

FOTOVOLTAICO

Introduzione

La conversione fotovoltaica consiste nella trasformazione diretta dell'energia solare in energia elettrica mediante dispositivi a stato solido (celle fotovoltaiche) basati sui semiconduttori, prodotti con metodi affini a quelli impiegati nell'industria elettronica. Essa mostra la più elevata efficienza di conversione dell'energia solare primaria in elettricità rispetto alle altre tecnologie rinnovabili. La tecnologia fotovoltaica appare quella che consente il più promettente sfruttamento nel lungo termine e su grande scala delle fonti rinnovabili, soprattutto in paesi come l'Italia con alti livelli di insolazione ed il cui potenziale energetico fotovoltaico ammonta a 47.000 miliardi di kWh/anno.

Se ricordiamo che il fabbisogno elettrico nazionale si attesta ai 270 miliardi di kWh/anno, discende che utilizzare pochi per mille del potenziale fotovoltaico potrebbe soddisfare le richieste di tale energia del nostro paese: appare chiaro allora che un uso pur limitato di questa tecnologia sarebbe anche in grado di ridurre significativamente la dipendenza energetica dalle fonti convenzionali.

L'impatto inquinante ambientale del fotovoltaico è ridotto ed è legato alla sola fase produttiva dei supporti di silicio: la costruzione dei moduli, infatti, richiede l'uso di tecnologie convenzionali poco inquinanti e la spesa di energia vale, alle latitudini meridionali, circa il 20% dell'energia prodotta nella loro vita utile. L'esercizio delle centrali tuttavia non dà origine ad alcun tipo di emissione ed il loro "decommissioning" (dopo 25-30 anni di esercizio) non presenta particolari problemi, anche se il materiale esausto non può comunque essere trattato come un rifiuto ordinario (nei sistemi stand-alone sono da smaltire le batterie esaurite, problema però comune anche ad altre tecnologie: telefonia, autotrazione, etc.).

A differenza di talune fonti rinnovabili il fotovoltaico beneficia della indipendenza del luogo di installazione rispetto alla fonte di energia: seppur in misura variabile, sulla superficie terrestre l'irraggiamento solare arriva ovunque, la fonte eolica e quella idro sono invece limitate a porzioni specifiche del territorio, laddove tali risorse si concentrano in misura idonea ad essere

sfruttata, mentre la biomassa va coltivata in situ o comunque trasportata. Da ciò discende un ulteriore pregio del FV: tali impianti sono gli unici idonei ad applicazioni di tipo locale, sono modulari e impiegabili dai milliwatt ai megawatt, e possono risolvere ovunque fabbisogni puntuali non estensivi, capaci di alimentare autonomamente utenze isolate distanti dalla rete elettrica o protette da vincoli, tipo parchi naturali, isole, etc., nonché essere integrati negli edifici di nuova costruzione, secondo la corretta filosofia costruttiva delle architetture "bioclimatiche", le sole che, per posizionamento, scelta dei materiali costruttivi, integrazione di sistemi energetici, tendono ad autoprodurre il proprio fabbisogno di energia, svincolandosi da qualunque dipendenza esterna.

A fronte dei vantaggi esposti esiste una controindicazione importante alla diffusione del fotovoltaico: il suo costo di produzione è ancora non competitivo con le tecnologie a fonte fossile o rinnovabile matura, l'installazione di impianti in cui si desiderino potenze di taglia industriale conduce ad occupazioni ingenti del territorio: tali assetti sono assai poco attuabili nel nostro Paese, sia per il palese mutamento indotto sul paesaggio (risultano inaccettabili ad alcuni le grandi superfici riflettenti), sia per la difficoltà di reperire ampi siti che siano autorizzabili e non altrimenti destinati.

Principi di funzionamento

1. La cella fotovoltaica

La cella fotovoltaica è un dispositivo che, esposto al sole, è capace di convertire direttamente la radiazione solare in energia elettrica.

Ai fini del funzionamento delle celle i fotoni di cui è composta la luce solare non sono tutti equivalenti: per poter essere assorbito e partecipare al processo di conversione, un fotone deve possedere un'energia superiore ad un certo valore minimo, che dipende dal materiale di cui è costituita la cella; in caso contrario, il fotone passa attraverso tutto lo spessore del dispositivo senza innescare il processo di conversione.

Con il silicio, materiale semiconduttore più usato per la costruzione delle celle, non viene assorbita tutta la parte della radiazione solare con energia

insufficiente, ovvero con lunghezza d'onda superiore a $1.1 \mu\text{m}$, e risulta così inutilizzata ai fini della conversione.

Anche i fotoni con troppa energia vengono utilizzati solo parzialmente: in tal caso il fotone viene assorbito, ma la frazione di energia in eccesso rispetto al valore di soglia necessario per l'assorbimento viene convertita in calore e quindi persa dal punto di vista elettrico.

Questo meccanismo detto "a soglia" è essenziale per determinare l'efficienza di conversione ottenibile con celle costruite con materiali differenti.

Quando un fotone dotato di sufficiente energia viene assorbito nella cella, all'interno di quest'ultima si crea una coppia di cariche elettriche di segno opposto, chiamate elettrone e lacuna, che si rendono disponibili per la conduzione di elettricità. Per generare effettivamente la corrente elettrica è però necessaria una differenza di potenziale che faccia muovere tali cariche, ed essa viene creata grazie all'introduzione di piccole quantità di impurità nel materiale delle celle: tali impurità, dette droganti, sono in grado di modificare profondamente le proprietà elettriche del semiconduttore.

Introducendo fosforo per esempio, si ha la formazione di silicio definito di tipo n, mentre usando impurità come il boro si ha la formazione di silicio di tipo p.

Nel primo caso si consegue la formazione di un materiale caratterizzato da una densità di elettroni liberi (cariche negative) molto più alta di quella presente nel silicio normale, nel secondo caso le cariche in eccesso sulla norma sono di segno positivo.

Una cella fotovoltaica richiede l'intimo contatto, su una grande superficie, di due strati di silicio p ed n: nella zona di contatto tra i due tipi di silicio, detta giunzione n-p, si ha la formazione di un forte campo elettrico, capace di muovere in direzioni opposte le cariche elettriche positive e negative generate dalla luce in prossimità della giunzione. In questo modo le cariche vengono separate e, collegando questo dispositivo ad un circuito esterno, si potrà avere una circolazione di corrente: tanto maggiore è la quantità di luce incidente, tanto maggiore è la corrente generata.

La tipica cella fotovoltaica prodotta industrialmente è costituita da una sottile fetta di silicio mono o policristallino, di spessore pari a circa 0.3 mm , di forma

circolare o quadrata e con un'area di circa 100 cm^2 (inserire la fig.8 di pag. 148).

Nello spessore della cella si distinguono due strati semiconduttori: quello superiore esposto alla radiazione solare, molto sottile, di tipo n, ed un secondo strato, di tipo p, in cui avviene l'assorbimento della luce incidente.

La luce genera all'interno della cella le coppie elettrone-lacuna, che migrano verso gli elettrodi sotto l'azione del campo elettrico presente alla giunzione n-p: gli elettroni vengono raccolti dall'elettrodo superiore, le lacune da quello inferiore, creando un generatore di corrente.

La potenza massima erogabile in condizioni di illuminazione e temperatura specificate viene misurata in Watt di picco (W_p): si conviene che, alla temperatura della giunzione di $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e con un irraggiamento di 1000 W/m^2 , una cella ha una potenza nominale di 1 W di picco se eroga la potenza massima di 1 W .

L'efficienza di una cella fotovoltaica risulta dal rapporto tra la potenza massima erogata e l'irraggiamento incidente sulla sua superficie: per il silicio monocristallino varia dal 15% (celle commerciali) al 25% (prove di laboratorio). Tali non elevati valori discendono dalla considerazione che parte dell'energia che investe una cella si perde per riflessione, per fotoni troppo o poco energetici, per resistenze parassite; per diminuire la riflessione si sottopone la superficie della cella ad un trattamento chimico che le conferisce una struttura a piramidi. Dopo questi trattamenti la cella assume il caratteristico colore blu scuro o nero.

2. Il modulo fotovoltaico

Per ragioni di praticità le celle vengono assemblate in una struttura robusta e maneggevole, in grado di garantire molti anni di funzionamento anche in condizioni ambientali difficili: il modulo fotovoltaico.

Nella sua forma più comune un modulo è costituito da 36 celle, disposte su 4 file parallele e collegate in serie tra loro; le celle sono sigillate tra due lastre di vetro o vetro e plastica (posteriore).

La potenza erogata da un modulo in condizioni di sole pieno vale $40\text{-}50 \text{ W}$, con tensione di lavoro ai morsetti intorno ai 17 V , in modo che sia collegabile

direttamente ad una tipica batteria di automobile per immagazzinare l'energia prodotta.

Un modulo raggiunge un'efficienza di conversione pari al 12-13%, inferiore a quella delle singole celle: tale diminuzione dipende dal fatto che il risultato dell'assemblaggio è una struttura la cui superficie non può essere interamente ricoperta dalle celle e quindi non tutta l'area esposta al sole partecipa alla conversione; a ciò si aggiunge la non omogeneità delle caratteristiche elettriche delle celle, con conseguente perdita di potenza.

Collegando in serie/parallelo un insieme di moduli si ottiene un generatore FV con le caratteristiche desiderate di corrente e tensione.

3. Il generatore (o campo) fotovoltaico

Si basa sull'accoppiamento in parallelo di stringhe di moduli, ciascuna ottenuta mettendo in serie un opportuno gruppo di moduli: il collegamento in serie fornisce il valore desiderato di tensione, mentre il numero di stringhe in parallelo determina la corrente di lavoro.

La potenza complessiva del campo è allora data dal prodotto della tensione di stringa per la corrente di lavoro del campo fotovoltaico.

Nella pratica l'installazione dei moduli fotovoltaici avviene nei seguenti modi:

- con impiego di strutture preesistenti (tetti delle abitazioni, capannoni industriali);*
- apposite strutture di sostegno fisse su una o più file parallele*
- apposite strutture di sostegno mobili, capaci di "inseguire" il sole*

Le prime due soluzioni, semplici ed affidabili, sono le più diffuse per i sistemi di piccola e media potenza, la terza è complessa e costosa, viene adottata solo su impianti di grande taglia, specie in località dove si ha un netto predominio della radiazione diretta rispetto alla diffusa.

4. La regolazione della potenza

Le caratteristiche elettriche del generatore FV (corrente e tensione in corrente continua, variabili al variare dell'irraggiamento e della temperatura) differiscono

spesso da quelle delle utenze, funzionanti quasi sempre in corrente alternata e a valori costanti di tensione.

È allora necessario dotare il generatore di opportune apparecchiature di condizionamento della potenza, di controllo e protezione (nonché sicurezza nel caso di impianti collegati alla rete).

Nel caso di utenze in corrente continua questo sistema è essenzialmente un convertitore cc/cc che funziona come un trasformatore con rapporto di trasformazione variabile: è cioè in grado di mantenere costante la tensione alla propria uscita indipendentemente dalle variazioni di tensione del generatore fotovoltaico.

Nel caso di utenze in corrente alternata l'elemento base è l'inverter, capace di convertire la tensione continua in alternata, assicurando nel contempo il valore voluto di tensione.

5. Il sistema di accumulo

Negli impianti isolati dove il fotovoltaico costituisce l'unica fonte di energia, la continuità di alimentazione delle utenze è assicurata dal sistema di accumulo dell'energia elettrica tramite accumulatori ricaricabili.

Detto sistema viene progettato in modo da garantire un adeguato numero di ore di alimentazione del carico anche in assenza completa di irraggiamento, deve tenere anche conto del rendimento delle batterie e della necessità di evitare sovraccarichi o scariche profonde, superiori cioè al 50% della carica nominale.

Le batterie contribuiscono inoltre a stabilizzare la tensione di uscita del generatore FV in molte applicazioni: in piccoli impianti ciò può essere sufficiente ad eliminare il sistema di condizionamento della potenza.

Stato dell'arte della tecnologia fotovoltaica

Sino ad oggi la tecnologia sviluppata nel FV ha utilizzato in larga parte il silicio amorfo e quello cristallino, quest'ultimo nelle forme mono e policristallino.

Altri materiali tuttavia sono in sperimentazione: l'arseniuro di gallio (GaAs), il diseleniuro di indio e rame (CuInSe₂) e il telluriuro di cadmio (CdTe), gli ultimi due materiali policristallini composti.

L'impiego del silicio e dell'arseniuro di gallio in applicazioni diverse ha favorito la concentrazione di capitali di ricerca e sviluppo di cui ha beneficiato il FV, conseguendo in pochi anni aumenti del rendimento superiori al 50% rispetto agli esemplari dei primi anni 80.

Il silicio cristallino è l'unico materiale usato nelle applicazioni energetiche, ove è richiesto un generatore con elevata potenza per unità di superficie; consente di preparare celle con efficienza teorica sino al 30%.

Gli attuali processi di produzione sono basati sul silicio di scarto dell'industria elettronica, sulla preparazione di lingotti mono e policristallini mediante opportuni processi di purificazione e cristallizzazione, sul loro taglio e sulla fabbricazione di celle e moduli in linee della capacità dell'ordine del MW.

La disponibilità limitata di silicio di scarto rappresenta un problema per lo sviluppo di tale tecnologia, pur se il consumo di silicio è sceso da 20 a 10 t/MW elettrico prodotto.

La tecnologia delle celle all'arseniuro di gallio ha già consentito di raggiungere rendimenti di conversione elevatissimi anche a temperature elevate ed offre ottime prospettive di miglioramenti. La commercializzazione dei moduli GaAs è limitata dagli altissimi costi di produzione del materiale: le uniche applicazioni competitive sono quelle spaziali, per produrre energia elettrica a bordo di satelliti artificiali.

I materiali semiconduttori composti come CuInSe₂ (CIS) o il CdTe si sono rivelati interessanti per il fotovoltaico, ma non per altri tipi di applicazione: di conseguenza non hanno beneficiato dello sviluppo compiuto per il silicio o l'arseniuro di gallio. Le attività di ricerca sono comunque in incremento, in quanto i risultati di laboratorio ottenuti sul diseleniuro di rame e indio incoraggiano una prossima commercializzazione di moduli a base di celle di CIS.

Attualmente, dunque, si riscontra qualche incertezza su quali debbano essere le linee di ricerca da perseguire per conseguire elevati rendimenti di conversione e l'attesa riduzione dei costi.

Tuttavia, la ricerca sul fotovoltaico è "giovane", in quanto le attività più datate per lo sviluppo di materiali, dispositivi e sistemi per applicazioni terrestri sono iniziate soltanto negli ultimi 30-40 anni.

Considerazioni economiche

La quantità di energia prodotta da un impianto fotovoltaico dipende fortemente dalle condizioni climatiche in cui esso è installato.

La potenzialità energetica di un certo sito si esprime in ore annue di insolazione equivalente: esse rappresentano il numero di ore di insolazione nell'arco dell'anno riportate alla condizione di irraggiamento nominale (1000 W/m²).

Questa unità di misura è particolarmente comoda perché, nota la potenza nominale dell'impianto, essa consente di calcolare immediatamente l'energia che è in grado di produrre; ad esempio, nell'Italia meridionale si misurano 1800 ore equivalenti di insolazione all'anno: ciò significa che un impianto FV con potenza nominale di 1 kW può produrre 1800 kWh/anno.

Nella realtà la potenza di un impianto fotovoltaico è l'80-85% di quella nominale per le perdite dovute al surriscaldamento dei moduli, ai collegamenti serie / parallelo, al rendimento del sistema di condizionamento della potenza: di conseguenza la producibilità effettiva di un impianto da 1 kW è di ca. 1500 kWh/anno.

Con questi numeri si è in grado immediatamente di valutare il risparmio di combustibili fossili con un impianto FV: è sufficiente conoscere la vita media dell'impianto, valutabile in 25 anni, e sottrarvi il cosiddetto Energy Pay Back Time EPBT, cioè il tempo necessario perché l'impianto produca l'energia spesa per la sua costruzione, valutato in 5 anni.

L'energia netta prodotta dall'impianto, ed il risparmio di combustibile primario, si calcola moltiplicando la produzione annua di energia per la vita efficace dell'impianto, pari in questo caso a 20 anni: in tale tempo un impianto da 1 kW produce $1500 \times 20 = 30.000$ kWh.

Dato che per produrre 1 kWh elettrico occorre bruciare circa 0.25 kg di combustibile fossile, il risparmio complessivo risulta di $30.000 \times 0.25 = 7.500$ kg, ovvero 7.500 tep in meno bruciati in atmosfera. E tutto ciò con 1 solo kW FV!

Sviluppo del potenziale fotovoltaico

Le non ancora mantenute promesse del fotovoltaico in termini di riduzione dei costi e tempi per il conseguimento della piena competitività (forse anche a causa dell'approccio su richiamato) hanno privilegiato soprattutto tecnologie idonee alle applicazioni marginali.

Considerando le caratteristiche proprie e il grande potenziale, anche in assenza di prospettive certe sulla riduzione dei costi, si ritiene che il fotovoltaico debba essere comunque sviluppato ai migliori livelli possibili, non fosse altro che per preconstituire una opzione di riserva, per far fronte a non auspiccate emergenze energetiche e ambientali, sempre possibili nei decenni a venire.

In sintonia a quanto in essere in altri paesi, anche in Italia, si sta operando un sensibile sforzo per lo sviluppo di applicazioni idonee all'integrazione del fotovoltaico nelle strutture edilizie, il cui mercato sembra il più promettente per i prossimi anni.

Questa scelta appare condivisibile, in quanto prospetta una applicazione di grande rilevanza per più ragioni: in primo luogo, favorisce l'auspicata integrazione nell'edilizia, circostanza, questa, che di per sé giova alla riduzione dei costi; in secondo luogo, offre opportunità di mercato impensabili, fino a pochi anni fa, agli operatori industriali, e comunque significative da un punto di vista energetico; infine, agevola la formazione di una più consapevole cultura energetico-ambientale.

Occorre lo sviluppo di linee di ricerca che conseguano una vera integrazione, in modo da ottenere un componente fotovoltaico che sia elemento polifunzionale da inserire nella architettura degli edifici (ma anche negli elementi strutturali e nei prefabbricati a uso industriale), che sia un prodotto-base di impianti tecnologici a servizio di strutture edili, idonei, oltre che a produrre energia elettrica, anche al recupero di energia termica.

La ricerca tecnologica si dovrà orientare essenzialmente verso lo sviluppo di materiali e dispositivi a film sottile e di relative tecniche per la deposizione su grande area, nonché sullo sviluppo di adeguati componenti della parte non attiva dell'impianto.

Definito, quindi, che una delle linee strategiche di ricerca da perseguire è lo sviluppo di sistemi per l'integrazione del fotovoltaico nell'edilizia, resta da chiedersi se tale scelta debba esaurire o assorbire gran parte degli sforzi e delle risorse.

In effetti, un'ampia diffusione del fotovoltaico nelle strutture edili consentirebbe di ottenere un contributo energetico significativo, ma certo non determinante, e le relative tecnologie, inoltre, difficilmente sarebbero idonee per applicazioni diverse.

Per incrementare la diffusione del fotovoltaico nel breve periodo, è anzi opportuno stimolare il più ampio mercato potenziale del fotovoltaico, graduando le politiche di sostegno in ragione della competitività in termini economici e/o energetici delle diverse applicazioni.

Per esempio, tra i segmenti di mercato industrialmente maturi si collocano applicazioni prossime alla competitività, come l'illuminazione stradale, le insegne luminose, le cabine telefoniche, le pensiline di servizio, l'alimentazione di utenze isolate. Per questa nicchia di mercato, piccoli interventi di sostegno potranno consentire grandi risultati in termini di sviluppo e diffusione della tecnologia, con prospettive anche per i paesi dell'area mediterranea e in via di sviluppo.

Un sostegno potrà essere previsto per quelle applicazioni, anche con sistemi ibridi, rivolte a reti o utenze isolate, forse tra le più vicine alla competitività su larga scala. Un ulteriore modo per promuovere questo tipo di sistemi potrà essere quello di attivare progetti e processi connessi ai meccanismi flessibili contemplati dal protocollo di Kyoto.

Tuttavia, sussistendo la volontà di considerare il fotovoltaico, insieme alle biomasse, risorsa strategica per gli anni dopo il 2010, va anche compiuto uno sforzo di ricerca indipendente dalle applicazioni possibili nel breve periodo, che miri allo studio di materiali e allo sviluppo di dispositivi e sistemi, che possono

mercato energetico

diventare competitivi nel lungo termine, per il mercato interno e internazionale, in particolare del bacino del Mediterraneo, con potenziali benefici per l'industria italiana.

La nota natura modulare delle tecnologie in gioco consente l'esecuzione di alcune delle attività di ricerca su piccola scala, le cui necessarie risorse finanziarie possono essere relativamente contenute.