

Scelta e dimensionamento dei cavi CC negli impianti FV – Efficienza e affidabilità



La scelta e il dimensionamento del cavo adatto per un impianto FV non prevedono criteri diversi da quelli comunemente utilizzati per tutti gli altri cavi ma richiedono alcune accortezze particolari legate all'impiego che:

- È particolarmente oneroso in termini di temperatura e radiazione solare
- È in corrente continua perlomeno per i cavi lato moduli
- richiede normalmente un'elevata attenzione per le perdite.

È opportuno per prima cosa distinguere tra cavi:

- che collegano le singole stringhe e cavi che collegano gli eventuali quadri di parallelo stringhe all'inverter
- esposti alla radiazione solare o meno
- esposti all'attacco di roditori o meno

Di solito negli impianti fotovoltaici vengono impiegati cavi ad isolamento estruso nelle diverse pose ammesse. La scelta del cavo richiede pertanto nella sostanza l'individuazione del tipo (che oltre ad altre caratteristiche individua anche la tensione nominale) e della sezione:

- Il tipo di cavo deve essere scelto in relazione alle condizioni ambientali o al contorno necessarie. Tali condizioni tipicamente non sono elettriche e possono riguardare caratteristiche come ad esempio la flessibilità, il numero di anime, la presenza o meno di armatura, la resistenza della mescola ai raggi UV, la possibilità di interrimento o meno
- La tensione del cavo deve essere compatibile con quella massima del sistema elettrico al quale il cavo è destinato e garantire un'elevata affidabilità per tutta la vita utile dell'impianto (almeno 25 anni)
- La sezione dei conduttori deve garantire, oltre ad una densità di corrente e una caduta di tensione inferiori ai limiti prescritti dalle norme applicabili e prestabiliti in fase progettuale, anche un'efficienza energetica proporzionata.

Scelta del tipo

La posa all'aperto tipica degli impianti fotovoltaici e le condizioni particolari che ne conseguono rendono necessario considerare nella scelta del tipo di cavo una serie di fattori ambientali che possono incidere sull'esercizio e sulla durata dell'impianto. Occorre infatti considerare la presenza di:

- Anche se posati in tubo protettivo, i cavi posati all'aperto possono venire in contatto con l'acqua e deteriorarsi se di tipo non adatto. La resistenza all'acqua è normata da EN 50525-2-21.
- Basse temperature. Una temperatura troppo bassa determina un indurimento dell'isolante che ne aumenta la fragilità. Per ciascun tipo di materiale isolante sono previste delle temperature limite:
 - + 5 °C, isolamento e/o guaina PVC;
 - - 5 °C, isolamento EPR/HEPR e/o guaina LSOH
 - - 25 °C, isolamento e/o guaina in materiale elastomerico (reticolati)
 - - 40 °C isolamento e/o guaina in materiale speciale (EN 60811-1-4)
- Alte temperature. Negli impianti fotovoltaici i cavi possono trovarsi ad una temperatura ambiente, in corrispondenza dei moduli, che può raggiungere in alcuni casi anche 90 °C. Questo significa che ad esempio cavi in PVC o cavi isolati in gomma (che hanno come temperatura massima di esercizio rispettivamente 70 °C e 90 °C) non sono adatti a questo tipo di applicazione. Cavi conformi alle norme EN 62930 ed EN 50618 sono progettati per operare ad una temperatura massima continua del conduttore di 90 °C e ammettono 20.000 h di funzionamento alla temperatura massima del conduttore di 120 °C
- Elementi corrosivi e inquinanti. I cavi con guaina sono resistenti nei confronti delle più comuni sostanze corrosive o inquinanti. Essendo però tali sostanze piuttosto numerose, nelle situazioni dubbie, per ottenere maggiori informazioni è buona regola rivolgersi direttamente al costruttore del cavo.
- Radiazioni solari, ionizzanti e ozono. L'irraggiamento solare determina il deterioramento della guaina con conseguenti perdita delle caratteristiche meccaniche

ed elettriche. La resistenza all'ozono è comprovata dalla prova secondo IEC 62930, CEI EN 50618. La resistenza agli UV dalle prove secondo IEC 62930 allegato E, CEI EN 50618 allegato E.

- Per resistere agli attacchi di eventuali roditori, ad esempio negli impianti a terra, dovrebbero essere scelti cavi con armatura oppure guaine metalliche.

Un tipo di cavo appositamente studiato per l'uso in corrente continua nei sistemi fotovoltaici è quello con sigla di designazione H1Z2Z2-K.

Le principali caratteristiche dei cavi H1Z2Z2-K sono riportate nella tabella seguente.

Tabella 1 – Principali caratteristiche dei cavi H1Z2Z2-K

Sigla	H1Z2Z2-K
Norme di riferimento	CEI EN 50618 e IEC 62930
Conduttore	Flessibile in rame stagnato
Isolante	Materiale privo di alogeni reticolato Tab B.1 Annex B IEC 62930 E EN 50618
Guaina	Materiale privo di alogeni reticolato Tab B.1 Annex B IEC 62930 e EN 50618
Temperatura ambiente	-40 +90 °C
Temperatura massima di sovraccarico	+120 °C (20000 ore)
Temperatura massima di cortocircuito	+250 °C (5 s)
Tensione massima Um	1,2 kVca (1,8 kVcc) anche verso terra
Vita presunta	25 anni
Posa direttamente interrata o in tubo interrato	SI

Scelta della tensione nominale

La tensione nominale di un cavo è la tensione di riferimento per la quale il cavo è progettato e determina le prove elettriche a cui il cavo è stato sottoposto. La tensione nominale di un cavo è data dalla combinazione di due valori, U_0/U :

- U_0 è il valore efficace tra ogni conduttore isolato e la terra (armatura, schermo o ambiente circostante);
- U è il valore efficace tra due conduttori di fase di un cavo multipolare o di sistema di cavi unipolari.

Nel caso di cavi in circuiti in corrente continua, la classica condizione che la tensione nominale del sistema non debba superare 1,5 volte la tensione nominale (Guida CEI 20-67 art. 2.3.1) si applica sia al valore U_0 sia al valore U che sono sempre espressi in termini di valore efficace di una tensione alternata.

La scelta delle tensioni nominali dipende oltre che dalla tensione del sistema anche dal punto di messa a terra distinguendo se il sistema è ordinario o in classe II o con isolamento equivalente. Di fatto sul lato CC di un impianto FV la seconda opzione è ampiamente la modalità più diffusa.

Ai sensi della norma CEI 64-8/2021, una conduttura BT in CA fino a 690 V (che per analogia diventa in CC $690 \cdot 1,5 = 1035V$) è considerata con isolamento equivalente alla classe II (comunemente ed erroneamente anche detta doppio isolamento) se costituita da:

- cavi con tensione nominale superiore di un gradino rispetto al minimo richiesto
- cavi con guaina non metallica aventi tensione nominale maggiore di un gradino rispetto a quella necessaria per il sistema elettrico servito e che non comprendano un rivestimento metallico;
- cavi unipolari senza guaina installati in tubo protettivo o canale isolante, rispondente alle rispettive Norme;
- cavi con guaina metallica aventi isolamento idoneo per la tensione nominale del sistema elettrico servito, tra la parte attiva e la guaina metallica e tra questa e l'esterno.

Vale la pena precisare che poiché, nel momento in cui viene scritto questo articolo:

- è in avanzato stato di preparazione una revisione della norma CEI 64-8 in cui la limitazione a 1035 Vcc del concetto di doppio isolamento non dovrebbe essere più presente
- a livello internazionale IEC e CENELEC le norme corrispondenti alla nostra CEI 64-8 non specificano la limitazione a 1035 Vcc di cui sopra.

Nella Tabella 3 e nella Tabella 4 seguenti sono state riportate diverse combinazioni adottabili nel caso di sistemi isolati o con un punto a terra per un sistema ordinario o in doppio isolamento in funzione della tensione del sistema FV in linea con le norme internazionali. La tensione del sistema fotovoltaico si ottiene moltiplicando il numero di moduli in serie che compongono la stringa per la tensione nominale a vuoto del singolo modulo (VOC).

Tabella 2 – Tensione del sistema FV in funzione del numero di moduli in serie che compongono la stringa e della tensione nominale a vuoto del singolo modulo (VOC)

Numero di moduli in serie della stringa	Tensione del sistema FV (Vcc)				
	@VOC 35 V	@VOC 40 V	@VOC 45 V	@VOC 50 V	@VOC 55 V
10	350	400	450	500	550
11	385	440	495	550	605
12	420	480	540	600	660
13	455	520	585	650	715
14	490	560	630	700	770
15	525	600	675	750	825
16	560	640	720	800	880
17	595	680	765	850	935
18	630	720	810	900	990
19	665	760	855	950	1045
20	700	800	900	1000	1100
21	735	840	945	1050	1155
22	770	880	990	1100	1210
23	805	920	1035	1150	1265
24	840	960	1080	1200	1320
25	875	1000	1125	1250	1375

Tabella 3 – Tensione nominale minima del cavo per impianti con isolamento ORDINARIO.

Tensione nominale massima del sistema (Vcc)		Tensione nominale minima del cavo (U0/U)
isolato da terra o con polo a terra (U0=U)	con punto mediano a terra (U0 = U/2)	
450	750	300/500
675	1125	450/750
900	1500	0,6/1
1500	1500	1/1

Tabella 4 – Tensione nominale minima del cavo per impianti con isolamento in CLASSE II.

Tensione nominale massima del sistema (Vcc)		Tensione nominale minima del cavo (U0/U)
isolato da terra o con polo a terra (U0=U)	con punto mediano a terra (U0 = U/2)	
150	450	300/500
450	750	450/750
675	1125	0,6/1
900	1125	1/1

Ad esempio, in un impianto FV, in classe II con un polo a terra, con stringhe composte da 19 moduli in serie con VOC pari a 45 V, la tensione del sistema FV risulta pari a 855 V, i cavi devono avere una tensione nominale minima pari a 1/1 kV.

Ovviamente anche i cavi uscenti dalle scatole di giunzione dei moduli e i moduli stessi devono essere adeguati ai valori di U0/U della restante parte di impianto.

La tensione massima di un cavo (Um), analogamente agli altri componenti elettrici, è invece la tensione massima concatenata (espressa in valore efficace) di riferimento per l'isolamento. La Um viene scelta in funzione della tensione massima che si può verificare in qualunque momento e in qualunque punto del sistema in condizioni regolari di esercizio, non tenendo conto di variazioni temporanee della tensione come, ad esempio, quelle dovute a guasti o a bruschi distacchi di carichi importanti (CEI 20-13).

Per la scelta della tensione massima del cavo (Um) si deve fare riferimento alla tensione massima del sistema elettrico. Per effetto della temperatura, sul lato CC di un generatore fotovoltaico la massima tensione (VOCmax) è sempre superiore al valore della tensione a vuoto del generatore FV a STC (VOC-ARRAY), ma per evitare di determinare VOCmax con l'algoritmo riportato nella Norma CEI EN 61829, che prevede di usare il valore della tensione a vuoto alla minima temperatura di lavoro dei moduli, è ammesso fare il prodotto della tensione a vuoto in condizioni STC del modulo (ottenibile dai datasheet) per il numero di moduli che costituiscono la singola stringa applicando un coefficiente di maggiorazione pari 1,2.

Per far fronte alle esigenze di elevate tensioni continue connesse con i grandi impianti fotovoltaici, estendendo il campo a tensioni un poco superiori al limite BT (1000 V CA e 1500 V CC), sono stati resi disponibili cavi solari con Um = 1800 V CC (1200 V CA).

La tabella seguente permette la verifica della tensione massima del cavo in funzione del numero di moduli in serie e della tensione a vuoto degli stessi (VOC). Di fatto nel caso di un cavo H1Z2Z2-K il limite imposto dal rispetto delle tensioni nominali rende superfluo la verifica della tensione massima Um del cavo (1,8 kVcc) che è sempre abbondante.

Tabella 5 – Massima tensione del sistema (VOCmax) per la verifica della tensione massima del cavo in funzione del numero di moduli in serie e della tensione a vuoto degli stessi (VOC).

Numero di moduli in serie della stringa	Massima tensione del sistema VOCmax (Vcc)				
	@VOC 35 V	@VOC 40 V	@VOC 45 V	@VOC 50 V	@VOC 55 V
10	420	480	540	600	660
11	462	528	594	660	726
12	504	576	648	720	792
13	546	624	702	780	858
14	588	672	756	840	924
15	630	720	810	900	990
16	672	768	864	960	1056
17	714	816	918	1020	1122
18	756	864	972	1080	1188
19	798	912	1026	1140	1254
20	840	960	1080	1200	1320
21	882	1008	1134	1260	1386
22	924	1056	1188	1320	1452
23	966	1104	1242	1380	1518
24	1008	1152	1296	1440	1584
25	1050	1200	1350	1500	1650

I connettori devono avere grado di protezione sufficiente (normalmente IP65) ed essere realizzati, se esposti alla radiazione solare, così come i cavi, con materiali resistenti ai raggi UV, per garantire il corretto funzionamento degli impianti fotovoltaici nel corso della vita utile.

Scelta della sezione

Le principali condizioni che normalmente devono essere considerate nella scelta della sezione di un cavo FV in corrente continua sono tre:

1. la portata (massima corrente ammissibile per un periodo prolungato)
2. la tenuta al cortocircuito
3. la caduta di tensione.

Nelle tabelle seguenti sono stati riportati i valori di portata e caduta di tensione per unità di lunghezza e di corrente del cavo H1Z2Z2-K riferite a due pose fondamentali.

Tabella 7 – Portata e c.d.t. unitaria del cavo H1Z2Z2-K posa in aria e temperatura ambiente 40°C (temperatura del conduttore 90°C).

Sezione (mm ²)	Portata (A)	C.d.t. (V/A km)
4	46	6,49
6	59	4,32
10	82	2,49
16	110	1,58
25	140	1,01

Tabella 8 – Portata e c.d.t. unitaria del cavo H1Z2Z2-K posa in aria e temperatura ambiente 60°C (temperatura del conduttore 120°C per un massimo di 20000 h).

Sezione (mm ²)	Portata (A)	C.d.t. (V/A km)
4	55	7,10
6	70	4,73
10	98	2,72
16	132	1,73
25	176	1,11

Nota: A conti fatti, si può ritenere che alle nostre latitudini 20000 ore coprano i periodi a temperatura più elevata dell'intera vita utile di un impianto fotovoltaico.

La portata di qualsiasi conduttore viene calcolata in modo tale che la massima temperatura di funzionamento non superi il valore tollerabile dall'isolante applicando i coefficienti di riduzione che dipendono dalle specifiche condizioni di posa e dalla temperatura ambiente. Nel caso specifico deve essere ricordato che durante le ore del giorno la temperatura sul retro dei moduli può raggiungere valori molto superiori alle temperature di riferimento alle quali sono riferite le portate dei cavi comuni (di solito 30°C per pose in aria non esposte).

La sezione del cavo deve essere così scelta, con riferimento alla posa e alla temperatura di interesse, in modo che la portata sia maggiore della corrente nominale dei moduli in condizioni STC (I_{STC}) ricavabile dai datasheet degli stessi e coerentemente per eventuali altri tratti di circuito facendo riferimento alle tabelle che seguono. Se si tratta di un cavo che collega:

- una singola stringa, la corrente I_{STC} è quella di un modulo
- eventuali quadri di parallelo stringhe all'inverter, la corrente I_{STC} di un modulo deve essere moltiplicata per il numero di stringhe in parallelo.

Negli impianti fotovoltaici privi di accumulo elettrochimico e/o generatori ausiliari in parallelo sul lato c.c. la corrente di cortocircuito coincide con la corrente di cortocircuito dei moduli in condizioni STC ricavabile dai datasheet degli stessi ($I_{SC,STC}$) che causa solo una lieve sovracorrente ai circuiti e ai componenti. La mancanza di una corrente di cortocircuito importante tipica degli impianti elettrici tradizionali è vantaggiosa per il dimensionamento elettromeccanico dei componenti ma rende critico l'intervento delle protezioni.

Se la protezione contro le sovracorrenti non è possibile oppure viene omessa, il problema si bypassa scegliendo la sezione dei cavi in modo che, in qualsiasi punto, la portata sia uguale o superiore a 1,25 volte la corrente di cortocircuito dei moduli in condizioni STC ($I_{SC,STC}$) (CEI 64-8/7 712.433.1).

Se si tratta di un cavo che collega:

- una singola stringa, la corrente $I_{SC,STC}$ è quella di un modulo
- eventuali quadri di parallelo stringhe all'inverter, la corrente $I_{SC,STC}$ di un modulo deve essere moltiplicata per il numero di stringhe in parallelo.

La caduta di tensione è indirettamente anche un parametro indicativo dell'efficienza energetica della linea. Tanto minore è la caduta di tensione tanto maggiore è l'efficienza energetica. In pratica nel caso in esame la caduta di tensione percentuale è pari alle perdite percentuali di produzione.

Le cadute di tensione sono tipicamente limitate al 2% o meno per effetto dell'elevato valore economico delle perdite associate mentre la portata è determinata in modo da assicurare una durata di vita soddisfacente dei conduttori e degli isolamenti sottoposti agli effetti termici causati dal passaggio della corrente per periodi prolungati ed in condizioni ordinarie di esercizio. È buona norma che la sezione dei cavi di collegamento tra i moduli sia scelta in modo da non superare una densità di corrente di 1 A/mm².

Per il calcolo della caduta di tensione totale è sufficiente moltiplicare i valori dati (V/A km) per il valore effettivo della corrente e il doppio della lunghezza della linea (per considerare entrambi i conduttori). Se la caduta di tensione ottenuta è superiore a 2% (o al valore che si ritiene di adottare) è necessario ripetere il calcolo con la sezione maggiore e così via.

La sezione del cavo sarà infine la maggiore tra quelle che risultano dall'applicazione dei tre criteri sopra riportati.

Ad esempio, in un impianto FV:

- con tensione 800 Vcc
- caduta di tensione massima 2%
- senza accumulo elettrochimico e/o generatori ausiliari in parallelo sul lato c.c.
- privo di protezione contro le sovracorrenti

si devono dimensionare le linee (LA) che collegano ciascuna stringa con corrente 12 A (I_{STC}) al quadro di parallelo:

- lunghezza 30 m (60 m di cavo)
- posa in aria libera con temperatura ambiente 40°C (temperatura del conduttore 90°C)

e quella (LB) che collega il quadro di parallelo di 2 stringhe all'inverter (corrente 24 A = 2·12 A):

- lunghezza 50 m (100 m di cavo)
- posa in aria libera con temperatura ambiente 40°C (temperatura del conduttore 90°C)

Dalla tabella delle portate applicabile alla posa di interesse si può concludere che cavi con sezione 4 mm² soddisfano sia il criterio della portata che della tenuta al cortocircuito.

Linea	Sezione	Verifica portata	Verifica ctcto
LA	4 mm ²	12 < 46 A	12·1,25 = 15 < 46 A
LB	4 mm ²	24 < 46 A	24·1,25 = 30 < 46 A

Con sezione 4 mm² (caduta di tensione per unità di lunghezza e di corrente 6,49 V/A km) risultano invece le seguenti cadute di tensione.

Linea	Sezione	Verifica caduta di tensione
LA	4 mm ²	2·0,03 km · 6,49 V/A km · 12 A = 4,67 V
LB	4 mm ²	2·0,05 km · 6,49 V/A km · 24 A = 15,58 V
LA+LB	—	4,67 V + 15,58 V = 20,25 V > 16 V = 2%·800V

Si rende necessario aumentare una delle due sezioni, ad esempio, portando la sezione del secondo tratto LB a 6 mm².

Linea	Sezione	Verifica caduta di tensione
LA	4 mm ²	2·0,03 km · 6,49 V/A km · 12 A = 4,67 V
LB	6 mm ²	2·0,05 km · 4,32 V/A km · 24 A = 10,37 V
LA+LB	—	4,67 V + 10,37 V = 15,04 V < 16 V = 2%·800V