con lo scopo di mantenere costante il valore della tensione (e frequenza) d'uscita per variazioni della tensione di ingresso in un intervallo di valori prefissato.

Allo stadio di conversione fa seguito una sezione di filtraggio delle armoniche e, infine, le protezioni lato carico, generalmente rappresentate da dispositivi in grado di intervenire per massima corrente e/o cortocircuito.

A titolo di esempio, in figura 4.5 è riportato lo schema a blocchi dettagliato di un inverter da 6 kVA utilizzato in applicazioni stand-alone.

Negli inverter parallelabili alla rete è invece sempre presente la funzione MPPT, e la macchina deve poter variare la propria impedenza di ingresso per potere assumere quella ottimale corrispondente al massimo trasferimento di potenza.

Questa funzione viene svolta da un primo ponte di conversione cc/ca o cc/cc comandato dall'unità di controllo.

Per mantenere le condizioni di lavoro del generatore fotovoltaico prossime al punto di massima potenza, è importante che questa prima conversione

Figura 4.4 – Schema a blocchi di principio di un inverter parallelabile alla rete

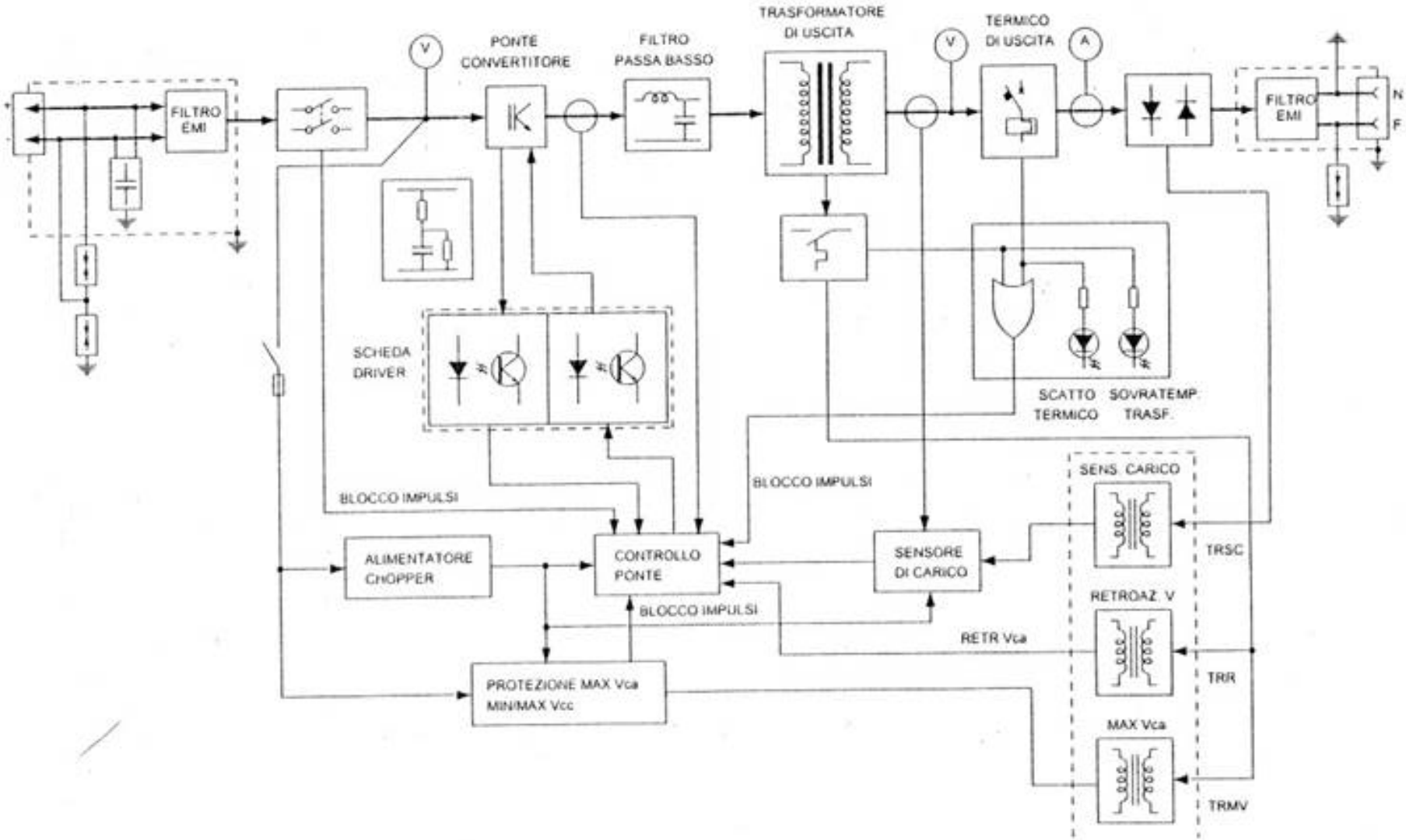


Figura 4.5 – Esempio di schema a blocchi di un inverter monofase di tipo stand-alone

non induca delle eccessive variazioni periodiche nell'assorbimento di corrente (ripple in ingresso): da qui la presenza di una sezione di filtraggio lato continua.
Un secondo ponte di conversione, sincronizzato con la frequenza di rete, provvede successivamente a fornire la potenza di uscita con le caratteristiche di tensione e frequenza richieste. In questo stadio viene realizzata anche la regolazione della tensione di uscita in modo tale che l'inverter sia visto dalla rete come un generatore di corrente.
Il trasformatore, quando presente, può essere interposto tra i due ponti di conversione o all'uscita del secondo, a seconda delle soluzioni circuitali adottate dal costruttore.
Allo stadio di conversione fa seguito una sezione di filtraggio delle armoniche e, infine, le protezioni lato carico costituite, oltre che da un dispositivo di intervento per massima corrente, anche dalle protezioni di interfaccia richieste dal gestore della rete a cui la macchina è collegata.

Circuiti di conversione della potenza

Nella tabella 4.1 sono riportate alcune tipologie classiche di circuiti impiegati per la conversione della potenza: i primi sei risultano idonei per lo stadio di conversione cc/cc, mentre gli ultimi due per lo stadio cc/ca. Le tematiche relative alla conversione della potenza possono essere approfondite facendo riferimento alla bibliografia [Mohan et al. 1989].
Nei circuiti proposti in tabella è sempre presente almeno un dispositivo semiconduttore di controllo della potenza pilotato da una opportuna sequenza di impulsi rettangolari.
Se chiamiamo T_{ON} la durata di un impulso che manda in conduzione il semiconduttore e T_{OFF} il tempo di attesa tra un impulso e l'altro, è possibile definire il *duty-cycle* (D) del circuito di comando come:

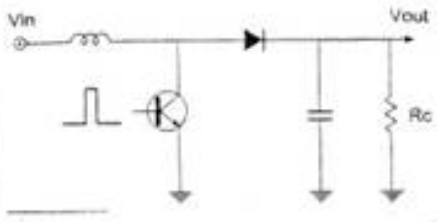
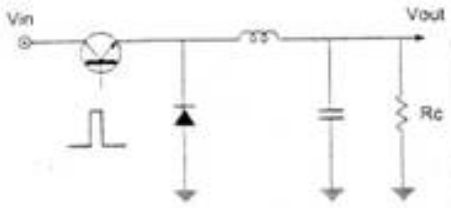
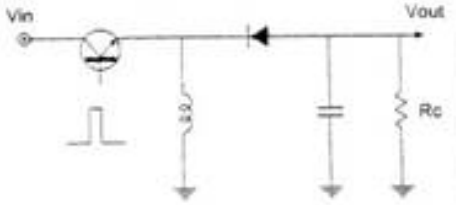
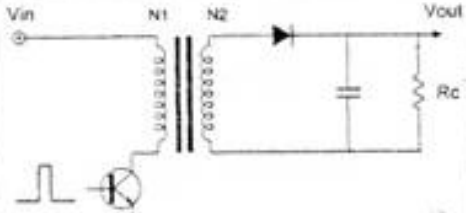
$$D = T_{ON} / (T_{ON}+T_{OFF})$$

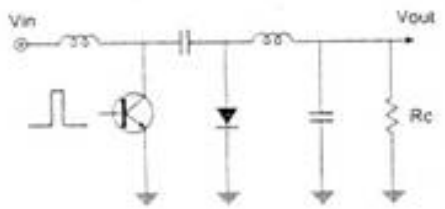
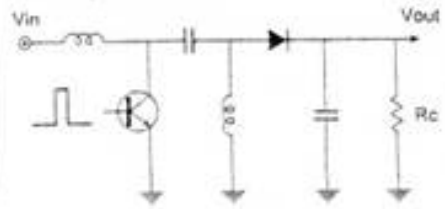
I dispositivi semiconduttori di controllo della potenza, impiegati nei circuiti di conversione, sono, in genere, i seguenti:
- transistor;
- transistor darlington;
- tiristori
- Mosfet
- IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

Nei moderni inverter, i Mosfet e gli IGBT sono, in pratica, i dispositivi di con-

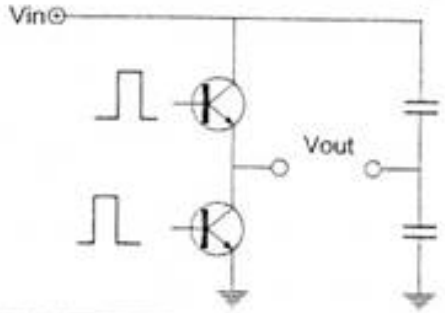
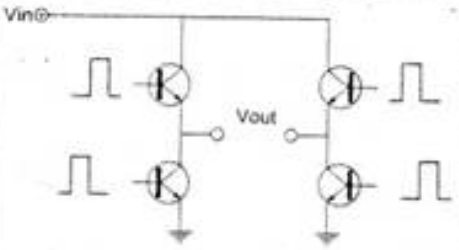
trollo più usati. I tiristori trovano ancora vasta applicazione, soprattutto negli inverter di grande potenza. I relativi circuiti di comando richiedono però qualche accorgimento tecnico in più per assicurare la corretta commutazione dei dispositivi in tutte le condizioni operative.
Negli esempi riportati in tabella 4.1, per semplicità, si utilizza sempre la notazione grafica del transistor bipolare, anche se tale scelta non è da intendersi vincolante.

Tabella 4.1 – Rassegna dei principali circuiti convertitori utilizzati negli inverter

Tipo di convertitore	Principio di funzionamento	Tensione di uscita V_{OUT}	Commenti
Boost (Step-down)		$V_{IN} / (1 - D)$	• La tensione di uscita è sempre più alta di quella di ingresso. • Il circuito presenta un basso valore di ripple all'ingresso.
Buck (Step-up)		$V_{IN} \cdot D$	• La tensione di uscita è sempre più bassa di quella di ingresso. • Può agire da limitatore di corrente.
Buck-boost (Step-up/ down)		$V_{IN} / (1 - D)$	• La tensione di uscita può essere più alta o più bassa di quella in ingresso.
Flyback		$V_{IN} \cdot D / (1 - D)$ [Con N1 = N2]	• La tensione di uscita può essere più alta o più bassa di quella in ingresso.

Cuk (brevettato)		$V_{IN} \cdot D / (1 - D)$	• La tensione di uscita può essere più alta o più bassa di quella in ingresso. • L'uscita ha la polarità invertita rispetto all'ingresso.
SEPIC (brevettato)		$V_{IN} \cdot D / (1 - D)$	• La tensione di uscita può essere più alta o più bassa di quella in ingresso.

(Segue)

Tipo di convertitore	Principio di funzionamento	Tensione di uscita V_{OUT}	Commenti
Half bridge		$V_{IN} \cdot D / 2$ (valore medio della ca)	• Il circuito presenta un basso valore di ripple all'ingresso.
Full bridge		$V_{IN} \cdot D$ (valore medio della ca)	• Il circuito presenta un basso valore di ripple all'ingresso.

Caratteristiche della conversione cc/ca

Vi sono, sostanzialmente, due possibili tipi di funzionamento per questi circuiti: la commutazione alla frequenza di lavoro e il *Pulse Width Modulation* (PWM).
Nel primo caso i dispositivi commutano alla frequenza richiesta a valle del ponte. Nel caso più frequente, costituito della generazione a frequenza di rete, il circuito produce un'onda quadra (con qualche eventuale aggiustamento) alla frequenza di 50 Hz.
In figura 4.6 è visibile la forma d'onda all'uscita del un ponte di conversione: in questo caso, la parzializzazione di ciascuna semionda con una durata di 120° anziché di 180° permette di eliminare la presenza della terza armonica. L'ampiezza delle armoniche di ordine più elevato rispetto alla fondamentale rimane comunque notevole (per esempio, la quinta armonica al 20 % e la settima al 14,3 %).
Nella maggior parte dei casi è pertanto necessario fare ricorso a filtri passa-basso all'uscita del ponte per limitare l'ampiezza delle armoniche e conferire alla forma d'onda un aspetto più simile a quello sinusoidale.
Convertitori con uscita in onda quadra sono di costo contenuto ma non sono adatti ad alimentare correttamente alcuni carichi elettrici sensibili alla presenza di un alto contenuto armonico.
Nel caso del PWM, la commutazione avviene a frequenza più elevata (diverse migliaia di Hz), ottenendo così delle successioni di treni di impulsi la cui singola durata è proporzionale al valore, in quell'istante, della sinusoide che si vuole ottenere (figura 4.7).

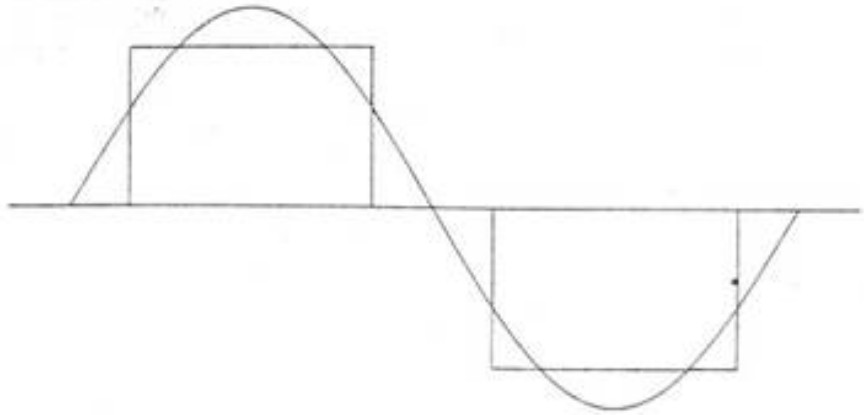


Figura 4.6 – Forma d'onda all'uscita del ponte di conversione con commutazione alla frequenza di lavoro

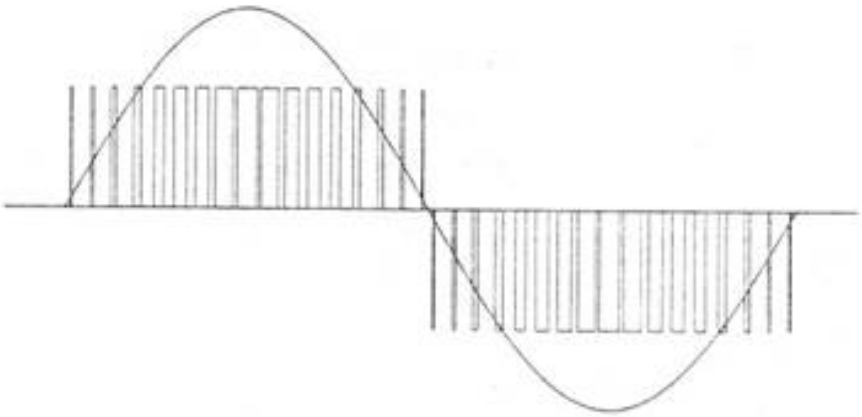


Figura 4.7 – Principio di funzionamento della tecnica PWM

Un filtro passa-basso all'uscita del ponte provvede infine a conferire all'onda prodotta dall'inverter l'aspetto sinusoidale richiesto.
Un altro sistema, però meno utilizzato, per limitare l'ampiezza delle armoniche all'uscita del ponte di conversione consiste nell'approssimare l'onda sinusoidale con una sequenza di gradini di ampiezza variabile (figura 4.8).

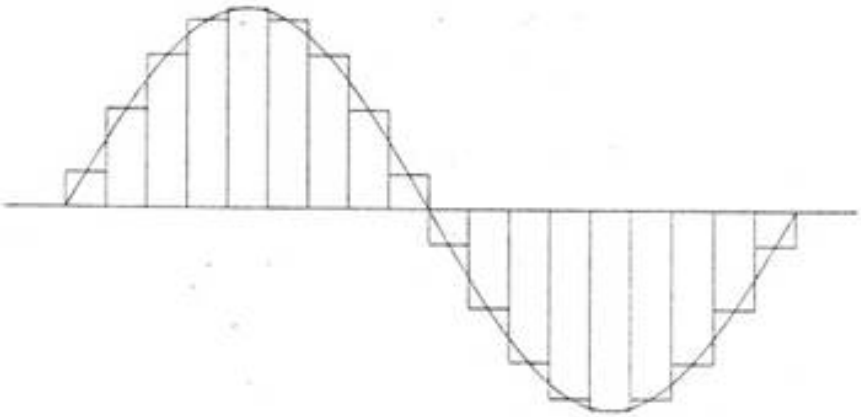


Figura 4.8 – Approssimazione di una sinusoide con un'onda a scalini

file:///C|/WINDOWS/Desktop/doc1.htm (13 di 13) [14/06/2003 09:53:49]