

Calcolo della portata e coordinamento con le protezioni per i cavi dei circuiti in c.c. degli impianti fotovoltaici

di Silvia Berri e Giuseppe Bosisio

Questo articolo intende chiarire alcuni aspetti progettuali per un corretto dimensionamento dei cavi e, ove necessarie, delle relative protezioni in corrente continua di impianti fotovoltaici, indicando nel contempo i principali errori da evitare.

La guida CEI 82-25 *"Guida alla realizzazione di sistemi di generazione fotovoltaica collegati alle reti elettriche di Media e Bassa Tensione"* dedica un ampio spazio alla definizione delle caratteristiche ed al dimensionamento dei cavi e delle apparecchiature elettriche per il lato corrente continua.

Infatti, la concomitanza di diversi fattori, rende i circuiti in corrente continua particolarmente insidiosi per diversi motivi quali:

- hanno una doppia alimentazione: lato generatore e lato inverter;
- la tensione è sempre presente durante le ore diurne e spesso a valori elevati (rispetto agli abituali circuiti 230 - 400 V .c.a);
- a differenza dei circuiti in corrente alternata, la tensione non si azzerava durante il funzionamento normale dell'impianto (in corrente alternata 50 Hz questo avviene 100 volte al secondo), questo rende molto più problematica l'interruzione della corrente da parte dei dispositivi di comando;
- le caratteristiche elettriche di generazione sono tali che la corrente di cortocircuito della singola stringa di moduli sia "solo" circa il 10% più alta della corrente nominale.

L'articolo richiama inoltre le seguenti Norme:

- CEI 64-8 "Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e 1500 V in corrente continua."
 - Parte 4 - prescrizioni per la sicurezza
 - Parte 5 - scelta ed installazione dei componenti elettrici
- CEI-UNEL 35024/1 Cavi elettrici isolati con materiale elastomerico o termoplastico per tensioni nominali non superiori a 1000 V in corrente alternata e 1500 V in corrente continua Portate di corrente in regime permanente per posa in aria
- CEI-UNEL 35026: Cavi elettrici isolati con materiale elastomerico o termoplastico per tensioni nominali di 1000 V in corrente alternata e 1500 V in corrente continua. Portate di corrente in regime permanente per posa interrata
- CEI 20-91 Cavi elettrici con isolamento e guaina elastomerici senza alogeni non propaganti la fiamma con tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e 1500 V in corrente continua per applicazioni in impianti fotovoltaici

- CEI EN 60947-2 (CEI 17-5) Apparecchiature a bassa tensione - Parte 2: interruttori automatici
- CEI EN 60947-3 (CEI 17-11) Apparecchiature a bassa tensione - Parte 3: Parte 3: Interruttori di manovra, sezionatori, interruttori di manovra-sezionatori e unità combinate con fusibili
- CEI EN 60898-1 (CEI 23-3/1) Interruttori automatici per la protezione dalle sovracorrenti per impianti domestici e simili - Parte 1: Interruttori automatici per funzionamento in corrente alternata
- CEI EN 60269-1 (CEI 32-1) Fusibili a bassa tensione - Parte 1: Prescrizioni generali

Dimensionamento dei cavi in portata.

Le regole per scegliere e dimensionare correttamente le condutture elettriche in bassa tensione sono indicate nella norma CEI 64-8 parte 5 che, per il calcolo della portata dei cavi, rimanda (art 523) alle tabelle CEI UNEL 35024/1, 35024/2 per le modalità di posa in aria e 35026 per la posa interrata.

La portata dei cavi è per definizione dell'art. 523.1.1. della norma CEI 64-8 "la corrente massima ammissibile, per periodi prolungati, da qualsiasi conduttore in servizio ordinario e deve essere tale che la temperatura massima di funzionamento non superi il valore appropriato indicato nella tabella 52D (tab. 1 del presente articolo)",

Tabella 1: massime temperature di funzionamento dei materiali isolanti - tab 52D CEI 64-8

Tipo di isolamento	Temperatura massima di funzionamento ¹
Cloruro di Polivinile PVC	70° (conduttore)
Polietilene reticolato (XLPE) ed etilen-propilene	90° (conduttore)
Minerale (guaina in PVC o nudo ed accessibile)	70° (guaina metallica)
Minerale (nudo non accessibile e non in contatto con materiali combustibili)	105° (guaina metallica)
¹ Le temperature indicate in tabella 1 sono le massime di funzionamento secondo quanto riportato nelle norme CEI EN 60702 e CEI 20-39	

Tramite le tabelle CEI UNEL sopra menzionate si calcolano le portate dei cavi inserendo i seguenti dati di partenza:

- tipo di isolante, per la definizione della temperatura limite di esercizio riportato in tab. 1;
- modalità di posa, identificata tramite un codice alfa numerico come indicato nella tabella 52C della norma CEI 64-8;
- numero di conduttori sotto carico in un circuito: 2 nei circuiti c.c. e monofase, 3 per i circuiti trifase anche in presenza di conduttore di neutro a patto che non ci siano componenti armoniche di valore elevato;
- numero di circuiti ravvicinati nella conduttura o cavidotto;
- temperatura ambiente intesa come il valore della temperatura del "mezzo circostante" quando i cavi sono sotto carico.

Essendo la definizione di corrente nominale (portata) di un cavo legata agli effetti termici, ne deriva che non vi è differenza tra la portata di un cavo in corrente alternata ed in corrente continua. Infatti, in corrente alternata sinusoidale il valore indicato è il valore efficace definibile come quel valore che in regime di corrente continua svilupperebbe, per effetto Joule, gli stessi effetti termici.

E' quindi definito che le protezioni elettriche servono a fermare sovracorrenti entro i limiti per i quali le sovratemperature da queste derivanti diventerebbero pericolose per le persone e per i beni serviti dall'impianto. I cavi devono quindi essere protetti da apparecchi di protezione quali gli interruttori magnetotermici ed i fusibili con caratteristica di intervento adeguata (es. gG).

A tale proposito la norma CEI 64-8 art. 433.2 definisce tramite le due seguenti relazioni le regole per un corretto coordinamento protezione - cavo:

$$I_b \leq I_n \leq I_z$$

$$I_f \leq 1,45 I_z$$

dove:

I_b = corrente assorbita (o generata nel caso di impianti di produzione) a regime

I_z = portata effettiva del cavo

I_n = corrente nominale del dispositivo di protezione

I_f = corrente di sicuro intervento del dispositivo di protezione entro un tempo convenzionale T_c .

La figura 1 illustra in forma grafica le relazioni sopra citate.

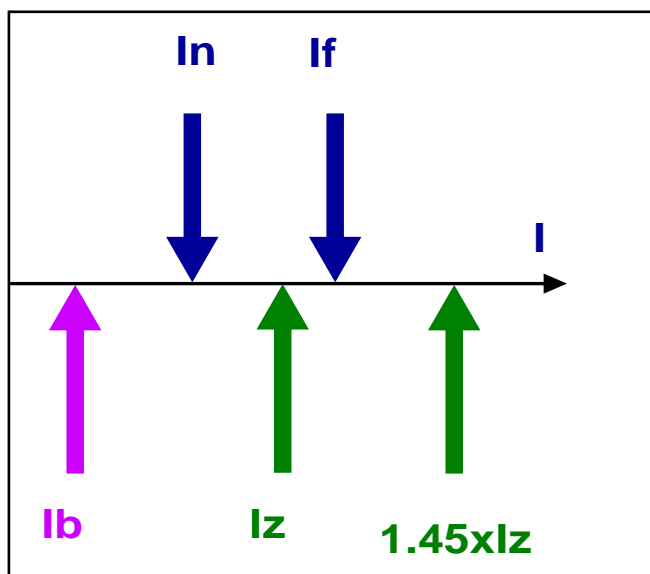


Figura 1: Coordinamento cavo interruttore

Il rapporto tra la corrente di sicuro intervento I_f e la corrente nominale è definita dalle norme di prodotto delle diverse apparecchiature. Per le più comuni valgono i seguenti valori:

- CEI EN 60898 (interruttori automatici per usi domestici e similari) $I_f = 1,45 I_n$
- CEI EN 60947-2 (interruttori automatici) $I_f = 1,3 I_n$.
- CEI EN 60269-1 (fusibili) $I_f = 1,6 I_n$

Ne deriva che, utilizzando interruttori automatici, verificata la relazione $I_n \leq I_z$ risulta anche verificata la relazione $I_f \leq 1,45 I_z$.

Per i fusibili si ha invece $I_f = 1,6 I_n$, per cui, deve essere verificata la seguente relazione:

$$1,45 \cdot I_z \leq 1,6 \cdot I_n \rightarrow \frac{1,45}{1,6} I_z \approx 0,9 \cdot I_z \leq I_n$$

E' bene chiarire che quanto sopra vale anche per i circuiti elettrici in corrente continua di impianti fotovoltaici per i quali, come vedremo in seguito, potrebbero valere diverse regole in funzione di casi particolari.

Criteri di scelta per i cavi in corrente continua.

Vale la pena riportare innanzitutto l'articolo 522.11.1 della norma CEI 64-8 in riferito alle caratteristiche richieste ai componenti elettrici soggetti all'irraggiamento diretto della luce solare: *"Quando si sappia o si preveda di avere notevoli irraggiamenti solari, si devono scegliere e mettere in opera condutture adatte a queste condizioni oppure deve essere prevista una schermatura adeguata"*.

Per il collegamento dei moduli fotovoltaici il cavo dovrà pertanto avere sia le caratteristiche adatte alla posa in esterno (possibile presenza di acqua) sia all'irraggiamento diretto della luce solare.

In quest'ottica i cavi isolati in gomma EPR (es. FG7) non sono adatti al collegamento delle stringhe in quanto possono essere posati in esterno, interrati, ma non soggetti alla luce diretta del sole come spesso avviene per i collegamenti nelle immediate vicinanze del generatore fotovoltaico.

Per le applicazioni fotovoltaiche è nata una serie di cavi adatti sia alla posa in ambiente esterno che all'irraggiamento diretto del sole. Detti cavi hanno isolante a base di gomma di qualità G21 (HEPR) sotto guaina elastomerica esente da alogeni di qualità M21

Questi cavi FG21M21 hanno una temperatura di funzionamento limite pari a 120°, la relativa norma di riferimento è la CEI 20-91, comprensiva della sua variante V1: *"Cavi elettrici con isolamento e guaina elastomerici senza alogeni non propaganti la fiamma per applicazioni in impianti fotovoltaici"* fornisce le regole ed i valori costruttivi e ne stabilisce le prescrizioni di prova.

La norma CEI 20-91 chiarisce che i cavi FG21M21 sono indicati per l'interconnessione dei vari elementi degli impianti fotovoltaici. Sono adatti per l'installazione fissa all'esterno ed all'interno, senza protezione od entro tubazioni in vista o incassate, o sistemi chiusi simili ed anche per la posa direttamente interrata o tubo interrato secondo le prescrizione della Norma CEI 11-17.

L'allegato A della norma CEI 20-91 fornisce la tabella delle portate dei cavi unipolari in aria libera con una temperatura ambiente pari a 60°C ed una temperatura sul conduttore pari a 120°C.

Tabella 2:portate nominali dei cavi in aria libera.

Sezione in [mm ²]	Portata in aria libera cavi unipolari FG21M21 - CEI 20-91 [A]	Portata in aria libera cavi unipolari isolati EPR - 2 conduttori carichi CEI UNEL 35024/1 [A]	Delta
1,5	30	27	11,1%
2,5	41	37	10,8%
4	55	50	10,0%
6	70	64	9,4%
10	98	88	11,4%
16	132	119	10,9%
25	176	161	9,3%
35	218	200	9,0%
50	276	242	14,0%
70	347	310	11,9%

95	416	377	10,3%
120	488	437	11,7%

La norma CEI 20-91 fornisce solo la portata riferita a cavi unipolari in aria libera posati in un cavidotto dedicato al singolo circuito e fornisce la tabella dei coefficienti di declassamento in funzione della sola temperatura ambiente quando superiore a 60°C (tabella 3).

Tabella 3: coefficiente di declassamento in temperatura

Temperatura ambiente °C	Fattore di conversione
fino a 60°	1
70	0,91
80	0,82
90	0,71

Per ulteriori informazioni in merito a fattori di declassamento (es posa ravvicinata di più circuiti), si viene rimandati alla norma IEC 60364-5-52 ossia l'omologa IEC della nostra CEI 64-8.

Per le altre modalità di posa, con particolare riferimento all'eventuale posa interrata dei cavi unipolari, la Variante 1 citata rimanda alla Norma CEI UNEL 35027.

Nelle tabelle CEI UNEL 35024-1, per la posa in aria libera, la temperatura ambiente di riferimento è pari a 30°. Considerando i cavi FG70 (isolati in EPR), con temperatura di funzionamento limite pari a 90° (vedi tabella 1), si trova che per lo scambio termico necessario per lo smaltimento del calore sviluppato per effetto Joule dal cavo durante il normale funzionamento, il salto di temperatura disponibile è pari sempre a 60 ° ossia lo stesso disponibile per i cavi FG21M21 secondo l'allegato A della norma CEI 20-91 ($120 - 60 = 90 - 30$).

La tabella 2 del presente articolo chiarisce inoltre che nell'unico caso comparabile (posa in aria libera, singolo circuito), utilizzare la tabella CEI UNEL 35024 -1 riferite all'isolamento in EPR per il calcolo delle portate dei cavi solari, rappresenta un calcolo in favore della sicurezza con un margine di circa il 10%.

Senza avere la presunzione di regola progettuale o di sostituzione dei dettami della normativa del CEI, per quanto sopra, il calcolo della portata dei cavi in corrente continua per impianti fotovoltaici, può essere realizzato, in favore della sicurezza, tramite le tabelle CEI UNEL 35024 -1 per i cavi in posa in aria e le tabelle CEI UNEL 35026 per i cavi in posa interrata, riferendosi ai cavi isolati in EPR anche in caso di impiego di cavi solari FG21M21.

Coordinamento protezione - cavo nei circuiti in corrente continua di impianti Fotovoltaici

Secondo quanto riportato nella norma CEI 64-8 all'art. 712.433.1 e ribadito nella guida CEI 82-25 all'art.6.1.4, *"la protezione contro i sovraccarichi può essere omessa sui cavi delle stringhe PV e dei moduli PV quando la portata dei cavi sia eguale o superiore a 1,25 volte I_{sc} STC in qualsiasi punto"*.

In pratica la normativa chiarisce che il coordinamento protezione - cavo, secondo le regole della norma CEI 64-8 art. 433, richiamate in precedenza, è necessario solo se la massima corrente

ipotizzabile (quella di cortocircuito) è inferiore alla portata del cavo, con un margine di sicurezza ampissimo: il 25%.

E' di rigore riportare un calcolo d'esempio per il dimensionamento in portata dei cavi c.c..

Sapendo che il punto di partenza per il dimensionamento dell'impianto è sempre il generatore, prendiamo l'esempio di impiego di moduli in silicio cristallino aventi le caratteristiche riportate in tabella 4.

Tabella 4: caratteristiche elettriche del modulo

Grandezza	Sigla	valore	U.M.
Potenza nominale	P_M	230	W
Tensione nel punto di massima potenza	V_M	30	V
Tensione a vuoto	V_{OC}	36,8	V
Corrente nel punto di massima potenza	I_M	7,67	A
Corrente di c.to. c.to	I_{SC}	8,08	A
Coefficiente termico in tensione	γ	-0,12	V/K

E' immediato rilevare come in caso di installazione di una singola stringa di moduli, la corrente di cortocircuito non sia superiore a qualsiasi corrente di intervento della protezione tarata sulla corrente nominale. Chiariamo: dovendo proteggere un carico di corrente I_b (nel nostro caso equivalente alla I_M) pari a 7,67 A si sceglierebbe una protezione di corrente nominale I_n standardizzata pari a 10 A che risulterebbe addirittura maggiore della corrente di corto circuito. Nell'impensabile opportunità di trovare una protezione avente corrente nominale esattamente pari a 7,67A si avrebbe in ogni caso una corrente di cortocircuito pari al 105,3% della corrente nominale della protezione. Tale sovracorrente non sarebbe comunque in grado di attivare né gli interruttori automatici (aventi I_f pari al 130% o al 145% della corrente nominale in funzione della norma di riferimento) né tantomeno i fusibili aventi una corrente convenzionale di fusione (sicuro intervento) I_f pari al 160 % della corrente nominale.

E' quindi chiarito che, nel caso della singola stringa, il cortocircuito non può essere protetto tramite i dispositivi elettromeccanici tradizionali. Rimane solo da verificare che la portata del cavo risulti superiore a $I_{sc-stc} \times 1,25$, che nel caso di impianto costituito da una singola stringa di moduli di tabella 4, significa verificare che la portata del cavo sia superiore a $8,08 \times 1,25 = 10,10$ A

Nel caso si abbiano più stringhe collegate in parallelo, il cortocircuito è alimentato da tutte le stringhe: dalla stringa guasta in alimentazione diretta e da tutte le restanti sane in contro-alimentazione.

Con riferimento alla figura 3, supponiamo di avere 5 stringhe di moduli aventi le caratteristiche riportate in tabella 4 collegate in parallelo, cablate con cavo solare FG21M21 di sezione pari a 4 mm². I cavi di collegamento delle stringhe sono posati in un'unica passerella perforata con percorso orizzontale (modalità di posta 13 secondo la tabella 52C della norma CEI 64-8).

Procedendo al calcolo della portata secondo la tabella CEI UNEL 35024-1 e considerando i valori dei cavi isolati in EPR si ottiene una portata teorica pari a 50 A (vedi tabella 2).

Con temperatura ambiente 30° non si ha declassamento mentre considerando la posa ravvicinata dei 5 circuiti si dovrà considerare un coefficiente correttivo pari a 0,75 (vedi tabella 5).

Ne deriva che la portata del cavo I_z risulta pari a $50 \cdot 0,75 = 37,5 \text{ A}$.

Tabella 5: coefficiente di correzione per circuiti ravvicinati, modalità di posa 13 tabelle CEI UNEL 35024-1

Circuiti	Coefficiente di correzione
1	1
2	0,88
3	0,82
4	0,77
5	0,75
6	0,73
7	0,73
8	0,72
≥9	0,72

La corrente di cortocircuito I_{scstc} vale invece $8,08 \times (5-1) = 32,32 \text{ A}$ ossia le 4 stringhe sane alimentano il cortocircuito avvenuto sulla stringa guasta (vedi fig.3).

Nel caso in questione quindi $32,32 \times 1,25 = 40,40 \text{ A} > 37,5 \text{ A}$. Ne deriva che i cavi di stringa devono essere protetti contro le sovracorrenti tramite interruttori automatici aventi corrente nominale compresa tra 7,67 e 37,5A oppure con fusibili aventi corrente nominale compresa tra 7,67 e 33,98 calcolato con la relazione $37,5 \times (1,45/1,6)$.

In alternativa si potrà procedere utilizzando il cavo da 6 mm² per il quale risulterà $I_z = 60 \text{ (tabella 2)} \times 1 \text{ (t ambiente } 30^\circ) \times 0,75 \text{ (5 circuiti)} = 48 \text{ A} > 40,4 \text{ A}$

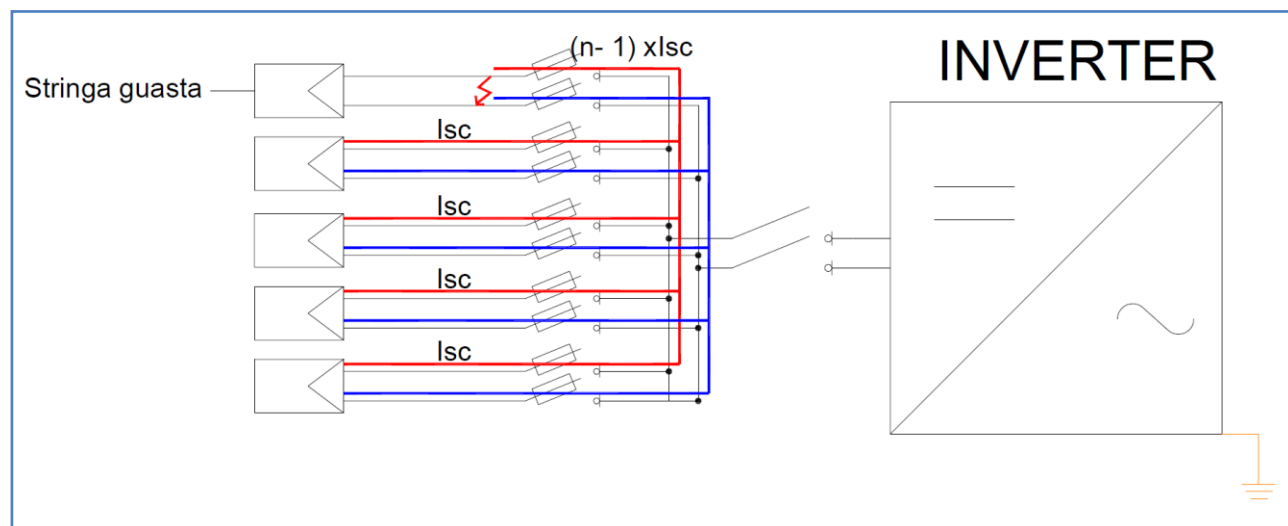


Figura 2: circuito di guasto in caso di cortocircuito sul lato c.c.

Supponiamo invece di avere un impianto di potenza nominale pari a 72,45 kW costituito da 21 stringhe da 15 moduli aventi le caratteristiche riportate in tabella 4.

Le 21 stringhe vengono collegate a gruppi di 7 in quadri di parallelo in corrente continua.

Lo schema elettrico è quello riportato in figura 4 dove sono indicati i quadri di corrente e le apparecchiature per il sezionamento il comando e la protezione previsti dalle norme. Vediamo nel particolare quali sono:

- ICCS: dispositivo di protezione di stringa - nel caso, base portafusibile
- IGQ : dispositivo generale di quadro di campo - interruttore di manovra sezionatore
- IGD : dispositivo di protezione del montante quadro c.c. - inverter, da definire in seguito ai calcoli se si tratta di un dispositivo di protezione contro le sovracorrenti o un interruttore di manovra sezionatore.
- IGCC : dispositivo generale Corrente Continua - Interruttore di manovra sezionatore

Si comincia subito con il calcolo della corrente di corto circuito nella singola stringa che risulta pari a $20 \times 8,08 = 161,6$ A. Non bisogna infatti cadere nell'errore che ad alimentare il guasto sulla singola stringa siano solo le stringhe collegate allo stesso quadro elettrico in corrente continua. Ad alimentare il guasto sono tutte le stringhe collegate in parallelo sul lato c.c.

Risultando impensabile cablare le stringhe con cavi in grado di portare una corrente così elevata, ne deriva che i cavi di stringa (solitamente 4 o 6 mm²) debbano essere protetti contro le sovracorrenti.

Veniamo invece ad un aspetto più interessante ossia il cortocircuito sul montante quadro c.c. - inverter. In questo caso, avendo realizzato quadri connessi ad un ugual numero di stringhe, il calcolo è semplificato dal fatto che le correnti di impiego e di guasto siano identiche per i tre montanti e più precisamente:

La corrente di impiego I_b risulta $7,67 \times 7 = 53,69$ A

La corrente di cortocircuito risulta $8,08 \times 14 = 113,12$ A

Per capire se i tre dispositivi "IGD" debbano essere protezioni o semplici interruttori di manovra si dovrà dimensionare il cavo in portata, infatti in caso di cavo di portata maggiore di $113,12 \times 1,25 = 141,25$ A non sarà necessario provvedere alla protezione dei montanti contro le sovracorrenti.

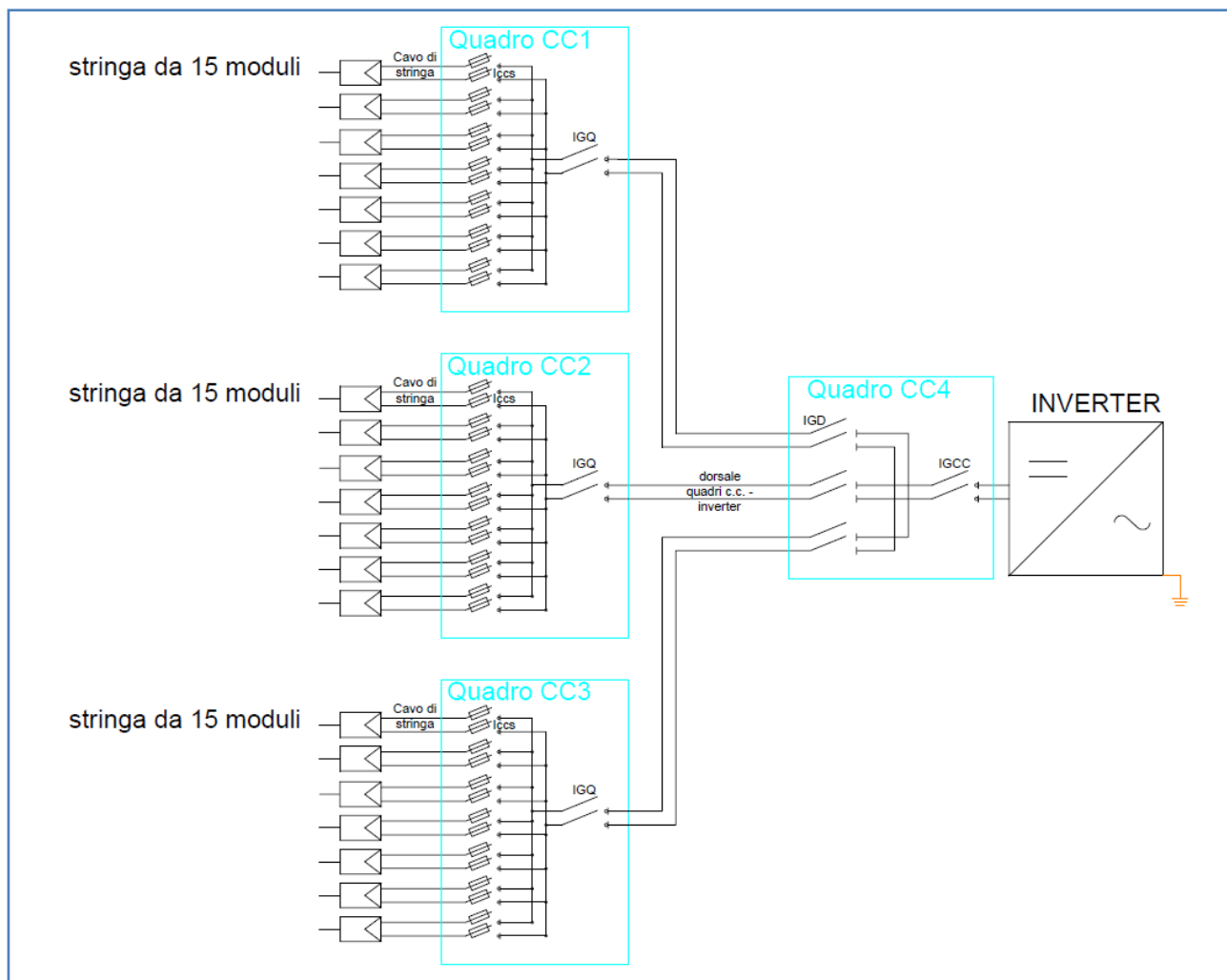


Figura 3:schema elettrico impianto d'esempio

Supponiamo di utilizzare un cavo isolato in EPR - FG7O posato in passerella perforata secondo la modalità di posa 13 della tabella 52C della norma CEI 64-8 : un'unica passerella posata in modo che i cavi non siano direttamente irraggiati dal sole, per i 3 montanti, temperatura ambiente 30°.

Utilizzando i dati delle tabelle 2 e 5, in funzione delle diverse sezioni si ottiene il calcolo della portata, come illustrato nella seguente tabella 6. Risulta pertanto che in caso di impiego di cavi di sezione inferiore a 35 mm², si dovrà procedere con l'installazione di interruttori automatici o fusibili a protezione dei singoli montanti.

La convenienza economica ad installare cavi di sezione maggiore potrebbe derivare dalle minori perdite che si avranno su questi montanti. A tale proposito la guida CEI 82-25 consiglia di limitare al 2% la caduta di tensione percentuale totale sul lato corrente continua.

Tabella 6: calcolo portata montanti - esempio fig. 4

Sezione [mm ²]	Portata teorica [A]	Declassamento per 3 circuiti ravvicinati [A]	Portata Iz [A]
10	88	0,82	72,16
16	119	0,82	97,58

25	161	0,82	132,02
35	200	0,82	164,00

Conclusioni

Uno degli errori più comuni riscontrati nella progettazione di impianti fotovoltaici è la mancanza di protezione delle condutture sul lato corrente continua.

Infatti non è raro sentire progettisti che considerano sufficiente dimensionare il cavo in funzione della sola caduta di tensione nella convinzione che tale verifica sia la più restrittiva.

E' invece semplicemente dimostrabile che in impianti di medie - grandi dimensioni collegati ad inverter centralizzati, la corrente di cortocircuito sul lato corrente continua assume valori elevati, imponendo una corretta protezione delle condutture ai sensi della norma CEI 64-8.

Tale esigenza è acuita dalla pericolosità della corrente continua che ha ormai da tempo attirato l'attenzione dei comandi dei Vigili del Fuoco, che partecipano attivamente anche tramite l'attivazione di gruppi di lavoro in sede CEI per l'emissione di nuove regole atte a prevenire l'insorgere di incendi sulle coperture degli edifici ed a garantire la sicurezza degli operatori in caso di intervento.