



Impianti fotovoltaici per servizio isolato

Tra le prime applicazioni dell'industria fotovoltaica, gli impianti per servizio isolato utilizzano componentistica in buona parte diversa da quella per gli impianti collegati in rete

di FRANCESCO GROPPI

Gli impianti fotovoltaici per servizio isolato rappresentano la categoria di applicazioni che ha dato il via all'industria fotovoltaica, permettendo a quest'ultima di evolversi e sviluppare i prodotti di alta tecnologia che oggi conosciamo.

Negli ultimi decenni del secolo scorso e fin verso la fine dello stesso, la realizzazione degli impianti fotovoltaici non era legata, come invece avviene oggi, alla riduzione dell'impiego dei combustibili fossili e al contrasto delle emissioni di CO₂. Molto più semplicemente, questi impianti servivano al soddisfacimento di esigenze energetiche che difficilmente avrebbero trovato soluzioni differenti.

I prodotti offerti dall'industria fotovoltaica erano quindi destinati per intero alla realizzazione di impianti per servizio isolato, fossero essi destinati alla navigazione marittima, ai ponti radio o all'alimentazione di località remote.

La suddivisione seguente fornisce un quadro abbastanza completo delle principali categorie di applicazione del fotovoltaico per usi terrestri e per utenze prive di connessione alla rete elettrica:

- sistemi per l'alimentazione di apparecchiature quali lampioni FV, ponti radio, cabine telefoniche, segnalazione marittima (figura 1);
- impianti di pompaggio per usi domestici o agricoli;
- impianti solari per l'alimentazione di abitazioni isolate (Solar Home Systems – SHS) in corrente continua o in corrente alternata (figura 2);
- impianti solari per l'alimentazione di gruppi di utenze isolate (village power).



▲ **Figura 1:** Esempio di boa di segnalazione fotovoltaica (foto Photowatt)

È interessante notare che, a differenza di quanto avviene per gli impianti collegati alla rete, gli impianti per servizio isolato necessitano pressoché sempre di un sistema di accumulo. Ad esempio, la figura 3 mostra lo schema di principio di un impianto per l'alimentazione di un'abitazione, ma lo stesso può andar bene per molte altre applicazioni. Dalla figura 3 si può vedere che gli impianti per servizio isolato utilizzano una componentistica per buona parte diversa da quella che costituisce gli impianti per servizio in rete.

In particolare, risultano essere particolarmente importanti l'accumulo elettrochimico e il regolatore di carica. Viceversa, l'inverter diventa ora molto più semplice perché, essendo collegato ad una sorgente a tensione pressoché costante, può essere costituito da un singolo stadio di conversione senza la funzione MPPT (eventualmente demandata al regolatore di carica) e le protezioni contro la perdita di rete.

■ ACCUMULO ELETTROCHIMICO

Nella maggior parte dei casi l'accumulo elettrochimico può essere realizzato con delle batterie al piombo o al litio. Normalmente, nelle applicazioni di taglia più piccola, fino a qualche decina di watt, si utilizza la seconda, mentre negli altri casi la scelta cade sulle batterie al piombo. Le batterie al piombo-acido hanno beneficiato per decenni di un continuo sviluppo tecnologico legato all'industria automobilistica, tuttavia i modelli per impieghi stazionari, con particolare riferimento al fotovoltaico, sono spesso diversi da quelli per autotrazione, principalmente per due motivi:

■ Nelle batterie per autotrazione il fenomeno della stratificazione dell'elettrolita, dovuto all'acido solforico che pesa più dell'acqua, è poco rilevante perché il movimento e le vibrazioni a cui sono sottoposte ne provocano il continuo rimescolamento.

■ Nelle applicazioni fotovoltaiche la corrente di scarica non assume quasi mai valori elevati, a differenza degli impieghi in autotrazione caratterizzati da forti spunti.

Tipicamente, nei piccoli impianti si utilizzano batterie di derivazione automobilistica più o meno modificate, non molto efficienti ma più economiche e facili da reperire. Ci si orienta invece verso quelle specifiche per impieghi stazionari all'aumentare della potenza in gioco.

La trasformazione chimica che governa il comportamento degli accumulatori al piombo-acido è quello di carica-scarica, descritta dalla formula seguente:

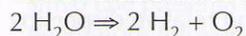
▼ **Figura 2:** Esempio di abitazione isolata equipaggiata con impianto fotovoltaico



$Pb + PbO_2 + 2 H_2SO_4 \rightleftharpoons 2 PbSO_4 + 2 H_2O$
 Leggendo la reazione da sinistra a destra si ottiene la reazione di scarica, mentre da destra a sinistra si ottiene la carica.

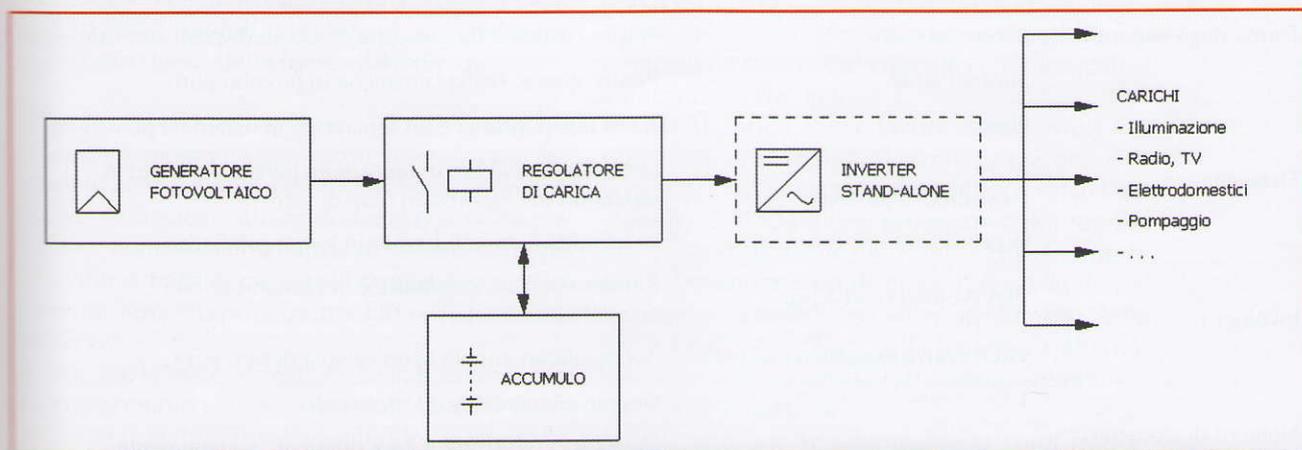
Questa reazione è reversibile, ma fino a quando il solfato di piombo che si deposita sugli elettrodi nel processo di scarica non raggiunge un livello tale da non poter essere più riconvertito in acido solforico. Se ciò accade, ad esempio a causa di una scarica profonda, la batteria perde la propria capacità di accumulare energia e deve essere sostituita.

Vi è poi un'altra trasformazione chimica che si verifica nella batteria, principalmente quando la carica raggiunge il valore massimo o all'approssimarsi di questo. Il fenomeno è detto gassificazione dell'elettrolita ed è descritto dalla formula:



La gassificazione dell'elettrolita si verifica, in misura molto inferiore, anche durante la normale carica. Pur non compromettendo di per sé l'integrità e la durata della batteria, deve comunque essere tenuto sotto controllo in quanto tende ad autosostenersi con la temperatura e, negli accumulatori a vaso aperto, provoca la veloce diminuzione dell'acqua presente negli elementi.

Gli accumulatori ermetici, così come quelli con



▲ **Figura 3:** Schema di principio di un impianto fotovoltaico per l'alimentazione di un'abitazione isolata

elettrolita in gel, sono invece capaci di ricombinare l'idrogeno e l'ossigeno prodotti, ma solo entro certi limiti, al di là dei quali si deteriorano senza possibilità di recupero.

In sintesi, le batterie possono essere tra loro suddivise a seconda di differenti caratteristiche, come riportato nella tabella 1.

Gli elettrodi non sono quasi mai realizzati in piombo puro. Al fine di migliorare le prestazioni, il più delle volte vengono aggiunte piccole quantità di uno o più dei seguenti materiali: antimonio, calcio, stagno.

Sul mercato si trovano batterie commercializzate con appellativi ormai entrati nell'uso comune:

- batterie *solar*, di derivazione automobilistica hanno però in genere le piastre di minore superficie ma più spesse, caratteristica questa che ne aumenta la vita utile;
- batterie *low-maintenance*, nelle quali alle piastre è stata aggiunta una certa quantità di calcio per aumentarne la tensione di inizio gassificazione e diminuire quindi, in una certa misura, le operazioni di manutenzione.

Quando la capacità di accumulo diventa rilevante, ci si orienta generalmente su elementi singoli dotati di piastre tubolari, che nelle applicazioni statiche risultano più efficienti.

Gli accumulatori VRLA hanno il vantaggio, rispetto a quelli VLA, di non richiedere operazioni di manutenzione essendo in grado di ricombinare l'idrogeno e l'ossigeno che si formano durante la carica.

Tuttavia, tollerano molto meno i lunghi periodi di sovraccarica, i quali provocano l'intervento della valvola di sicurezza con relative dispersioni non più ripristinabili.

La capacità di una batteria è proporzionale all'energia che è in grado di immagazzinare, misurata in amperora (Ah), poiché gli elementi hanno tensione nominale di 2 volt⁽¹⁾. La capacità di-

pende però da diversi parametri, e cioè:

- il regime di scarica, ossia in quanto tempo avviene la scarica a corrente costante, misurata in ore;
- la temperatura degli elementi in °C;
- la tensione di fine scarica in volt.

Ad esempio, un accumulo composto da elementi di 2 volt nominali della capacità di 100 Ah misurati con una scarica di 10 ore alla temperatura di 20°C e una tensione di fine scarica di 1,85 volt⁽²⁾ si indica come⁽³⁾:

$$C_{10} (20 \text{ } ^\circ\text{C}, 1,85 \text{ V/el}) = 100 \text{ Ah}$$

Il tempo di scarica influisce grandemente sulla capacità. Infatti, maggiore è questo tempo, tanto maggiore è l'energia che si riesce ad estrarre dall'accumulo. I costruttori forniscono normalmente le capacità a C_{10} e C_{100} (altri valori presenti di frequente nei cataloghi sono comunque C_1 , C_5 , C_{20} e C_{120}). Il C_{10} è più adatto per uso automobilistico, mentre il C_{100} (o il C_{120}) è normalmente preso come riferimento per le applicazioni fotovoltaiche, perché meglio si accorda con i tempi di autonomia degli impianti nei periodi in cui la radiazione solare scarseggia.

Nel fare i raffronti tra i diversi valori di capacità che una batteria presenta al variare del regime di scarica occorre però fare attenzione alla tensione di fine scarica raggiunta nelle prove. Nella pratica, le scariche rapide tollerano maggiormente tensioni di fine scarica basse, mentre in corrispondenza di tempi più lunghi di scarica queste tensioni sono mantenute leggermente più alte. Le precauzioni sulla tensione di fine scarica derivano dall'impossibilità di scaricare completamente un accumulo al piombo e prendono origine dalle stime della carica residua⁽⁴⁾, necessaria come si è visto alla sopravvivenza del componente.

Il rapporto tra l'energia effettivamente estraibile dall'accumulo e quella che sarebbe possibile ri-

TABELLA 1: Classificazione delle batterie

Caratteristica	Tipologie	Descrizione
Forma degli elettrodi	piastre piane	Piastre piane tra loro affiancate a griglia
	piastre tubolari	Piastre costituite da una serie di tubetti disposti verticalmente
	piastre Planté	Piastre spesse, realizzate anche in piombo puro
Elettrolita	libero	Tra le due piastre vi è un separatore in materiale poroso
	AGM (Absorbed Glass Mat)	Elettrolita non libero di fuoriuscire perché assorbito in separatori microporosi in fibra di vetro
	in gel	L'elettrolita è immobilizzato in forma gelatinosa
Involucro	VLA (Vented Lead Acid)	L'interno dell'accumulatore è in comunicazione con l'atmosfera esterna
	VRLA (Valve Regulated Lead Acid)	Accumulatori ermetici con valvola di sicurezza
Numero di elementi	1	Singolo elemento da 2 V nominali
	6, 12	Monoblocco da 12 V e 24 V nominali, generalmente utilizzati in accumuli di limitata capacità

cavare scaricandolo al 100% è indicato con DOD (Depth Of Discharge).

Valori tipici per il DOD sono compresi tra 50% e 80%, con la fascia più alta che rimane prerogativa degli accumulatori a piastre tubolari di taglia maggiore.

Dopo il regime di scarica, la temperatura è il parametro che influisce di più sul comportamento dell'accumulo al piombo-acido, per almeno 3 motivi:

- La capacità decresce al diminuire della temperatura. Questa variazione non è lineare, ma approssimativamente consiste nella diminuzione del 6% ogni 10 gradi in meno.
- All'aumentare della temperatura diminuisce la tensione di inizio gassificazione, ossia durante la carica inizia prima il fenomeno della gassificazione dell'elettrolita.
- L'aumento della temperatura media nel lungo periodo riduce la vita degli accumulatori.

Solitamente, una batteria è considerata esausta e deve essere sostituita quando la sua carica massima scende al di sotto dell'80% di quella iniziale (CEI EN 60896-1, CEI EN 60896-2 e CEI EN 61426).

Benché la durata di una batteria dipenda da molti fattori, tra cui in primo luogo la sua temperatura media, il numero di cicli completi di carica/scarica è normalmente compreso tra 200 e 600 prima dell'esaurimento. I valori più alti sono raggiunti facendo uso di accumulatori VRLA a piastre tubolari. Un'altra caratteristica da considerare consiste nel rendimento di carica/scarica, normalmente compreso tra il 70% e il 95%, il quale tiene conto del fatto che non tutta l'energia fornita viene successivamente restituita. Il rendimento di carica/scarica non deve però essere confuso con il DOD, che invece tiene conto del rapporto tra l'energia estraibile e quella complessivamente immagazzinata.

Le batterie, infine, sono caratterizzate da una certa autoscarica, compresa tra il 2% e il 5% al mese, parametro questo di una certa rilevanza, soprattutto negli impianti utilizzati saltuariamente. La figura 4 mostra un esempio di vano batterie in cui gli stessi moduli fotovoltaici provvedono a fornire un riparo dalla luce solare diretta.

Regolatori di carica

L'accoppiamento tra generatore fotovoltaico, accumulo elettrochimico e carichi elettrici non può essere effettuato collegando tutto quanto in parallelo, come talvolta capita di vedere, a meno che non si tratti di circuiti di emergenza o temporanei. Questo principalmente per i seguenti motivi:

- durante la notte, soprattutto se la batteria è particolarmente carica, la corrente tende a fluire verso il generatore fotovoltaico, dissipando in tal modo l'energia accumulata durante il giorno;

▼ **Figura 4:** Esempio di vano batterie per impianti fotovoltaici



- se la batteria raggiunge la carica completa durante il giorno e il generatore fotovoltaico continua a fornirle energia senza alcun controllo, la batteria può danneggiarsi anche irrimediabilmente;
- Se la batteria si scarica fino al valore consentito dal proprio DOD e i carichi continuano a richiedere energia, si verifica il processo di solfatazione irreversibile degli elettrodi.

Un buon regolatore di carica, non soltanto è in grado di far fronte ai problemi ora elencati, ma può servire a gestire al meglio l'accoppiamento tra i vari componenti, contribuendo ad allungare la vita dell'accumulo e, talvolta, svolgendo la funzione di monitoraggio di tutto il sistema.

Esternamente il regolatore di carica è un dispositivo che presenta 6 morsetti: 2 di ingresso per il generatore fotovoltaico, 2 per l'accumulo e 2 di uscita verso i carichi. Vi possono poi essere anche altri collegamenti, tipicamente di segnale, per sensori di temperatura, timer, monitoraggio remoto, ecc.

Oggigiorno il mercato offre una gamma piuttosto ampia di regolatori di carica per tensioni nominali di sistema che vanno da 6 a 48 volt e in grado di regolare correnti massime che possono variare da pochi ampere per i modelli più piccoli, fino a oltre 100 A per quelli di taglia maggiore. È però necessario sapersi orientare tra le varie caratteristiche offerte dai costruttori, delle quali si elencano le principali:

PWM: Significa *Pulse Width Modulation* e si riferisce alla modalità di parzializzazione della potenza dal generatore fotovoltaico verso l'accumulo. Il PWM è una prerogativa dei regolatori a commutazione elettronica che, in questo modo, effettuano un distacco più graduale del generatore fotovoltaico all'approssimarsi della tensione di fine carica della batteria. L'alternativa è invece costituita dal contattore elettromeccanico classico,

MPPT: Significa *Maximum Power Point Tracker* e consente lo sfruttamento ottimale del generatore fotovoltaico, che così si trova a funzio-

nare nel punto di massima potenza della curva tensione corrente. A causa delle elevate correnti in gioco e della complicazione circuitale che comporta, la funzione MPPT è presente solo in pochi modelli.

LVD: Significa *Low Voltage Disconnect* e costituisce ormai una funzione di serie su tutti i regolatori di carica. Questa funzione impedisce la scarica eccessiva della batteria staccando il carico quando la tensione ai capi di quest'ultima scende al di sotto di un certo valore minimo.

A titolo di esempio, per una batteria da 12 volt nominali, il distacco può avvenire a 11,4 volt.

Regolazione a 3 stadi: L'introduzione della regolazione a 3 stadi è basata sulla constatazione che nelle batterie si verifica comunque una deposizione di ossido sugli elettrodi difficile da rimuovere attraverso i processi di carica/scarica usuali. Alla fine del processo di carica, un breve periodo di gassificazione, col rimescolamento dell'elettrolita che questo comporta, può essere utile a rimuovere almeno una certa parte dell'ossido residuo.

Una variante della regolazione a 3 stadi è costituita dalla regolazione a 4 stadi, abbastanza simile alla precedente, ma nella quale vi è anche una fase di equalizzazione della carica degli elementi.

Variazione della tensione di carica con la temperatura: La tensione di inizio gassificazione dell'elettrolita varia con la temperatura, per cui molti regolatori di carica sono dotati di una sonda di temperatura da applicare all'accumulo che permette di disinserire il generatore fotovoltaico appena prima che si inneschi il fenomeno.

Scelta del tipo di batteria: La tensione di fine carica varia col tipo di accumulatore utilizzato e quindi spesso i costruttori permettono di selezionare questo parametro.

Ad esempio, alcuni regolatori di carica permettono di scegliere tra accumuli VLA, VRLA e in gel. Per ognuno di questi è prevista una differente curva di compensazione della temperatura in funzione dei diversi regimi di carica.

Tanto per fare un raffronto, un modello molto diffuso di regolatore di carica fornisce, nel caso di carica normale, i seguenti valori di set-point a 20 °C:

- VLA: 2,40 V/el
- VRLA: 2,36 V/el
- In gel: 2,33 V/el

Funzione timer: I regolatori di carica destinati a gestire impianti di illuminazione ad energia solare, spesso incorporano un timer in grado di inserire i carichi ad una determinata ora e staccarli dopo un certo tempo.

Visualizzazione locale dei parametri e linee di segnale: Alcuni regolatori di carica dispongono di un display e di segnalazioni luminose in grado di visualizzare i principali parametri di sistema (tensioni, correnti, potenze in transito, ener-

gie, periodi di funzionamento) Alle segnalazioni luminose è invece lasciato il compito di indicare la modalità di funzionamento ed eventuali condizioni anomale.

I dati possono anche essere trasmessi su linea seriale e letti da un computer remoto.

Dimensionamento degli impianti per servizio isolato

Nel dimensionamento degli impianti per il servizio isolato si intende scegliere le caratteristiche dei componenti principali (moduli fotovoltaici, batteria, cavi, eventuale inverter) per assemblare un sistema in grado di alimentare le utenze in modo soddisfacente.

Per far questo occorre partire da alcuni dati di progetto:

1. irraggiamento medio giornaliero sul sito nei 12 mesi dell'anno;
2. energia giornaliera consumata nei periodi più significativi;
3. potenza massima richiesta complessivamente dagli utilizzatori;
4. numero di giorni di autonomia anche in mancanza di sole.

Riguardo ai dati di irraggiamento, non è necessario calcolare i valori per tutti i 12 mesi, ma solo per i periodi critici (talvolta anche uno solo) in cui si ritiene che il divario tra l'energia solare e quella consumata sia più sfavorevole.

L'inclinazione dei moduli fotovoltaici deve essere scelta di conseguenza. Tipicamente, alle nostre latitudini, se l'impianto funziona tutto l'anno si adotta l'inclinazione di 60°, mentre se dovesse funzionare solo d'estate l'inclinazione dipende da quanto lungo si considera il periodo estivo.

Occorre poi conoscere o prevedere quali apparecchi saranno alimentati e per quanto tempo. Se si prevede che vi siano delle differenze nel corso dell'anno il calcolo va ripetuto ma, come nel caso della radiazione solare, solo per i periodi più sfavorevoli.

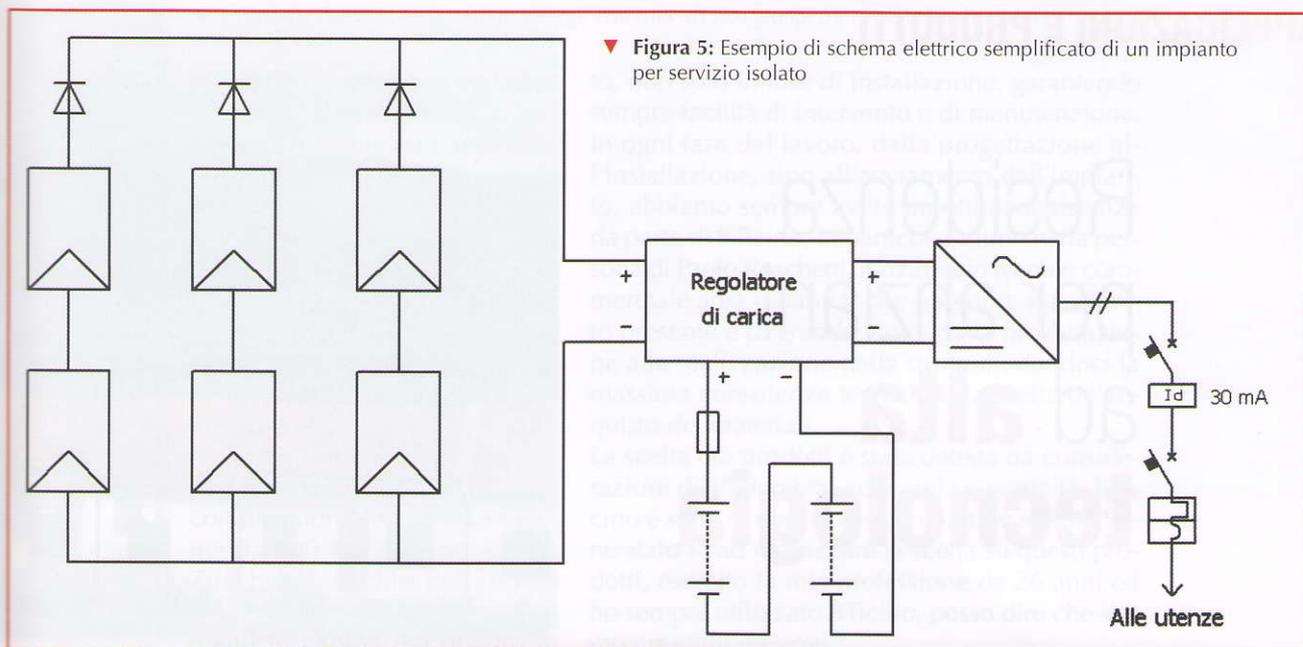
Va poi valutata la potenza massima richiesta dagli utilizzatori considerando un ragionevole fattore di contemporaneità dei carichi.

Infine, occorre decidere l'autonomia che deve avere l'impianto fotovoltaico in condizioni di tempo particolarmente sfavorevoli. Normalmente si considerano periodi che vanno da 3 a 5 giorni.

Una volta in possesso dei dati di progetto è possibile procedere col dimensionamento dell'impianto partendo dal generatore fotovoltaico. L'assunto su cui si basa la maggior parte dei criteri di progetto è che, su base media giornaliera, l'energia che l'impianto è in grado di fornire deve essere almeno uguale a quella che consumano i carichi, cioè:

$$E_{FV} \geq E_c$$

L'energia media giornaliera che l'impianto fotovoltaico è in grado di produrre è del resto propor-



zionale all'irraggiamento solare medio giornaliero sul sito G e alla potenza di picco del generatore fotovoltaico P_0 a meno di alcune perdite:

$$E_{FV} = G \cdot P_0 \cdot K \cdot \eta_{BOS} \quad [\text{Wh}]$$

Il coefficiente K , minore di 1, tiene conto degli eventuali ombreggiamenti sul generatore fotovoltaico, dei fenomeni di riflessione e assorbimento del vetro anteriore, oltre che dello sporcamento dei moduli. Per siti non particolarmente penalizzati, K è maggiore di 0,9.

Il coefficiente η_{BOS} tiene conto invece di tutte le perdite che si verificano nel sistema, partendo dai moduli fotovoltaici per arrivare ai carichi.

Esso è normalmente compreso tra 0,6 e 0,9 e dipende da numerosi fattori, tra cui i principali sono rappresentati dall'effetto della temperatura sui moduli e dal processo di carica/scarica dell'accumulo.

La presenza dell'inverter introduce un'ulteriore penalizzazione, in quanto il valore di energia prodotta deve essere moltiplicato per il rendimento di conversione di tale apparato.

Fatte queste premesse, ponendo $E_C = E_{FV}$ si ottiene la potenza di picco del generatore fotovoltaico e quindi il suo dimensionamento:

$$P_0 = \frac{E_C}{G \cdot K \cdot \eta_{BOS}}$$

Passando all'accumulo, è necessario che l'energia E_b che quest'ultimo deve essere in grado di fornire sia almeno uguale a quella che consumano i carichi giornalmente, moltiplicata per il numero di giorni di autonomia N_{ga} :

$$E_b \geq E_C \cdot N_{ga}$$

L'energia che l'accumulo è in grado di fornire è del resto pari alla sua capacità in Ah Q_b , moltiplicata per la tensione nominale V_b e per il rendimento di carica/scarica η_b .

$$E_b = Q_b \cdot V_b \cdot \eta_b$$

Se il costruttore dichiarasse la capacità a completo esaurimento dell'accumulo bisognerebbe moltiplicare il tutto per il Depth Of Discharge DOD.

Dalle due equazioni precedenti ne deriva che la capacità dell'accumulo deve essere almeno pari a:

$$Q_b = \frac{E_C \cdot N_{ga}}{V_b \cdot \eta_b}$$

Nel caso sia presente l'inverter, la sua potenza massima di uscita deve essere almeno uguale a E_C .

Restano infine da dimensionare i collegamenti. In genere questa operazione non viene fatta sulla portata dei cavi, quasi sempre sovrabbondante, ma sulla caduta di tensione.

A titolo di esempio, la figura 5 riporta lo schema elettrico di un impianto fotovoltaico dimensionato per fornire 900 Wh/giorno ad un'abitazione isolata ubicata nel Nord Italia. La potenza massima disponibile dipende dalla taglia dell'inverter che, ragionevolmente, potrebbe avere una potenza di uscita di 500 VA.

Il progetto prevede l'impiego di 6 moduli fotovoltaici cristallini da 70 Wp e 2 batterie monoblocco da 12V e 130 Ah.

NOTE

- (1) Da questo discende che l'energia accumulabile per elemento, misurata in wattora (Wh) è pari a circa 2 volte la sua capacità in Ah.
- (2) La tensione di massima carica è invece, a seconda dei casi, di 2,3 ÷ 2,4 volt.
- (3) Rimane sottinteso che si è partiti da un accumulo carico al 100%.
- (4) La valutazione dello stato di carica di una batteria non è semplice e non può basarsi unicamente sulla tensione misurata ai morsetti. Essendo la carica proporzionale alla quantità di acido solforico in soluzione, nelle batterie VLA si ricorre anche alla misura della densità dell'elettrolita.