

Impianti FV e sicurezza elettrica

Francesco Groppi *Comitato Elettrotecnico Italiano - CEI, Studio Tecnico Groppi*

La sicurezza degli impianti fotovoltaici è emersa come problema principalmente in tempi recenti, per via delle numerose esperienze registrate negli ultimi anni. L'articolo intende fornire una panoramica su questo aspetto evidenziandone le principali specificità

Negli anni passati, l'impiantistica fotovoltaica ha sofferto di alcune carenze normative, relative soprattutto alla sicurezza elettrica, in quanto le installazioni fotovoltaiche sono caratterizzate da aspetti per molti versi differenti rispetto agli impianti elettrici tradizionali.

Negli impianti fotovoltaici, la presenza di ampie sezioni in corrente continua, la numerosità delle possibili tipologie e, talvolta, la difficoltà di reperimento di componenti con caratteristiche adeguate hanno rappresentato i principali elementi di novità, ma anche di incertezza, con cui progettisti e installatori hanno dovuto spesso fare i conti. Va anche però detto che in passato, mancando di un quadro normativo completo, le scelte tecniche si sono spesso basate su criteri di prudenza, ottenendo quindi nella maggior parte dei casi dei risultati accettabili.

Tuttavia, il verificarsi di incidenti di origine elettrica in edifici con presenza di impianti fotovoltaici ha incentivato gli studi mirati a identificarne le cause, fornendo nel contempo indicazioni utili circa la natura e provenienza di queste ultime. Se, ad esempio, prendiamo in considerazione gli incendi di origine elettrica, un recente studio condotto in Germania [2] illustra che nel periodo 1995-2012 si sono registrati

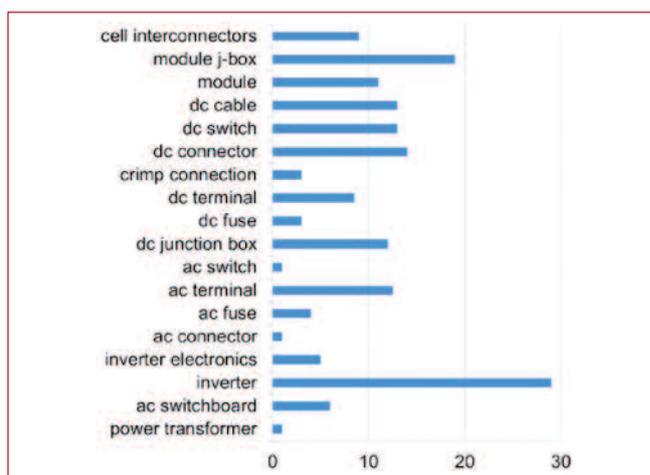


Figura 1
Conteggio delle cause di innesco d'incendio suddiviso per componente

circa 400 incendi in abitazioni dotate di impianto fotovoltaico. Per 180 di questi la causa è attribuibile direttamente all'impianto fotovoltaico stesso e, come si può vedere dalla figura 1, tutte le parti componenti hanno giocato un ruolo come causa d'innesco, anche se alcune di queste sono presenti con una numerosità maggiore di altre. In particolare, concordemente alle aspettative, si può osservare che gli inverter, i moduli fotovoltaici (FV) e le varie componenti della sezione DC hanno avuto un'incidenza maggiore.

Sorprende invece che, tra le cause d'innesco, i quadri AC e, più in generale la componentistica lato rete, presentino a loro volta una numerosità non trascurabile, anche se comunque inferiore a quella relativa alla sezione DC. Tuttavia, pur considerando questo dato comunque significativo, va però osservato che la prassi impiantistica nel Centro-Nord Europa prevede frequentemente l'impiego di fusibili di protezione lato AC, che a quanto si vede hanno causato alcuni problemi, mentre invece nel nostro Paese la protezione contro le sovracorrenti è perlopiù affidata a interruttori automatici.

Un altro dato significativo evidenziato dallo studio è che gli impianti integrati negli edifici, pur

rappresentando solo l'1% del mercato tedesco, incidono per il 21% sulle cause d'incendio. Si deduce pertanto che la prevenzione dal rischio elettrico merita un'attenzione particolare nel caso di impianti integrati, nei quali, tipicamente, gli elementi fotovoltaici sono installati a intimo contatto con gli altri elementi costruttivi dell'edificio e, in taluni casi, risultano anche facilmente raggiungibili dai suoi occupanti.

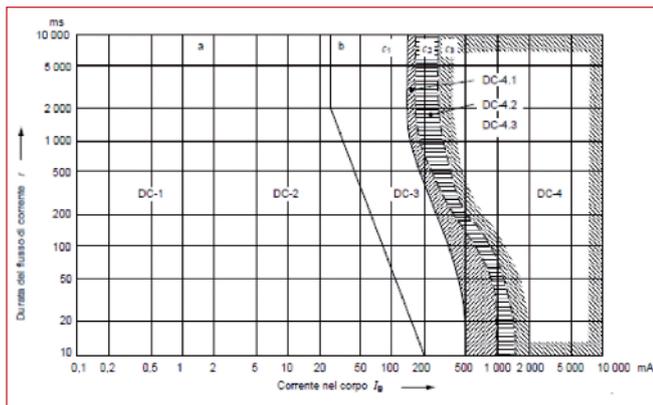


Figura 2
Zone tempo/corrente convenzionali degli effetti delle correnti continue sulle persone per un percorso longitudinale ascendente (DC-1 - percezione, DC-2 - reazione, DC-3 - effetti reversibili, DC-4 - effetti irreversibili)

Considerazioni preliminari e sorgenti di rischio

Tipicamente, in un impianto fotovoltaico è presente un'ampia sezione di generazione in corrente continua che tende a convergere verso uno o più convertitori DC/AC o inverter (*Power Conversion Equipment* - PCE nella normativa internazionale). Come si può intuire, l'attenzione è maggiormente puntata sulla sezione in corrente continua, in quanto da un lato la sua estensione, il tipo e la numerosità dei componenti impiegati e dall'altro gli elementi di novità introdotti dalla specifica architettura impiantistica, richiedono dei criteri di progetto specifici che ben difficilmente trovano riscontro in altri impianti elettrici in bassa tensione. Dal punto di vista dello shock elettrico, sono ben noti i grafici tempo/corrente che riportano le varie zone tipicamente delimitate dalle soglie di percezione, reazione, effetti fisiopatologici reversibili ed effetti fisiopatologici irreversibili, prima fra tutte la fibrillazione ventricolare (Figura 2). La normativa a riguardo è rappresentata in primo luogo dalla CEI 64-18, di derivazione IEC/TS 60479-1. A questo riguardo è interessante osservare i diversi effetti conseguenti al passaggio della corrente nel corpo umano a seconda che:

- si abbia a che fare con corrente alternata o cor-

- rente con corrente continua;
- il percorso sia mano-piedi oppure mano-mano;
- nel caso di corrente continua la direzione della corrente sia discendente o ascendente.

Senza la pretesa di entrare nei dettagli, che richiederebbero una trattazione approfondita dell'argomento, si può affermare in via preliminare che per durate inferiori a 200 ms le soglie di pericolo per la corrente continua e la corrente alter-

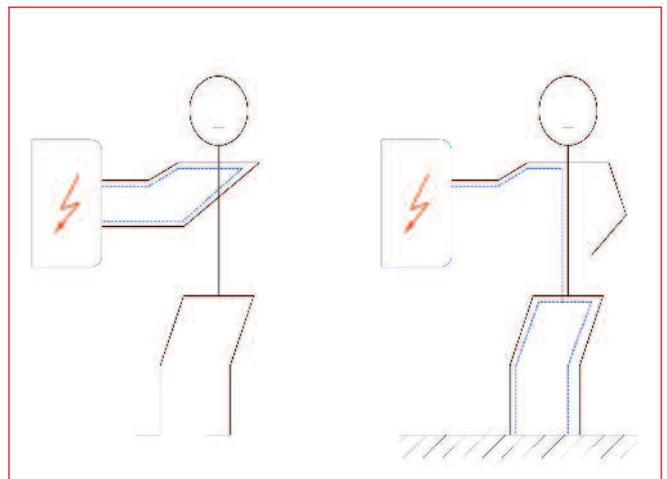


Figura 3
Rappresentazione schematica dei percorsi mano-mano e mano-piedi della corrente elettrica

nata sono molto simili, mentre per durate superiori a un ciclo cardiaco, orientativamente dai 500 ms in su, la soglia di fibrillazione per la corrente continua è di diverse volte superiore a quella per la corrente alternata a 50 Hz. Anche il percorso della corrente (Figura 3) incide significativamente sulla pericolosità, in quanto la soglia di fibrillazione per il percorso mano-mano è 2,5 volte maggiore di quello mano sinistra-piedi, il quale, tra i percorsi che interessano gli arti, è in genere considerato essere il più pericoloso. Infine, nel caso di corrente continua con percorso mano-piedi, risulta che una corrente ascendente dimezza la soglia di fibrillazione rispetto a una corrente discendente. Questo fenomeno, associato a quanto visto al punto precedente, porta a osservare che, a parità di altre condizioni, gli impianti fotovoltaici con polo positivo a terra potrebbero presentare una pericolosità maggiore dal punto di vista dello shock elettrico. Nella realtà però, il rischio di shock elettrico rappresenta solo una parte del problema e va purtroppo considerato che la minore pericolosità della corrente continua in caso di contatto accidentale, come si vedrà più oltre, molto spesso è ampiamente compensata da una maggiore difficoltà di controllo della potenza per mezzo degli organi di protezione e manovra.

Uno sguardo agli impianti

Pur volendo limitare il campo di osservazione ai soli impianti per il servizio in rete che non prevedono sistemi di accumulo energetico, ci troviamo comunque di fronte a un'ampia gamma di tipologie impiantistiche. Queste spaziano dall'utilizzo di inverter di stringa, anche con più di una sezione MPPT (*Maximum Power Point Tracker*), che ricevono in ingresso alcune stringhe di moduli FV, quasi sempre effettuandone il parallelo, fino all'impiego di inverter centralizzati verso i quali convergono decine o centinaia di stringhe di moduli FV. Da non sottovalutare inoltre la crescente diffusione dei microinverter e degli ottimizzatori di potenza che richiedono specifici approcci progettuali.

Considerando il caso classico di un certo numero di stringhe di moduli FV in parallelo, i principali aspetti di sicurezza impiantistica lato DC di cui occorre tenere conto sono:

- possibili sovracorrenti inverse;
- utilizzo e caratteristiche degli organi di manovra;
- dispersioni di corrente verso terra;
- archi elettrici serie e parallelo;
- sovratensioni di origine atmosferica.

L'instaurarsi di una sovracorrente inversa in una stringa può essere dovuta a un cortocircuito nei collegamenti o nelle connessioni all'interno della stringa stessa, ma più frequentemente si verifica a causa di ombreggiamenti, anche parziali, dei moduli FV o, anche, a causa di un loro possibile danneggiamento. A differenza della sovracorrente diretta, che è comunque limitata dalla corrente di corto circuito dei moduli FV, quest'ultima di poco superiore alla corrente nominale, la sovracorrente inversa dipende dal contributo delle altre stringhe e può raggiungere valori molto elevati, soprattutto in caso di grande numerosità. La scelta e il dimensionamento dei dispositivi di protezione (fusibili, diodi o interruttori automatici) deve essere fatta in modo corretto e a tale scopo si rivela preziosa la IEC/TS 62548 che affronta i vari possibili casi, indicando, per le più comuni tipologie di impianto, i criteri da seguire e i dispositivi applicabili. In figura 4 è riportato uno schema elettrico di validità generale in cui sono indicati gli organi di manovra e l'utilizzo delle protezioni in un campo FV suddiviso in sottocampi (uno schema elettrico analogo è contenuto anche nella CEI 64-8/7 sez. 712). Prescrizioni particolari sono inoltre previste per i campi fotovoltaici con un punto connesso a terra (positivo o negativo).

La figura 4 riporta anche un esempio di organi di manovra necessari per effettuare in sicurezza le operazioni di interruzione e/o sezionamento dei circuiti o di parti di essi. A questo proposito è importante sottolineare che può essere necessario

intervenire sulla sezione in corrente continua non soltanto in occasione delle operazioni di verifica e manutenzione, ma anche a fronte di eventi imprevedibili, al fine di evitare situazioni di pericolo o limitare i danni conseguenti a un malfunzionamento dell'impianto fotovoltaico. Al di là delle prescrizioni normative, è quindi necessario che almeno i dispositivi di manovra principali siano collocati in posti facilmente accessibili e abbiano le caratteristiche adeguate, affinché sia possibile un loro veloce azionamento in condizioni di sicurezza anche in presenza di situazioni critiche.

Le dispersioni di corrente verso terra costituiscono anch'esse un argomento di grande interesse, tenuto conto delle ampie superfici coinvolte. Occorre premettere che le misure sui moduli FV effettuate durante il funzionamento in campo hanno mostrato come, nella pratica, le dispersioni rappresentino un problema con il quale bisogna convivere e che quindi va gestito in modo consapevole. Anche sulla base di alcune esperienze e provvedimenti normativi di carattere nazionale, in primo luogo quella tedesca, la IEC/TS 62548 ha codificato a livello internazionale alcune prescrizioni importanti relative all'utilizzo dei sistemi di rilevamento. Questi ultimi si basano principalmente sulla misura dell'isolamento verso terra del campo fotovoltaico, da effettuarsi in modo automatico, con cadenza giornaliera e, preferibilmente, prima di ogni entrata in servizio. Durante il funzionamento dell'impianto, in molti casi è inoltre necessario effettuare il monitoraggio della corrente differenziale all'ingresso dell'inverter con le modalità indicate nella IEC/TS 62548.

Gli archi elettrici serie e parallelo rappresentano anch'essi una possibile fonte di pericolo, soprattutto se si tiene conto della presenza di corrente continua, la quale tende a mantenere alimentato un arco già innescato per un tempo indefinito. Un tempo i fusibili di protezione sulle stringhe rappresentavano una frequente sorgente di innesco per gli archi serie, in quanto nei quadri di parallelo stringhe non di rado si utilizzavano componenti con caratteristiche inadeguate. Oggi invece, con l'evoluzione della tecnologia, i fusibili rappresentano un problema secondario, ma è più frequente riscontrare la presenza di archi in corrispondenza dei punti di connessione quali morsettiere, crimpet non eseguiti correttamente, connettori difettosi o, anche, in moduli FV con difetti di fabbricazione (Figura 5). La IEC/TS 62548 affronta l'argomento archi elettrici, ma al momento non approfondisce l'argomento, rimandando ai pochi documenti normativi attualmente esistenti, come la UL 1699B che tratta gli AFCI (Arc Fault Circuit Interrupter). A livello internazionale è attualmente allo studio

un progetto di norma sull'argomento. Infine, le sovratensioni di origine atmosferica o, più in generale, le fulminazioni devono essere sempre prese in considerazione, anche se, per via delle caratteristiche costruttive degli impianti fotovoltaici, nella maggior parte dei casi rappresentano più un pericolo per la sicurezza dell'impianto che per la sicurezza delle persone. Le CEI EN 62305-1/4 trattano l'argomento in modo completo, tuttavia la guida CEI 81-28 consente di soffermarsi sugli aspetti che interessano maggiormente il fotovoltaico senza riportare per intero la poderosa trattazione contenuta nelle CEI EN 62305-1/4. La IEC/TS 62548 contiene anch'essa alcune utili prescrizioni a riguardo.

Componenti e apparati

I moduli fotovoltaici sono senza dubbio i componenti su cui si concentra maggiormente l'attenzione di chi si occupa di sicurezza elettrica, in quanto la loro numerosità (e quindi la loro estensione superficiale), la collocazione all'aperto, anche in climi poco ospitali, e una vita attesa comunque piuttosto lunga, fanno sì che ad essi siano richieste particolari qualità in termini di durata e affidabilità. La normativa sviluppata su questo specifico argomento ha cercato dapprima di tenere conto di un ampio spettro di esigenze con le CEI EN 61215 e CEI EN 61646, per poi approfondire, in periodi più recenti, le tematiche maggiormente mirate alla sicurezza mediante le IEC

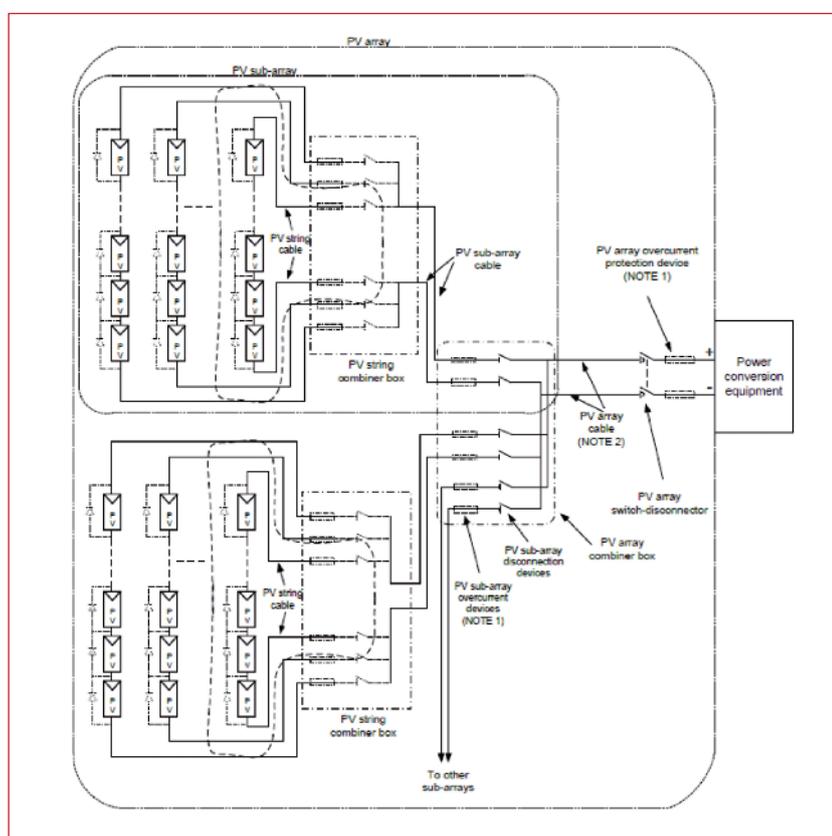
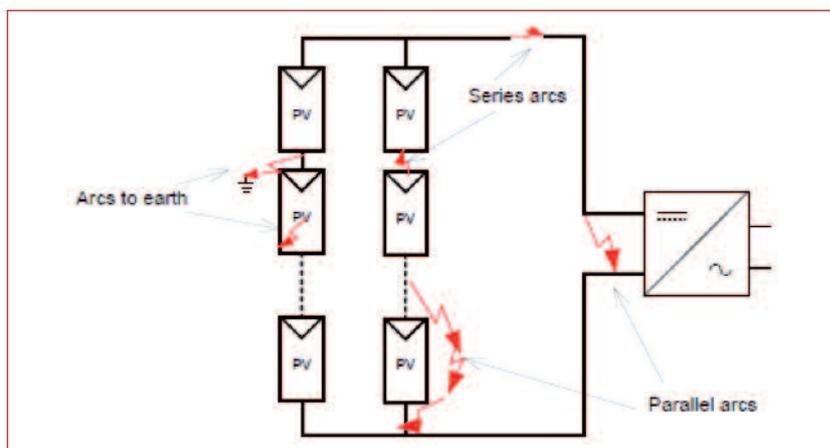


Figura 4
 Diagramma di validità generale per un campo FV suddiviso in sottocampi (IEC/TS 62548)

Figura 5
 Esempi di localizzazione di archi in un campo fotovoltaico



61730-1/2, anche se le corrispondenti CEI EN non hanno però recepito le prove di resistenza al fuoco di derivazione UL. La reazione al fuoco è di fatto uno dei temi più dibattuti in ambito internazionale, data la vulnerabilità all'incendio riscontrata talvolta negli impianti fotovoltaici. A tale fine, la UL1703 nel 2013 ha rivisto la sezione *Fire tests*, considerando anche il sistema composto dal tetto e dai moduli FV visti come sistema unico, in aggiunta o, anche, in alternativa alla situazione attuale che considera le prove da effettuare su un campione di moduli FV presi separatamente. A livello europeo anche il CENELEC si sta muovendo in tal senso ed è attualmente in corso lo sviluppo di una norma che permetterà di valutare il comportamento al fuoco delle coperture in presenza dei moduli FV. Questa norma terrà conto della normativa europea UNI EN 13501-5 e UNI ENV 1187 in termini di classificazione dei materiali e di prove di esposizione al fuoco. È indubbio che una normativa condivisa a livello europeo potrebbe facilitare l'armonizzazione dei vari provvedimenti adottati dai singoli Paesi in termini di prevenzione incendi in presenza di impianti FV, permettendo nel contempo di condividere le esperienze effettuate in tal senso.

Negli ultimi anni progressi notevoli si sono registrati anche nella componentistica in corrente continua mediante una serie di norme appositamente studiate. Le CEI EN 50548 e CEI EN 50521, rispettivamente per le scatole di giunzione e per i connettori hanno permesso di disciplinare una materia, altrimenti controversa, in un mercato sempre più popolato da produttori di varia provenienza. I cavi, tipicamente appannaggio di normative nazionali, avevano per lungo tempo sofferto di una carenza di offerta di prodotti con caratteristiche adeguate e riconosciute anche in Italia, almeno fino a quando non ha visto la luce la CEI 20-91, che ha permesso di disporre di prodotti di qualità adeguata e certificata. Il CENELEC ha poi recentemente provveduto ad armonizzare a livello europeo le caratteristiche dei cavi solari mediante la EN 50618.

Tuttavia, le apparecchiature che più hanno sofferto, anche in tempi recenti, di una carenza normativa e che hanno forse generato il maggior numero di problemi legati alla sicurezza sono stati i quadri di parallelo stringhe. Questa particolare tipologia di apparati si è trovata spesso nel crocevia di particolari problemi, ancora non del tutto risolti, i quali possono essere classificati nel modo seguente.

- **Componentistica:** l'evoluzione di componenti affidabili per l'utilizzo nelle sezioni DC degli impianti fotovoltaici è stata lunga e non indolore. Si pensi, ad esempio, ai fusibili che non sempre risultavano adeguati, agli interruttori non sempre affidabili e agli SPD (Surge Protection Device)

con le ben note difficoltà di intervento della protezione di fine vita in presenza di basse correnti.

- **Installazione:** l'installazione all'aperto, talvolta in condizioni inidonee, e in luoghi soggetti alla luce solare diretta soprattutto nel lungo periodo, hanno messo a dura prova i quadri di parallelo stringhe che non sempre hanno resistito. Talvolta si è assistito all'installazione di queste apparecchiature in luoghi decisamente impropri, come ad esempio all'interno di serre.

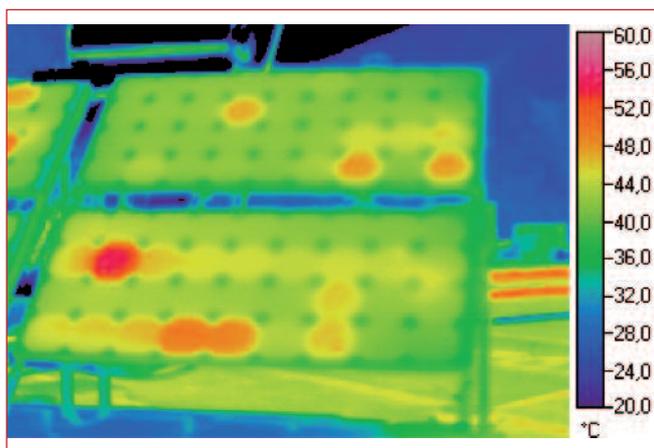
- **Normativa:** le norme sui quadri elettrici della serie CEI EN 61439 sono applicabili con difficoltà ai quadri di parallelo stringhe, anche se è attualmente in corso lo sviluppo di una norma specifica della stessa serie. Invece, la norma esistente, ossia la CEI EN 62093, pur rivolgendosi ai componenti FV esclusi i moduli non prende sufficientemente in considerazione i quadri di parallelo stringhe. Molti costruttori hanno quindi considerato questa norma troppo generica e, purtroppo, come conseguenza, la stessa è stata scarsamente applicata. Maggiore fortuna ha avuto invece la norma CEI EN 50178 che, trattando la sicurezza degli apparati elettronici di potenza, fornisce comunque un minimo livello di garanzia del prodotto.

Come risultato di tutti questi fattori, i quadri di parallelo stringhe sono spesso diventati protagonisti di incidenti di origine elettrica che sono sfociati talvolta in lesioni degli addetti o, anche, in veri e propri incendi. Attualmente però, la disponibilità di componenti idonei e certificati, come ad esempio i fusibili e gli IMS (Interruttori di Manovra-Sezionatori), anche dotati di protezione automatica, per corrente continua, unitamente a un generale miglioramento delle caratteristiche costruttive dei quadri, derivante dall'esperienza, ne ha incrementato significativamente l'affidabilità. Si resta ancora in attesa di un opportuno inquadramento normativo, sul quale però attualmente, come si è detto, si sta lavorando a livello internazionale.

Gli inverter sono anch'essi oggetto di attenzione quando si parla di sicurezza elettrica. Come nel caso dei quadri di parallelo, attraverso di essi transita tutta la potenza dell'impianto fotovoltaico e quindi questi apparati possono essere sicuramente visti come dei candidati ideali per l'insorgenza potenziale di problemi di tipo elettrico e termico. Tuttavia, notevoli passi avanti sono stati fatti con l'introduzione delle CEI EN 62109-1/2, che rappresentano un importante riferimento condiviso a livello internazionale. Attualmente, si sta lavorando a un nuovo documento della serie IEC 62109 riguardante più specificatamente gli apparati elettronici integrati nei moduli FV, rappresentati principalmente dai microinverter e dagli ottimizzatori di potenza.

Collaudo e manutenzione

Benché una progettazione a regola d'arte e la scelta di idonei componenti e apparati rappresentino sicuramente i requisiti principali a garanzia della sicurezza di un impianto FV, è tuttavia necessario che anche la fase realizzativa sia effettuata con i dovuti criteri e le eventuali varianti in corso d'opera non comportino uno scadimento dei livelli di sicurezza inizialmente previsti. A questo fine, le operazioni di collaudo si rivelano particolarmente preziose perché, oltre a verificare le prestazioni delle varie parti dell'impianto,



▲ Figura 6
Esempio di moduli FV con evidenti hot-spot individuati a mezzo di termocamera

to, permettono di individuare anzitempo quelle situazioni di pericolo che potrebbero manifestarsi successivamente nel corso del normale esercizio. Le norme che trattano le tematiche delle verifiche e dei collaudi per gli impianti elettrici, come ad esempio la CEI 64-8/6 per la bassa tensione, contengono dei concetti basilari per molte tipologie di attività. Tuttavia, importanti prescrizioni e suggerimenti per gli impianti fotovoltaici sono contenuti nella CEI EN 62446, la quale prende in esame la documentazione di impianto, le prove di accettazione e la verifica ispettiva. Data l'importanza dell'argomento, la norma è attualmente oggetto di revisione, soprattutto al fine di ampliarne alcune parti, quali ad esempio l'ispezione dei moduli FV con l'uso di termocamera, quest'ultima particolarmente utile nell'individuazione di *hot-spot* (Figura 6), dovuti a difetti localizzati quali ad esempio imperfezioni o rotture di celle.

A livello internazionale si sta anche lavorando su un progetto di norma interamente dedicata alla manutenzione degli impianti FV. Tale norma che avrà come sigla 62446-2, si occuperà della manutenzione preventiva e correttiva nei loro vari aspetti, e fornirà inoltre alcune utili indicazioni in merito alla ricerca guasti. Per il momento però, i principali riferimenti normativi rimangono quelli relativi agli impianti elettrici, tra cui la CEI 11-27 e la CEI 0-10.

BIBLIOGRAFIA

- [1] H. Laukamp et al.: PV Systems. A fire hazard? Myths and facts from German experience, *PVSEC Conference*, Hangzhou 2012.
- [2] H. Laukamp et al.: PV fire hazard. Analysis and assessment of fire incidents, *PVSEC Conference*, Paris 2013.
- [3] J. A. Tsanakas, P. N. Botsaris: Non-destructive in situ evaluation of a PV module performance using infrared thermography, *CM&MFPT Conference*, Dublin 2009.
- [4] CEI 64-18: *Effetti della corrente elettrica attraverso il corpo umano e degli animali domestici. Parte 1: Aspetti generali.*
- [5] IEC/TS 62548: *Photovoltaic (PV) arrays - Design requirements.*
- [6] CEI 64-8: *Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1.000 V in corrente alternata e a 1.500 V in corrente continua.*
- [7] UL 1699B: *Photovoltaic (PV) DC arc-fault circuit protection.*
- [8] CEI EN 62305-1/4 *Protezione contro i fulmini (Parti 1, 2, 3, 4).*
- [9] CEI 81-28: *Guida alla protezione contro i fulmini degli impianti fotovoltaici.*
- [10] CEI EN 61215: *Moduli fotovoltaici (FV) in silicio cristallino per applicazioni terrestri - Qualifica del progetto e omologazione del tipo.*
- [11] CEI EN 61646: *Moduli fotovoltaici (FV) a film sottile per usi terrestri - Qualificazione del progetto e approvazione di tipo*
- [12] CEI EN 61730-1/2: *Qualificazione per la sicurezza dei moduli fotovoltaici (FV) (Parti 1 e 2).*
- [13] UNI EN 13501-5: *Classificazione al fuoco dei prodotti e degli elementi da costruzione - Parte 5: Classificazione in base ai risultati delle prove di esposizione dei tetti a un fuoco esterno.*
- [14] UNI ENV 1187: *Metodi di prova per tetti esposti al fuoco dall'esterno.*
- [15] CEI EN 50548: *Scatole di giunzione per moduli fotovoltaici.*
- [16] CEI EN 50178: *Apparecchiature elettroniche da utilizzare negli impianti di potenza*
- [17] CEI EN 50521: *Connettori per sistemi fotovoltaici - Prescrizioni di sicurezza e prove*
- [18] CEI 20-91: *Cavi elettrici con isolamento e guaina elastomerici senza alogeni non propaganti la fiamma con tensione nominale non superiore a 1.000 V in corrente alternata e 1.500 V in corrente continua per applicazioni in impianti fotovoltaici.*
- [19] EN 50618: *Electric cables for photovoltaic systems.*
- [20] CEI EN 61439-1/2: *Apparecchiature assiemate di protezione e di manovra per bassa tensione (quadri BT) (parti 1 e 2).*
- [21] CEI EN 62093: *Componenti di sistemi fotovoltaici - moduli esclusi (BOS) - Qualifica di progetto in condizioni ambientali naturali.*
- [22] CEI EN 62109-1/2: *Sicurezza degli apparati di conversione di potenza utilizzati in impianti fotovoltaici di potenza (parti 1 e 2).*
- [23] CEI 11-27: *Lavori su impianti elettrici.*
- [24] CEI 0-10: *Guida alla manutenzione degli impianti elettrici.*