

La conversione della potenza

GLI INVERTER PER IL FOTOVOLTAICO: TIPOLOGIE E MODALITÀ DI INSTALLAZIONE E FUNZIONAMENTO

■ di FRANCESCO GROPPI

Nella categoria dei convertitori statici rientrano tutti i dispositivi di potenza in grado di convertire alcune grandezze elettriche presenti in ingresso (tipicamente tensione e frequenza) in altre disponibili all'uscita.

Se restringiamo il campo alle applicazioni fotovoltaiche, i convertitori statici più utilizzati sono gli inverter, i quali sono in grado di convertire la corrente continua proveniente dal generatore fotovoltaico in corrente alternata.

Pur basandosi sullo stesso principio di funzionamento degli inverter per applicazioni industriali, in genere legati all'azionamento dei motori elettrici oppure nell'alimentazione di continuità o di emergenza (UPS), gli inverter dedicati ad applicazioni fotovoltaiche presentano caratteristiche e funzionalità proprie e tali per cui i costruttori hanno dovuto sviluppare delle linee di prodotti espressamente dedicate.

Gli inverter per il fotovoltaico possono, con qual-

che eccezione, essere suddivisi in due grandi famiglie: inverter per applicazioni isolate o stand-alone e inverter per il funzionamento in parallelo con la rete elettrica, detti anche *grid-connected*.

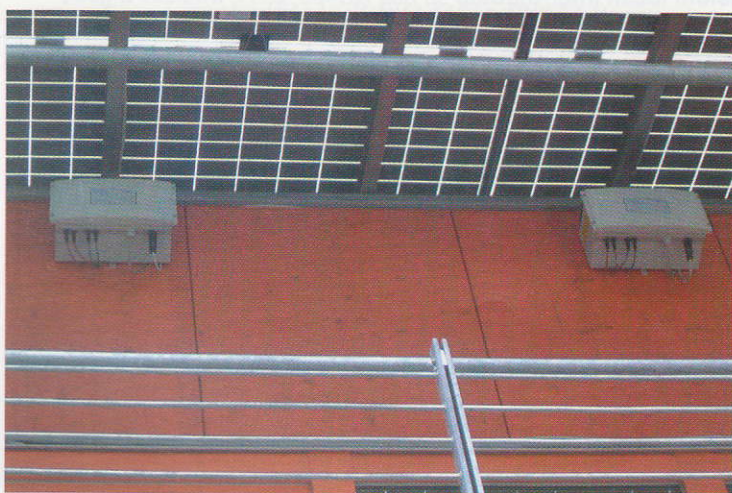
■ INVERTER PER APPLICAZIONI ISOLATE (STAND-ALONE)

Gli inverter per applicazioni isolate hanno la funzione di erogare, entro certi limiti, energia elettrica con caratteristiche simili a quelle della normale rete di distribuzione di bassa tensione. Per questo motivo tali apparati, pur essendo chiamati ad alimentare rete di estensione ridotta, devono disporre delle caratteristiche sufficienti a garantire la necessaria continuità e affidabilità nell'erogazione dell'energia con gli standard qualitativi richiesti.

A questi inverter compete pertanto il mantenimento degli opportuni valori di tensione e frequenza sulle linee di uscita. Devono inoltre tollerare transitorie situazioni di sovraccarico, dovute tipicamente all'avviamento di motori elettrici e fornire energia reattiva ad eventuali carichi non rifasati. Inoltre, il contenuto di armoniche deve essere sufficientemente basso per non creare interferenze con le apparecchiature elettroniche presenti (radio, televisori, computer, ecc.). Va anche detto che normalmente gli inverter per applicazioni isolate non sono dedicati esclusivamente al fotovoltaico, ma trovano applicazione in tutti i casi in cui è richiesta la conversione dell'energia da una sorgente stabile di corrente continua, tipicamente rappresentata da un accumulatore elettrochimico, per l'alimentazione di utenze in corrente alternata.

A tale fine, le case costruttrici offrono a catalogo inverter alimentati tipicamente a 12, 24 o 48

▼ **Figura 1:** Alcuni inverter monofase possono essere posizionati immediatamente al di sotto dei moduli fotovoltaici



V, con potenze che partono da poche centinaia di watt per arrivare a diversi kilowatt. Tali valori di tensione nominali sono comunque da intendersi come valori di riferimento medi, in quanto la tensione di batteria può variare entro un certo intervallo in dipendenza dello stato di carica.

■ INVERTER PER IL FUNZIONAMENTO IN PARALLELO CON LA RETE ELETTRICA (GRID-CONNECTED)

Normalmente, quando ci si riferisce agli inverter fotovoltaici, si intende la categoria di inverter dedicati al servizio in rete in quanto attualmente questi ultimi rappresentano la quasi totalità del mercato. Questi apparati sono concettualmente e funzionalmente differenti dagli inverter per applicazioni isolate e il loro scopo, a differenza di quanto precedentemente visto, consiste nel trasferire in rete tutta l'energia prodotta dal generatore fotovoltaico nel modo più efficiente possibile.

Negli inverter per servizio in parallelo alla rete, i circuiti di ingresso non hanno come riferimento la tensione delle batterie, ora non più necessarie, ma quella del generatore fotovoltaico, il che comporta l'adattamento a variazioni molto più ampie ed inoltre richiede un circuito inseguitore del punto di massima potenza o Maximum Power Point Tracker (MPPT) sulla curva caratteristica I-V del generatore stesso.

Più in dettaglio, la finestra di tensione di ingresso degli inverter per il funzionamento in parallelo alla rete elettrica deve tenere conto dei seguenti fattori:

- tensione nel punto di massima potenza e tensione a vuoto del generatore fotovoltaico in condizioni STC; questi valori sono dipendenti dal tipo e dal numero dei moduli componenti le stringhe;
- diminuzione della tensione in corrispondenza del punto di massima potenza per condizioni di irraggiamento solare inferiori a STC;
- diminuzione della tensione in corrispondenza del punto di massima potenza per aumento della temperatura dei moduli fotovoltaici;
- aumento della tensione a vuoto per bassi valori di temperatura dei moduli fotovoltaici (come al punto precedente).

La combinazione di questi fattori fa sì che il rapporto tra la tensione minima e quella massima di ingresso per gli inverter commerciali sia dell'ordine di 1 : 2, per spingersi in qualche caso a 1 : 3 o verso rapporti ancora maggiori.

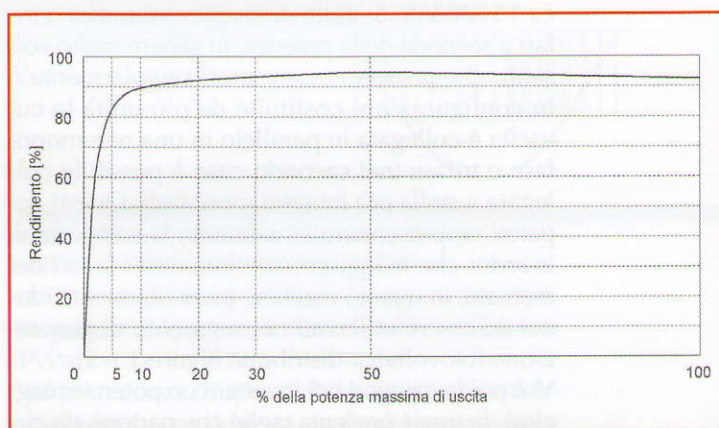
Le tensioni corrispondenti possono essere estremamente variabili: si parte da valori non superiori 50÷100 V per i moduli AC e per gli inverter con sezione cc di tipo SELV, fino a spingersi frequentemente verso tensioni massime di 400÷600 V per i piccoli inverter e 800÷1000 V per i grandi.

Tanto maggiore è la tensione di ingresso, tanto minore è il numero di stringhe di moduli necessarie a ottenere la stessa potenza permettendo, al-



▲ **Figura 2:** Inverter posizionati sul retro delle strutture di sostegno dei moduli fotovoltaici

▼ **Figura 3:** Tipico andamento del rendimento di un inverter in funzione della potenza di uscita, indicata come valore percentuale della potenza massima



lo stesso tempo, di diminuire la sezione e il numero dei cablaggi. Tuttavia, tensioni troppo elevate possono comportare situazioni di pericolo da shock elettrico maggiori (di giorno il generatore fotovoltaico è sempre in tensione, anche se la rete è scollegata) e inoltre è conveniente non avvicinarsi troppo alla tensione massima di isolamento dei moduli fotovoltaici indicata dal costruttore, la quale spesso è compresa tra 600 e 1000 V.

Sempre sul lato ingresso, oltre alla tensione è importante che anche la corrente rispetti certe condizioni. Infatti, mentre negli inverter per servizio isolato sono tollerati andamenti anche fortemente discontinui della corrente perché comunque il sistema di accumulo è in grado di compensare ogni variazione del carico, gli inverter per il servizio in parallelo alla rete devono ridurre al minimo qualsiasi fluttuazione che li porti ad allontanarsi dal punto di massima potenza dell'array. Queste fluttuazioni prendono il nome di *ripple* e, normalmente, si mantengono al di sotto del 10% del valore medio della corrente di ingresso. Valori ancor più bassi di ripple all'ingresso dell'inverter rappresentano tuttavia un significativo fattore di merito. Le differenze tra gli inverter stand-alone e quelli grid-connected non si esauriscono però nella differente configura-

zione lato generazione, in quanto per i secondi i circuiti di uscita devono assolvere un compito differente: infatti tensione e frequenza sono imposti dalla rete, per cui l'inverter deve sincronizzarsi con quest'ultima e comportarsi come un generatore pressoché ideale di corrente alternata. Qualora la rete dovesse venire a mancare, anche solo per brevi periodi, l'inverter deve scollegarsi prontamente al fine di evitare di alimentare i carichi con valori di tensione e frequenza non idonei e generare situazioni di pericolo.

Le potenze commercialmente disponibili per gli inverter per servizio in parallelo alla rete partono da taglie di circa 100 watt, tipiche dei convertitori per moduli AC, i quali spesso possono essere fissati sul retro dei moduli fotovoltaici o inseriti direttamente in una presa elettrica.

Vi è poi una fascia di prodotti la cui potenza di uscita parte da poco meno di 1 kW e arriva a circa 15÷20 kW. Si tratta di inverter monofasi o trifasi a seconda della potenza, in genere molto versatili, che possono essere usati singolarmente o in configurazioni costituite da più unità la cui uscita è collegata in parallelo in una rete monofase o trifase (nel secondo caso è possibile collegare a stella più inverter monofasi). Questi apparati rappresentano attualmente la categoria di inverter che maggiormente incontra i favori del mercato, in quanto risultano particolarmente idonei ad essere utilizzati nel segmento di generazione fotovoltaica distribuita (figure 1 e 2).

Vi è poi la categoria di inverter con potenze maggiori, la quale presenta taglie che partono da circa 20 kW fino ad arrivare a centinaia di kW. Si tratta di macchine trifasi che spesso si presentano esternamente come armadi di tipo industriale.

Per quanto riguarda il rendimento di conversione non si riscontrano sensibili differenze tra gli inverter di grossa taglia con quelli più piccoli. In pratica, il fattore che maggiormente influisce sul rendimento è rappresentato dalla presenza o

meno del trasformatore di isolamento. In figura 3 è mostrata la tipica curva di rendimento di un inverter per servizio in parallelo alla rete in funzione della potenza di uscita, indicata come valore percentuale della potenza massima.

Si può notare che al di sopra del 5÷10 % della potenza massima, il rendimento si stabilizza su valori abbastanza costanti. La curva presenta quindi un massimo nell'intorno del 40÷50 % per poi diminuire leggermente nella parte finale.

I costruttori forniscono il rendimento massimo dell'inverter e il rendimento europeo η_{EURO} . Quest'ultimo è pari alla media pesata dei rendimenti misurati in corrispondenza di differenti valori di potenza: 5%, 10%, 20%, 30%, 50% e 100% della potenza massima. In tal modo si cerca di tenere conto del funzionamento reale del dispositivo in condizioni di carico parziale.

Il rendimento europeo è definito come:

$$\eta_{euro} = 0,03 \cdot \eta_{5\%} + 0,06 \cdot \eta_{10\%} + 0,13 \cdot \eta_{20\%} + 0,10 \cdot \eta_{30\%} + 0,48 \cdot \eta_{50\%} + 0,20 \cdot \eta_{100\%}$$

Un'altra caratteristica di rilievo degli inverter grid-connected riguarda la presenza del trasformatore di isolamento. Quest'ultimo può essere posizionato all'uscita dell'ultimo stadio di conversione (trasformatore a 50 Hz) oppure tra due stadi di conversione interni (trasformatore a 10÷20 kHz). In alcuni inverter poi, il trasformatore non è neanche presente (inverter transformerless).

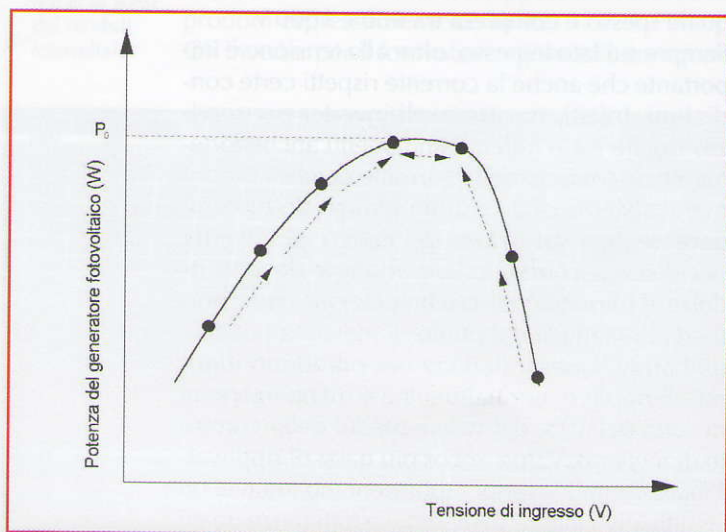
La presenza del trasformatore a 50 Hz esclude la possibilità che una parte, anche minima, di componente continua possa finire in rete, per contro il peso di questi dispositivi è spesso considerevole. Il trasformatore a frequenza maggiore è più piccolo e leggero ma non impedisce che, in caso di guasto del ponte di conversione finale, vi possa essere l'immissione di corrente continua in rete.

L'inverter senza trasformatore è in genere più efficiente, leggero ed economico degli altri due ma va ricordato che in questi apparati non si ha nessuna separazione tra la sezione in corrente continua e quella in corrente alternata. Per contro, i vantaggi anzidetti, tra cui in particolare il rendimento elettrico particolarmente interessante, fanno sì che gli inverter senza trasformatore siano praticamente sempre presenti qualora la normativa non ne impedisca l'utilizzo.

■ FUNZIONE MPPT

Spesso la ricerca del punto di massima potenza del generatore fotovoltaico (MPPT) viene effettuata per tentativi mediante piccoli spostamenti, a intervalli ravvicinati, del punto di lavoro sulla curva caratteristica I-V (figura 4).

Il metodo di ricerca del punto di massima potenza per successivi tentativi, illustrato in figura 4, è denominato P&O (Perturb and Observe). Si tratta del metodo più diffuso, pur con diverse varianti, soprattutto nell'algoritmo di ricerca, ma non è l'u-



▲ Figura 4: Metodo di ricerca P&O del punto di massima potenza dell'array fotovoltaico

nico. In pratica si è osservato che l'applicazione pura e semplice di un algoritmo P&O poteva dar luogo a notevoli problemi di accuratezza al manifestarsi di ampie variazioni di irraggiamento. Se, ad esempio, mentre l'array fotovoltaico sta producendo una nube va a coprire il sole, anche solo parzialmente, in molti casi l'algoritmo P&O riduce istantaneamente la potenza a zero. Si è osservato che, perché questo fenomeno si verifichi, è sufficiente che la nuova corrente di corto circuito sia inferiore alla precedente corrente nel punto di massima potenza. Per ovviare a questo inconveniente, in molti casi si è ricorsi al metodo CV (Constant Voltage), il quale, imponendo una tensione di lavoro fissa, impedisce alla corrente di portarsi a zero. Tuttavia, l'utilizzo del solo metodo CV non consente una gestione ottimale dell'array, per cui si preferisce utilizzare il metodo CV non da solo ma preferibilmente per "irrobustire" il P&O. Così facendo, l'algoritmo di ricerca periodicamente se si sono verificate variazioni di una certa ampiezza nella curva caratteristica dell'array e, in tal caso, commuta il funzionamento da P&O a CV per poi riportarlo nuovamente a P&O ma a partire dal punto individuato sulla nuova curva. Questi metodi "ibridi", che fanno uso di più algoritmi di ricerca coordinati tra loro, prendono il nome di MP&O, EPP ecc. Un ulteriore metodo di ricerca del punto di massima potenza è denominato IC (Incremental Conductance). Esso si basa sulla constatazione che nel punto di massima potenza la derivata di quest'ultima rispetto alla tensione deve essere uguale a zero, ossia:

$$\frac{dp}{dv} = 0$$

Da qui, con alcuni passaggi si ottiene:

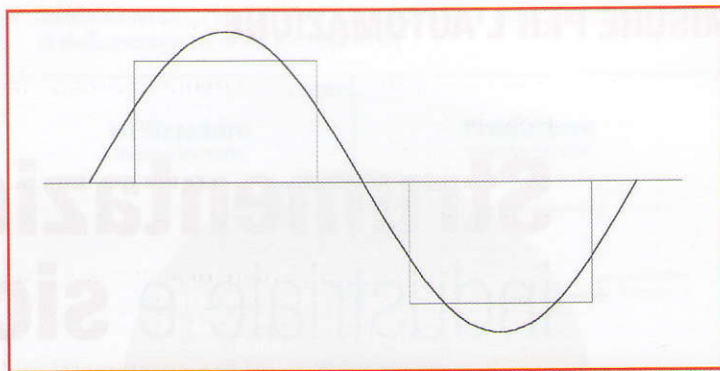
$$\frac{di}{dv} = -\frac{v}{i}$$

Il metodo IC individua con precisione il punto di massima potenza ma può facilmente diventare instabile in caso di perturbazioni della curva caratteristica, per cui spesso necessita di essere "irrobustito" con altri metodi, al pari di quanto avviene per il P&O.

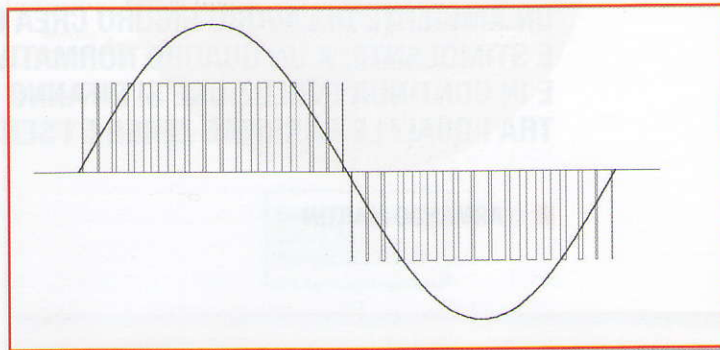
Infine, vale la pena di citare alcuni metodi di ricerca utilizzati in passato ma che oggi si incontrano con minore frequenza, quali il metodo OV (Open Voltage), basato sulla misura periodica della tensione a circuito aperto, e il metodo SC (Short Circuit), analogo al precedente ma che invece tiene conto della corrente di corto circuito.

■ CARATTERISTICHE DELLA CONVERSIONE CC/CA

La conversione della potenza da corrente continua a corrente alternata avviene per mezzo di opportuni ponti di conversione a semiconduttori. Vi sono sostanzialmente due possibili tipi di funzionamento per questi circuiti: la commutazione a



▲ **Figura 5:** Forma d'onda di uscita prima del filtro per un inverter commutato a frequenza di rete



▲ **Figura 6:** Forma d'onda di uscita prima del filtro per un inverter con commutazione PWM

frequenza di lavoro e il *Pulse Width Modulation* (PWM).

Nel primo caso i dispositivi di potenza commutano alla frequenza richiesta a valle del ponte di conversione, ossia alla frequenza di rete (50 Hz). Viene quindi prodotta un'onda quadra (con qualche eventuale aggiustamento) del tipo visibile in figura 5. In questo caso, la parzializzazione di ciascuna semionda, con una durata di 120°, anziché di 180°, permette di eliminare la terza armonica. L'ampiezza delle armoniche di ordine più elevato rispetto alla fondamentale rimane comunque notevole (la quinta armonica è pari al 20% e la settima è pari al 14,3%). In molti casi è pertanto necessario fare uso di filtri passa-basso all'uscita del ponte per limitare l'ampiezza di tali armoniche e conferire alla forma d'onda un aspetto più simile a quello sinusoidale.

Di fatto i convertitori con uscita ad onda quadra sono molto semplici ma, soprattutto se di potenza elevata, non sono adatti ad alimentare i carichi elettrici sensibili alla presenza di armoniche. Per questo motivo risultano essere attualmente quasi del tutto abbandonati.

Nel caso del PWM, la commutazione avviene a frequenza più elevata (decine di kHz), ottenendo così delle successioni di treni di impulsi la cui singola durata è proporzionale al valore, in quell'istante, della sinusoide che si intende ottenere (figura 6). Un filtro passa-basso all'uscita del ponte provvede poi a conferire all'onda prodotta dall'inverter l'aspetto sinusoidale richiesto.