

I moduli fotovoltaici e il loro collegamento

DALLA CELLA AL MODULO FOTOVOLTAICO: STRUTTURA DEI MODULI, COLLEGAMENTO, ARRAY E DISPOSITIVI DI PROTEZIONE DA OMBREGGIAMENTO E SOVRATENSIONI

di **FRANCESCO GROPPI**

Grazie alle celle fotovoltaiche è possibile la conversione diretta dell'energia solare in energia elettrica. Tuttavia, non è quasi mai possibile utilizzare separatamente le celle per via della loro ridotta potenza. Si tratta inoltre di elementi fragili che necessitano adeguata protezione dalle aggressioni degli agenti atmosferici e dagli sforzi meccanici. Collegando elettricamente le celle fotovoltaiche tra loro in serie (qualche volta anche in parallelo) è però possibile ottenere un assieme che, opportunamente incapsulato e irrigidito, può essere utilizzato più agevolmente; a questo dispositivo è stato dato il nome di modulo fotovoltaico. I moduli fotovoltaici dispongono di un'ampia superficie frontale piana e hanno aspetto rettangolare, come nell'esempio in figura 1.

Le modalità di realizzazione e le caratteristiche dei moduli fotovoltaici possono variare moltissimo a seconda che siano formati con celle in silicio cristallino (mono- o poli-) o a film sottile.

Nel primo caso si ha a che fare con celle rigide dello spessore di circa $0,2 \div 0,3$ mm e larghezza variabile solitamente tra 10 e 15 cm, nel secondo con film semiconduttori dello spessore di qualche micron depositati su un supporto isolante. Nel caso del silicio cristallino, la prima preoccupazione è allora quella di fornire un supporto sufficientemente rigido per evitare che sotto l'a-



▲ **Figura 1:** Modulo fotovoltaico da 72 celle policristalline

zione degli sforzi meccanici ai quali può essere sottoposto il modulo fotovoltaico le celle possano incrinarsi o spezzarsi. La soluzione al problema è stata trovata nell'utilizzo di un vetro anteriore temperato dello spessore di $3 \div 4$ mm, il quale oltretutto costituisce anche un'ottima protezione contro gli agenti atmosferici. La composizione del vetro deve essere a basso contenuto di ferro al fine di aumentarne la trasparenza.

Le celle fotovoltaiche, che si presentano all'assemblaggio con i contatti elettrici anteriori e posteriori già predisposti, vengono appoggiate sul vetro a matrice (per esempio, in moduli da 36 celle si possono avere 4 file di 9 celle ciascuna) e collegate elettricamente tra loro in serie utilizzando sottili nastri metallici elettrosaldati. Le terminazioni di questi devono poi essere riportate all'esterno per realizzare il collegamento elettrico.

Il numero di celle presenti per ogni singolo modulo fotovoltaico può variare a seconda del modello e della potenza; fino a qualche anno or sono i valori più diffusi erano 36 e 72.

Tra il vetro e le celle fotovoltaiche, così come sul retro di queste, viene interposto un sottile foglio

di vinil-acetato di etilene (EVA) contenente additivi che ne ritardano l'ingiallimento causato dall'esposizione ai raggi ultravioletti durante la vita operativa del modulo. Lo scopo dell'EVA è triplice: evitare un contatto diretto tra celle e vetro, eliminare gli interstizi che altrimenti si formerebbero a causa della superficie non perfettamente liscia delle celle e isolare elettricamente la parte attiva dal resto del laminato.

La protezione del retro del modulo è invece ottenuta per mezzo di un foglio di materiale plastico di particolare resistenza (Tedlar o simili) oppure facendo ricorso anche in questo caso a un vetro, quest'ultimo però generalmente di spessore inferiore rispetto a quello anteriore.

L'assieme così ottenuto è infine sottoposto al processo di laminazione in condizioni di temperatura e pressione controllate, così da incollare stabilmente tra loro i vari strati.

La maggior parte dei moduli fotovoltaici è poi provvista di cornice di alluminio sul bordo, fissata con sigillante siliconico o uno speciale nastro. La cornice irrobustisce l'assieme e facilita il montaggio meccanico del componente. In figura 2 è visibile la struttura di un modulo fotovoltaico con cornice.

Le terminazioni dei collegamenti tra le celle fotovoltaiche, dopo essere state portate all'esterno sul retro del modulo o, in qualche caso, su un fianco, devono essere adeguatamente protette per mezzo di una scatola di giunzione (figura 3), la quale costituisce anche l'interfaccia elettrica con l'impianto. In alcuni casi è presente una morsettiere di collegamento, ma più frequentemente si utilizzano degli spezzoni di cavo con terminazioni a connettore unipolare a innesto rapido. Al fine di evitare l'entrata di acqua e assicurare un grado di protezione adeguato, la scatola di giunzione e i connettori hanno un grado di protezione che può variare da IPX5 a IPX7. Nella scato-

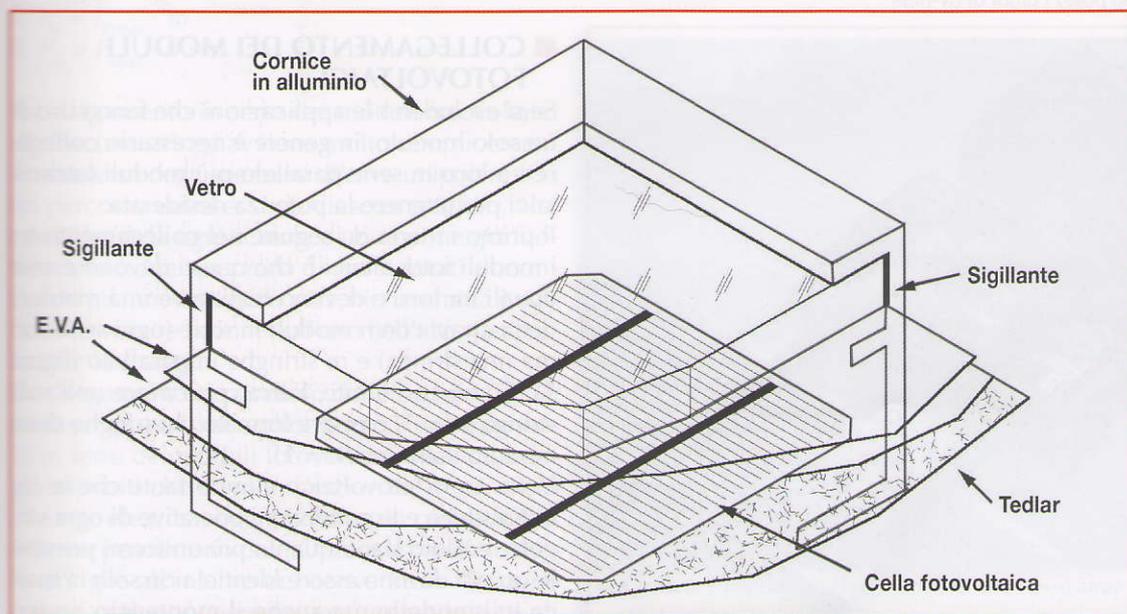
la di giunzione sono anche presenti i diodi di by-pass.

La potenza dei moduli fotovoltaici è espressa in watt di picco (CEI EN 61194), la quale corrisponde alla potenza misurata ai morsetti in condizioni STC e si indica con la notazione W o Wp. Analogamente a quanto avviene per le celle, anche per i moduli fotovoltaici sono fornite le caratteristiche elettriche e le prestazioni. La norma CEI EN 50380 stabilisce le informazioni minime da riportare nelle targhette posteriori e nei data-sheet. Nella tabella 1 sono riportati alcuni valori tipici.

Le curve tensione-corrente dei moduli fotovoltaici sono simili a quelle già viste per le celle ma con valori (tipicamente di tensione) ben maggiori. Lo stesso dicasi per le famiglie di curve ottenute variando l'irraggiamento e la temperatura di cella.

La temperatura nominale di lavoro di cella o NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) è la temperatura media di equilibrio di una cella solare all'interno di un modulo posto in condizioni ambientali normalizzate con irraggiamento di 800 W/m^2 , temperatura ambiente di 20°C e velocità del vento di 1 m/s , elettricamente a circuito aperto e installato su un telaio in modo tale che al mezzogiorno solare i raggi incidano normalmente sulla sua superficie esposta (CEI EN 60904-3).

La tensione massima di sistema è la tensione a circuito aperto del sistema a STC (CEI EN 61215). In figura 4 è possibile vedere un tipico schema di collegamento interno di un modulo da 36 celle. Sono visibili i diodi di by-pass contenuti nella scatola di giunzione. La loro presenza è necessaria nel caso in cui più moduli fotovoltaici vengano collegati in serie, per evitare che l'oscuramento accidentale di una cella possa provocare la sua polarizzazione inversa da parte delle altre. Infat-



◀ **Figura 2:** Struttura di un modulo fotovoltaico in silicio cristallino con cornice

TABELLA 1: Valori tipici per i dati di targa dei moduli fotovoltaici

Descrizione	Acronimo e unità di misura	Valori tipici
Potenza nominale o di picco	P_{MAX} [W], [Wp]	—
Tolleranza sulla potenza nominale	%	$\pm 3\%$, $\pm 5\%$, $\pm 10\%$
Tensione nel punto di massima potenza	V_{Pmax} [V]	17÷18 V per 36 celle in serie 34÷36 V per 72 celle in serie
Tensione a circuito aperto	V_{OC} [V]	20÷22 V per 36 celle in serie 40÷44 V per 72 celle in serie
Corrente nel punto di massima potenza	I_{Pmax} [A]	—
Corrente di cortocircuito	I_{SC} [A]	—
Variazione della tensione V_{OC} con la temperatura	β , C_T [mV/°C]	-80÷-90 mV/°C per 36 celle in serie -160÷-180 mV/°C per 72 celle in serie
Variazione della corrente I_{SC} con la temperatura	α	0,03÷0,09 %/°C
Variazione della potenza nominale P_{MAX} con la temperatura	γ	-0,4÷-0,5 %/°C
Temperatura nominale di lavoro di cella	NOCT [°C]	40÷50 °C
Tensione massima di sistema	V_{max} [V]	600 V, 800 V, 1000 V

ti, la tensione inversa che le celle fotovoltaiche riescono a sopportare non va generalmente oltre qualche decina di volt, da qui la necessità dei diodi di by-pass su ogni modulo.

I moduli fotovoltaici sono componenti dai quali ci si aspetta una notevole robustezza e affidabilità: essendo collocati all'aperto, sono continuamente sottoposti all'azione di sole, vento, intemperie, sbalzi termici. Si tratta di un servizio gravoso che deve poter continuare per almeno 20 anni, periodo quest'ultimo che rappresenta la vita minima attesa per questi componenti. In tale periodo, le prestazioni non devono degradare oltre un certo livello.

Sono state quindi codificate una serie di prove di tipo, ossia effettuate su alcuni campioni, finalizzate a valutare l'effettiva rispondenza dei modu-

li ai requisiti di robustezza ritenuti necessari affinché da un modulo fotovoltaico ci si possa attendere una durata sufficiente.

La norma CEI EN 61215 riporta le prove di tipo per i moduli in silicio cristallino, mentre la CEI EN 61646, molto simile, fa riferimento ai moduli in film sottile. Molto impiegate sono anche le recenti CEI EN 61730-1 e CEI EN 61730-2.

Anche se meno utilizzate, vi sono poi la prova di corrosione da nebbia salina (CEI EN 61701) e la prova alla radiazione ultravioletta (CEI EN 61345), quest'ultima utilizzata soprattutto per saggiare la resistenza dei rivestimenti frontali di tipo polimerico per alcuni tipi di moduli fotovoltaici.

Un'ulteriore caratteristica che possono avere i moduli fotovoltaici, molto importante nell'utilizzo in impianti allacciati alla rete, è l'isolamento di classe II (doppio isolamento o isolamento rinforzato) verso l'esterno.

▼ **Figura 3:** Esempio di scatola di giunzione di un modulo fotovoltaico, all'interno trovano posto i diodi di by-pass

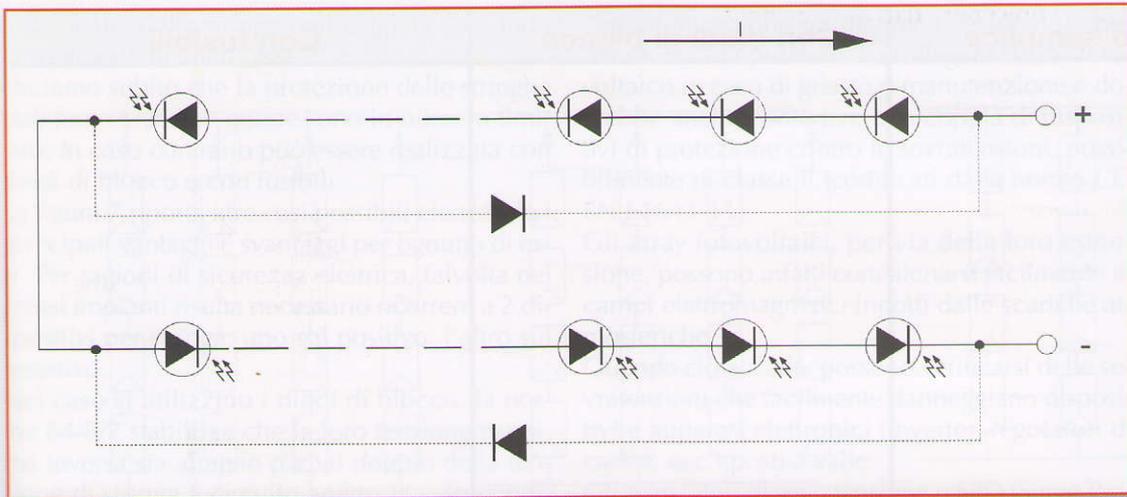


■ COLLEGAMENTO DEI MODULI FOTOVOLTAICI

Se si escludono le applicazioni che fanno uso di un solo modulo, in genere è necessario collegare tra loro in serie/parallelo più moduli fotovoltaici per ottenere la potenza desiderata.

Il primo criterio da seguire nel collegamento tra i moduli fotovoltaici è che questi devono essere uguali tra loro e devono realizzare una matrice, detta array, con n moduli in serie (ogni serie forma una stringa) e m stringhe in parallelo (figura 5). Come casi limite, l'array può avere una sola stringa ($m = 1$) o essere formato da stringhe di un modulo ciascuno ($n = 1$).

In un array fotovoltaico è importante che le caratteristiche e le condizioni operative di ogni singolo modulo siano quanto più uniformi possibili, quindi devono essere identici non solo la marca e il modello ma anche il montaggio, in ter-



◀ **Figura 4:** Tipico schema di collegamento interno di un modulo da 36 celle

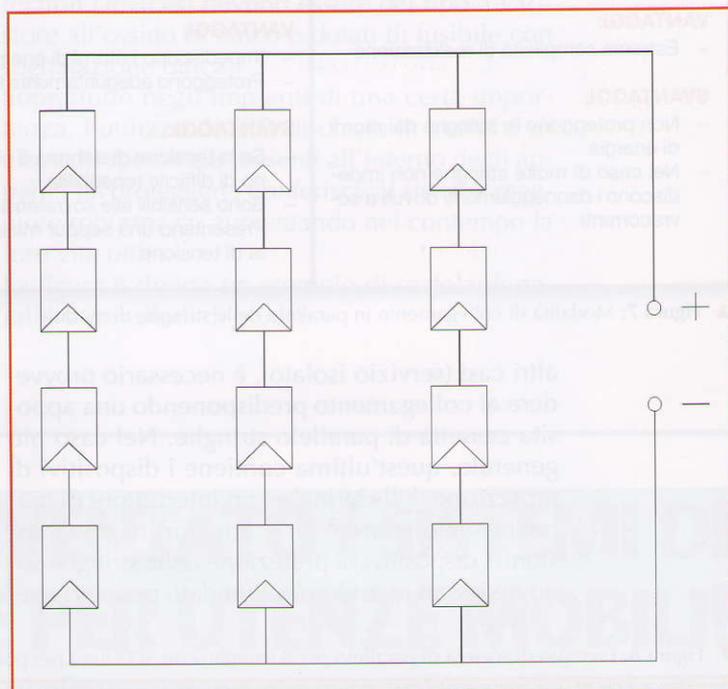
mini di inclinazione e orientamento (figura 6). Eventuali sbilanciamenti si traducono in perdite di efficienza, dette *string-mismatch*, che possono essere anche considerevoli. Le perdite di efficienza sono comunque, in una certa misura, sempre presenti per via delle tolleranze di fabbricazione dei componenti.

Da un punto di vista qualitativo, il comportamento elettrico di un array fotovoltaico è simile a quello dei moduli che lo compongono, i quali a loro volta rispecchiano, amplificata, la curva tensione-corrente delle celle contenute. Anche in questo caso si è in presenza della tensione a circuito aperto U_{OC} , della corrente di cortocircuito $I_{SC-array}$ e della coppia di valori U_M e I_M in corrispondenza del punto di massima potenza. La potenza di picco dell'array, indicata con P_0 , è data dalla potenza nominale a STC del singolo modulo moltiplicata per il numero di moduli presenti (CEI EN 61194). Risulta allora:

- $U_{OC} = V_{OC} \cdot n$
- $U_M = V_{pmax} \cdot n$
- $I_{SC-array} = I_{SC} \cdot m$
- $I_M = I_{pmax} \cdot m$
- $P_0 = P_{max} \cdot n \cdot m$

Il collegamento in serie dei moduli fotovoltaici di ciascuna stringa avviene molto semplicemente attraverso degli spezzoni di cavo unipolare con un percorso entra-esce da ciascun modulo. Nel caso in cui da ogni scatola di giunzione già fuoriescano i due spezzoni di cavo dotati di connettori ad innesto rapido maschio/femmina è sufficiente inserire i connettori uno nell'altro per realizzare la stringa.

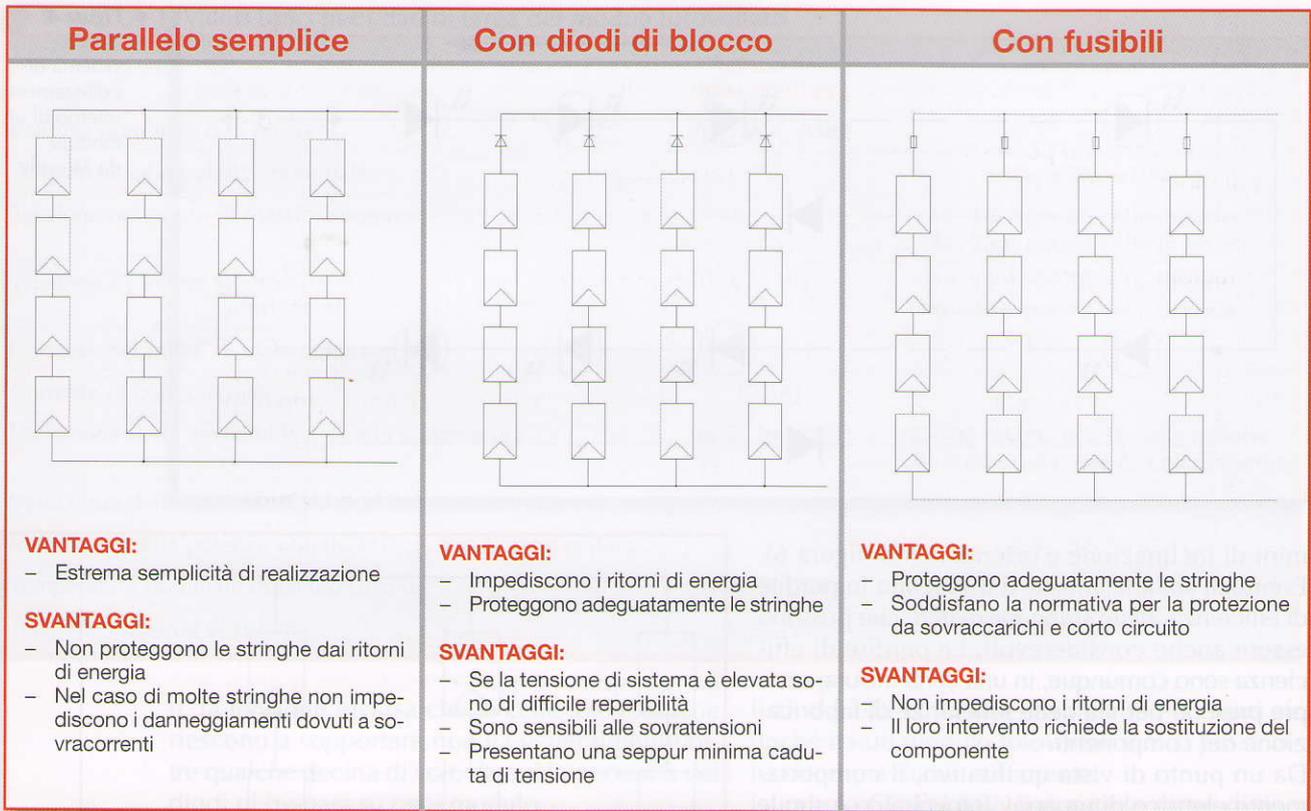
Il collegamento in parallelo delle stringhe non è però sempre così semplice come il collegamento in serie dei moduli fotovoltaici. Nel caso degli impianti che devono funzionare in parallelo alla rete elettrica, oggi giorno molti costruttori di inverter permettono di realizzare il parallelo delle stringhe all'interno del convertitore. Tuttavia, quando ciò non avviene, così come in tutti gli



▲ **Figura 5:** Esempio di array fotovoltaico con 3 stringhe da 4 moduli ciascuna ($n = 4$, $m = 3$)



▲ **Figura 6:** È importante che i moduli di uno stesso array siano orientati nella medesima direzione

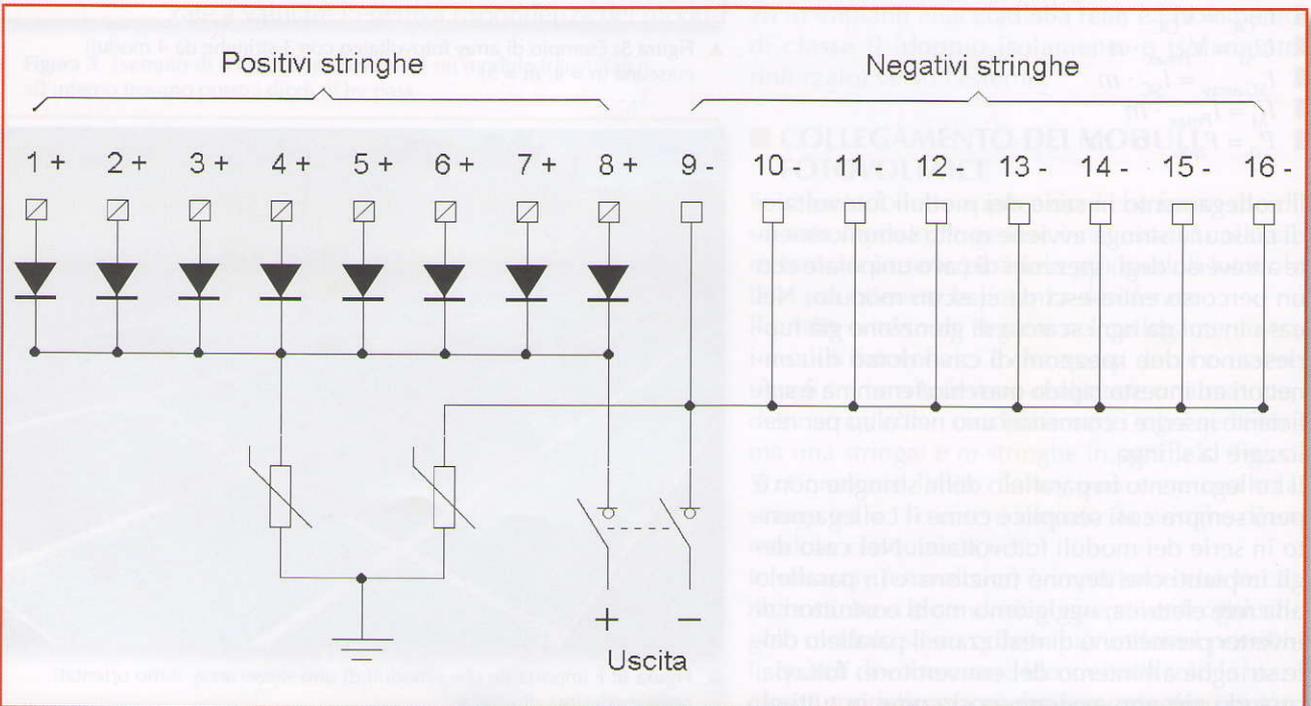


▲ **Figura 7:** Modalità di collegamento in parallelo delle stringhe di moduli

altri casi (servizio isolato), è necessario provvedere al collegamento predisponendo una apposita cassetta di parallelo stringhe. Nel caso più generale, quest'ultima contiene i dispositivi di protezione delle stringhe, un interruttore di manovra-sezionatore e gli scaricatori di sovratensioni. I dispositivi di protezione delle stringhe sono necessari quando c'è il fondato pericolo che,

a causa di un ombreggiamento parziale dell'array, in contemporanea con qualche altro inconveniente, come ad esempio il fuori servizio dell'inverter, una delle stringhe possa avere ai suoi capi una tensione talmente bassa da ricevere la corrente prodotta dalle stringhe rimanenti. Se le stringhe sono tante, la corrente impressa potrebbe assumere valori intollerabili per i moduli

▼ **Figura 8:** Esempio di scatola di parallelo per 8 stringhe con SPD (uno per polo) e interruttore di manovra-sezionatore



fotovoltaici della stringa ombreggiata causando la rottura di alcuni di essi.

Diciamo subito che la protezione delle stringhe può non esserci se queste sono in numero limitato. In caso contrario può essere realizzata con diodi di blocco o con fusibili.

La figura 7 riporta i tre casi possibili elencando i principali vantaggi e svantaggi per ognuno di essi. Per ragioni di sicurezza elettrica, talvolta nei grossi impianti risulta necessario ricorrere a 2 dispositivi per stringa, uno sul positivo, l'altro sul negativo.

Nel caso si utilizzino i diodi di blocco, la norma 64-8/7 stabilisce che la loro tensione massima inversa sia almeno pari al doppio della tensione di stringa a circuito aperto U_{OC} in condizioni STC.

La corrente diretta massima dei diodi deve essere superiore alla corrente di corto circuito dei singoli moduli e, per maggiore sicurezza, è bene che sia almeno pari a $1,25 \times I_{SC}$.

Per i fusibili è importante il tipo (gR), la tensione massima di lavoro e la corrente nominale di intervento, che normalmente deve essere compresa tra 1,4 e 2 volte la I_{SC} .

Almeno al di là di una certa potenza (500 + 1000 Wp), la scatola di parallelo deve contenere an-

che un interruttore di manovra-sezionatore per dar modo all'operatore di scollegare l'array fotovoltaico in caso di guasto o manutenzione e dovrebbe anche contenere una coppia di dispositivi di protezione contro le sovratensioni, possibilmente di classe II (codificati dalla norma CEI EN 61643-11).

Gli array fotovoltaici, per via della loro estensione, possono infatti concatenarsi facilmente ai campi elettromagnetici indotti dalle scariche atmosferiche.

Quando ciò accade, possono verificarsi delle sovratensioni che facilmente danneggiano dispositivi e apparati elettronici (inverter, regolatori di carica, ecc.) posti a valle.

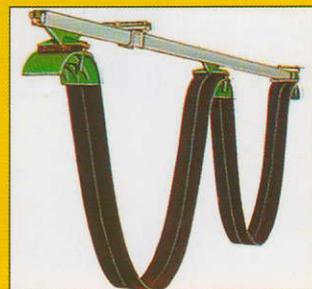
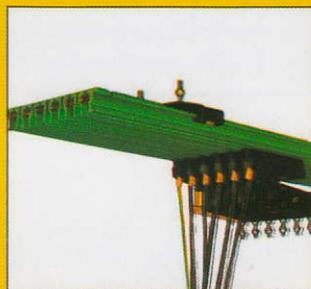
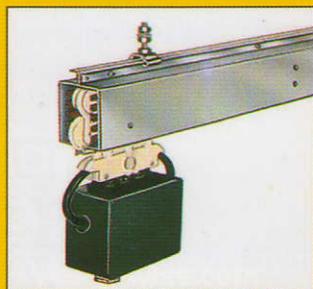
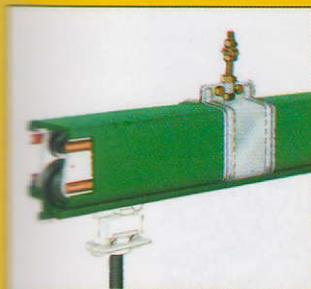
Gli scaricatori di sovratensione o SPD (Surge Protection Devices) devono essere del tipo a varistore all'ossido di zinco e dotati di fusibile con segnalazione ottica.

Soprattutto negli impianti di una certa importanza, l'utilizzo di SPD di classe II, anziché di classe III spesso già presenti all'interno degli apparati da proteggere, conferisce al sistema maggiore robustezza, aumentando nel contempo la loro vita utile.

La figura 8 riporta un esempio di scatola di parallelo con diodi di blocco.

VAHLE HA INVENTATO I SISTEMI DI ELETTTRIFICAZIONE PER UTENZE MOBILI!

VAHLE costruisce moderni e sicuri sistemi di alimentazione elettrica impiegati in tutti settori industriali dove occorre trasferire energia, comandi o dati, ad utilizzatori mobili, in particolare per acciaierie, industria automobilistica, costruttori macchine, porti industriali, cantieri, logistica della movimentazione materiali e trasporto persone.



VAHLE 
SISTEMI DI ELETTTRIFICAZIONE

VAHLE s.r.l.
Via Bergamo; 24/A
20098 S. Giuliano Milanese (MI)
Tel. 02/98282470
Fax 02/98281787
E-mail: info@vahle.it - www.vahle.it