



ROMA CAPITALE

Città Metropolitana di Roma

REGIONE LAZIO

**PROGETTO DEFINITIVO DI UN LOTTO DI IMPIANTI FOTOVOLTAICI
DELLA POTENZA DI PICCO COMPLESSIVA P=31'006,30 kWp
E POTENZA IN IMMISSIONE PARI A 4X6'000 = 24'000 kW**

Proponente

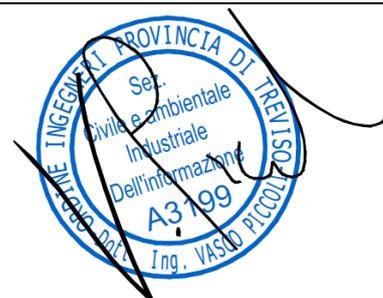
GREENERGY PV11 S.r.l.

VIA TRASPONTINA, 46 - 0072 ARICCIA (RM)

N.REA: 1639324 - C.F.: 16173351004

PEC: greenergy pv11@pec.it

Progettazione



Preparato

Dario Ing. Bertani

Verificato

Gianandrea Ing. Bertinazzo

Approvato

Vasco Ing. Piccoli

PROGETTAZIONE DEFINITIVA

Titolo elaborato

**IMPIANTO FV "SOLFORATELLE"
RELAZIONE DIMENSIONAMENTO IMPIANTO FV
E CAVI ELETTRICI**

Elaborato N.

R14

Data emissione

30/11/22

Nome file

RELAZIONE TECNICA

N. Progetto

-

Pagina

COVER

00

30/11/22

PRIMA EMISSIONE

REV.

DATA

DESCRIZIONE

Sommario

1	Premessa	4
2	Descrizione generale	4
2.1	Dati generali di progetto	4
2.2	Configurazione generale.....	5
2.3	Configurazione campo FV.....	6
2.3.1	Configurazione lato Corrente Continua.....	7
2.3.2	Configurazione Lato Corrente Alternata	8
2.4	Collegamenti elettrici	9
2.4.1	Cavi in corrente continua (BT)	10
2.4.2	Cavi in corrente alternata (BT)	12
2.4.3	Cavi in corrente alternata (MT)	13
2.4.4	Elettrodotto MT esterno all'impianto	15
2.4.5	Altri cavi	16
3	Verifiche di coordinamento.....	18
3.1	Condizioni Ambientali.....	18
3.2	Coordinamento Elettrico Lato CC.....	19
3.3	Coordinamento Elettrico Lato CA.....	21
4	Verifica cavi elettrici	25
4.1	Cavi di Stringa	25
4.1.1	Tensione di esercizio	25
4.1.2	Corrente di esercizio.....	25
4.1.3	Verifica Portata di Corrente e Coordinamento Protezioni	26
4.1.4	Verifica Caduta di Tensione	28
4.1.5	Verifica Tenuta al corto circuito	29
4.1.6	Verifica Perdite	29
4.2	Cavi BT – Corrente alternata	30
4.2.1	Tensione di esercizio	30
4.2.2	Corrente di esercizio.....	30
4.2.3	Verifica Portata di Corrente e Coordinamento Protezioni	31
4.2.4	Verifica Caduta di Tensione	33
4.2.5	Verifica Tenuta al corto circuito	34
4.2.6	Verifica Perdite	35
4.3	Cavi in Media Tensione.....	36

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

4.3.1	Tensione di esercizio	36
4.3.2	Verifica Portata di Corrente e Coordinamento Protezioni	36
4.3.3	Verifica Caduta di Tensione	39
4.3.4	Tenuta al corto circuito	40
4.3.5	Perdite	41

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

1 Premessa

La presente relazione ha lo scopo verificare tecnicamente il dimensionamento e l'idoneità dei principali componenti dell'impianto di generazione di energia elettrica da fonte fotovoltaica denominato "Solforatelle", da ubicarsi nel Comune di Roma (RM), di potenza nominale complessiva pari a 31'006.30 kWp e di potenza di immissione in rete pari a 24'000 kW.

2 Descrizione generale

2.1 Dati generali di progetto

In Tabella 1 sono riportate le principali caratteristiche tecniche relative all'impianto in progetto.

Tabella 1 - Principali caratteristiche dell'impianto FV denominato "Solforatelle"

Committente	Greenergy PV11 Srl
Luogo di realizzazione: Impianto FV Elettrodotto	Roma (RM) Roma (RM)
Denominazione impianto	Solforatelle
Superficie di interesse (area lorda Campo FV) (di cui area netta campo FV)	Lorda: 74 Ha Campo FV: 36 Ha
Potenza di picco	31'006,30 kWp
Potenza apparente (*)	24'000 kVA
Potenza in STMG	24,00 MW
Modalità connessione alla rete	Collegamento in antenna a 20 kV su CP Selvotta
Tensione di esercizio: Bassa tensione CC Bassa tensione CA Media Tensione	<1500 V 800 V sezione generatore (inverter) 400/230 sezione ausiliari 20 kV
Strutture di sostegno	Inclinazione fissa
Inclinazione piano dei moduli (tilt)	20°
Angolo di azimuth	0°
N° moduli FV	53'924
N° inverter di stringa	120
N° strutture di sostegno	2x26 → 1037 strutture
N° cabine di trasformazione BT/MT	12
Producibilità energetica attesa (1° anno)	46,701 GWh 1'506 kWh/kWp

(*) pari alla somma della potenza apparente nominale di tutti gli inverter previsti in impianto

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

2.2 Configurazione generale

L'energia generata dall'impianto fotovoltaico, composto da quattro impianti di generazione distinti dal punto di vista elettrico (configurazione "lotto d'impianti" connessi in media tensione), viene raccolta tramite una rete di elettrodotti interrati in Media Tensione eserciti a 20 kV che confluiscono presso le due cabine di consegna situate presso il confine Sud, in posizione accessibile dalla viabilità pubblica, presso le quali è ubicato il punto di consegna dell'energia generata alla rete di distribuzione.

Un elettrodotto interrato in Media Tensione a 20 kV, costituito da quattro terne di cavi (una per ciascun impianto) di lunghezza pari a circa 2,6 km trasporterà quindi l'energia generata presso la cabina primaria AT/MT "Selvotta".

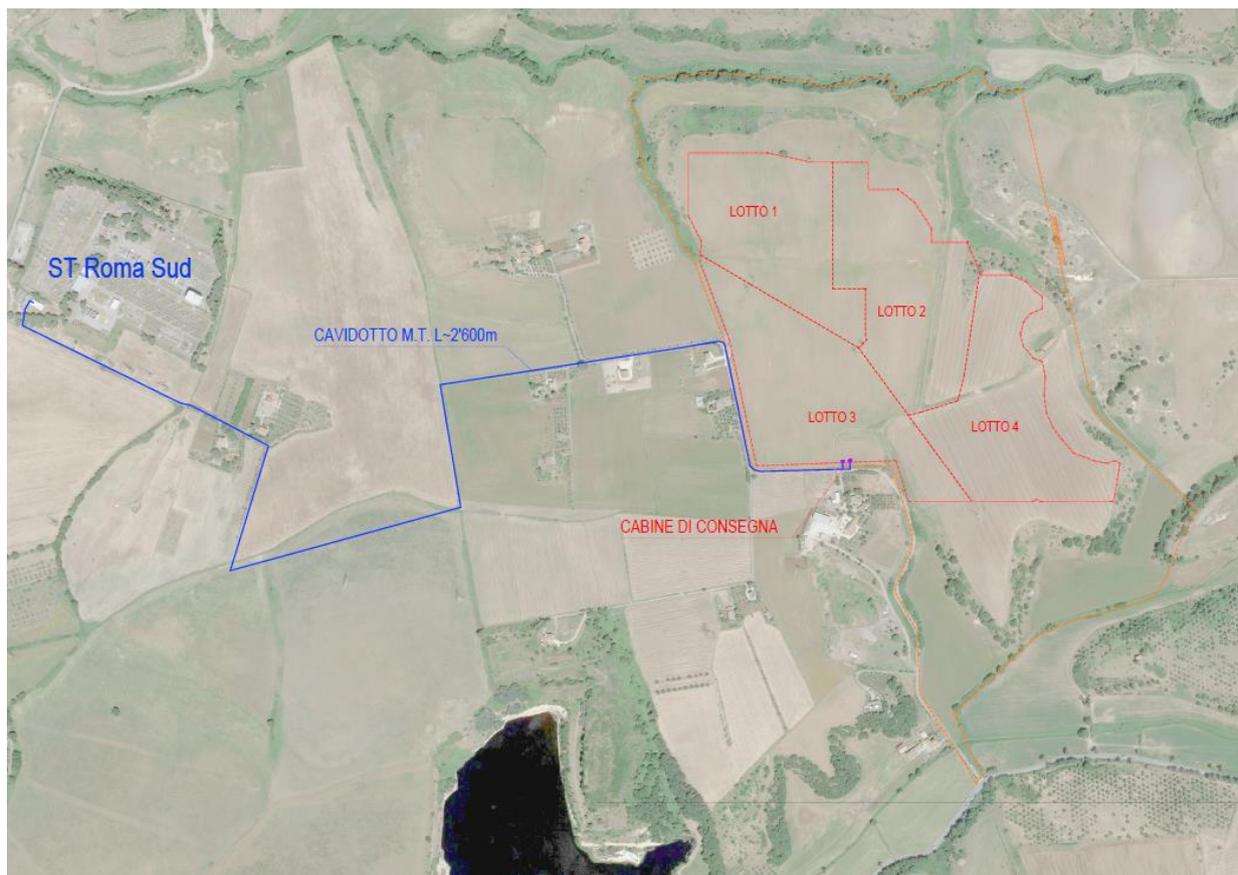


Figura 1 – Inquadramento dell'impianto FV ed opere di connessione su ortofoto

La potenza nominale complessiva dell'impianto fotovoltaico, determinata dalla somma delle potenze nominali dei moduli fotovoltaici, è pari a 31'006,30 kWp, mentre la potenza in immissione in rete è determinata dalla potenza indicata sulla STMG, ed è pari a 24'000 kW.

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

2.3 Configurazione campo FV

Presso il confine Sud-Ovest dell'area saranno ubicate due cabine di consegna in MT, a ciascuna cabina saranno afferenti due linee di connessione e saranno quindi ubicati i punti di consegna di due impianti facenti parte del lotto.

Ciascuna cabina sarà dotata di opportune protezioni elettriche, alla quale saranno collegate le cabine di trasformazione in configurazione radiale, in gruppi di massimo 6 MVA per ciascuna linea.

All'interno dei confini dell'impianto FV è prevista complessivamente l'installazione di 12 cabine di trasformazione realizzate in soluzioni containerizzate e contenenti un locale comune per il quadro in media tensione che riceve l'energia da un trasformatore di potenza MT/BT.

Per l'impianto FV in oggetto si prevede l'utilizzo di inverter di stringa, posizionati direttamente in campo, a ciascuno dei quali saranno collegate fino ad un massimo di 18 stringhe di moduli FV, con 9 MPPT indipendenti. La scelta di utilizzare inverter multi-MPP consente di minimizzare le perdite di disaccoppiamento o mismatch massimizzando la produzione energetica, agevolando inoltre le eventuali operazioni di manutenzione/sostituzione degli inverter aumentando il tempo di disponibilità dell'impianto FV nel suo complesso.

I moduli fotovoltaici, realizzati con tecnologia monofacciale ed in silicio mono-cristallino ad elevata efficienza, saranno collegati elettricamente in serie a formare stringhe da 26 moduli, e posizionati su strutture ad inclinazione fissa, in configurazione a doppia fila con modulo disposto verticalmente (configurazione 2-P).

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

2.3.1 Configurazione lato Corrente Continua

La configurazione lato corrente continua dell'impianto prevedere essenzialmente:

- una potenza DC pari a 31'006,30 kWp, dati da:
 - o Nr. 53'924 Moduli Fotovoltaici;
 - o collegati in nr. 2'074 stringhe;
 - o che confluiscono in nr. 120 Inverter
 - o raggruppati a loro volta in nr.12 cabine di trasformazione.
- una potenza AC pari a 24'000,00 kVA.

Si riporta di seguito la composizione di ciascuna cabina:

CABINA	STRUTTURE 2x26		INVERTER			STRINGHE	MODULI FV	POTENZA DC [kWp]	POTENZA AC [kVA]	RAPPORTO DC/AC
	TOTALE STRINGHE		INVERTER 16 STRINGHE	INVERTER 18 STRINGHE	TOTALE INVERTER					
C1.1	87	174	3	7	10	174	4.524	2.601,30	2.000	1,30
C1.2	86	172	4	6	10	172	4.472	2.571,40	2.000	1,29
C1.3	84	168	6	4	10	168	4.368	2.511,60	2.000	1,26
LOTTO 1	257	514	13	17	30	514	13.364	7.684,30	6.000	1,28
C2.1	87	174	3	7	10	174	4.524	2.601,30	2.000	1,30
C2.2	88	176	2	8	10	176	4.576	2.631,20	2.000	1,32
C2.3	85	170	5	5	10	170	4.420	2.541,50	2.000	1,27
LOTTO 2	260	520	10	20	30	520	13.520	7.774,00	6.000	1,30
C3.1	84	168	6	4	10	168	4.368	2.511,60	2.000	1,26
C3.2	85	170	5	5	10	170	4.420	2.541,50	2.000	1,27
C3.3	88	176	2	8	10	176	4.576	2.631,20	2.000	1,32
LOTTO 3	257	514	13	17	30	514	13.364	7.684,30	6.000	1,28
C4.1	87	174	3	7	10	174	4.524	2.601,30	2.000	1,30
C4.2	88	176	2	8	10	176	4.576	2.631,20	2.000	1,32
C4.3	88	176	2	8	10	176	4.576	2.631,20	2.000	1,32
LOTTO 4	263	526	7	23	30	526	13.676	7.863,70	6.000	1,31
TOTALE	1.037	2.074	43	77	120	2.074	53.924	31.006,30	24.000	1,29

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

2.3.2 Configurazione Lato Corrente Alternata

La configurazione Lato Corrente Alternata dell'impianto FV prevede essenzialmente:

- nr. 120 inverter che ricevono una potenza una potenza DC pari a 31'006,30 kWp (@STC) e la convertono in AC una potenza pari a 24'000,0 kVA;
- nr. 12 trasformatori MT/BT per una potenza complessiva nominale pari a 24'000,0 kVA.

Per la descrizione dettagliata dei componenti d'impianto si rimanda alle relazioni tecniche di impianto FV.

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

2.4 Collegamenti elettrici

I cavi previsti nell'impianto di generazione fotovoltaica, sono essenzialmente:

- Cavi in CC - Cavi di stringa: ovvero i cavi CC che collegano la stringa al quadro di parallelo stringa (di seguito SB);
- Cavi in CA/BT - Cavi inverter: ovvero i cavi in CA che collegano gli inverter di stringa alle cabine di trasformazione;
- Cavi in CA/MT: ovvero i cavi MT utilizzati nelle linee radiali interne al campo fotovoltaico verso le cabine di consegna e l'elettrodotto MT di connessione verso la cabina primaria;
- Altri cavi: quali ad esempio i cavi di alimentazione dei tracker, cavi dei sistemi di sicurezza, etc.

Il dimensionamento dei cavi eserciti in BT ed in MT, utilizzati per il trasporto di energia dai moduli FV agli inverter di stringa, quindi alle cabine di trasformazione fino al punto di consegna, è stato effettuato tenendo conto dei seguenti criteri di verifica:

- verifica della portata di corrente e coordinamento protezioni;
- verifica della caduta di tensione;
- verifica della tenuta al corto circuito;
- verifica delle perdite.

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

2.4.1 Cavi in corrente continua (BT)

I cavi in corrente continua sono necessari per raggruppare i moduli fotovoltaici e rendere disponibile questa energia in ingresso lato CC dell'inverter.

I moduli fotovoltaici di per sé stessi sono forniti già dotati di cavi e relativo connettore CC (uno per il polo negativo, uno per il polo positivo), ma di lunghezza tale da permettere il solo collegamento tra moduli fotovoltaici contigui. Verranno quindi collegati in serie tra di loro fino a comporre una stringa, che in questo progetto è composta dalla serie di 26 moduli FV del costruttore Jinko Solar, serie Tiger Neo e modello JKM575N-72HL4, e presentano una potenza nominale a STC¹ pari a 575 Wp.

Il cavo di collegamento di questa stringa è chiamato cavo di stringa e per questo progetto è stato selezionato un cavo del tipo H1Z2Z2-K.

Dato per il presente progetto è stato previsto l'impiego di inverter di stringa, ed in particolare del costruttore Huawei modello SUN2000-215KTL-H0 con potenza nominale pari a 200 kW, le stringhe di moduli FV saranno collegate direttamente alla sezione in corrente continua dell'inverter stesso, installato direttamente in campo in posizione il quanto più possibile baricentrica rispetto alle stringhe ad esso afferenti.

La sezione CC verrà esercita con un Sistema Isolato. In accordo con il Sistema Normativo Internazionale, il funzionamento in Sistema Isolato:

- prevede entrambi i poli (Negativo e Positivo) NON connessi a terra in nessun punto ed in nessun caso;
- prevede un controllore di isolamento, che garantisca il continuo monitoraggio del valore di resistenza tra i poli e terra; il cedimento dell'isolamento dovrà essere chiaramente rilevato in modo da permettere al gestore dell'impianto di effettuare i necessari interventi di manutenzione straordinaria alla ricerca del guasto;
- permette il funzionamento del sistema con il primo guasto a terra, a patto che il primo guasto sia chiaramente rilevato e che il secondo guasto determini l'intervento degli organi di protezione atti al sezionamento della parte di circuito sottoposta al doppio guasto.

¹ STC - Standard Test Conditions: irraggiamento solare 1000 W/m², temperatura modulo FV 25°C, Air Mass 1,5

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

2.4.1.1 Cavi di Stringa – Configurazione e modalità di Installazione

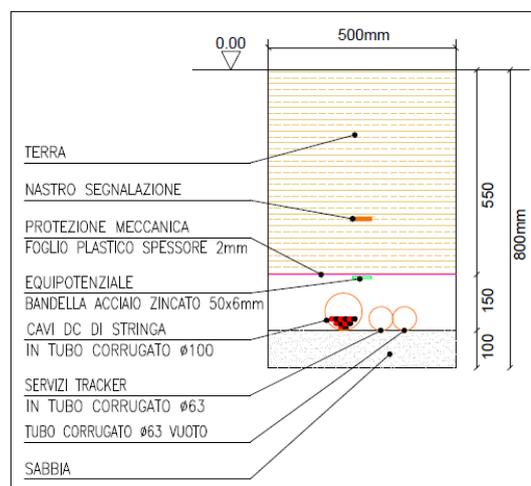
I cavi avranno tratti sia all'aperto (tipicamente lungo la struttura fotovoltaica di sostegno dei moduli fotovoltaici), sia sottoterra per il raggiungimento dell'inverter.

Dato che il cavo avrà tratti in cui verrà esposto all'irraggiamento diretto è necessario che il cavo sia adatto a questo tipo di funzionamento. Come già specificato nel paragrafo precedente è scelto il cavo in Rame, tipo H1Z2Z2-K, con la seguente configurazione:

$$2// (1 \times 6) \text{ mm}^2$$

Di seguito si riportano le principali caratteristiche tecniche del cavo selezionato e un estratto delle sezioni tipo dei cavidotti:

Modello	H1Z2Z2-K
Conduttore	Rame stagnato, flessibile
Isolante	HEPR tipo G21
Guaina	Mescola elastomerica reticolata senza alogeni tipo M21
Temperatura di esercizio	-40°C ÷ +120°C
Tensione massima AC [V]	1200
Tensione massima DC [V]	1800
Sezione conduttore [mm²]	6
Portata corrente in aria [A]	70 (@60°C)



La sezione tipica di questi cavidotti è essenzialmente costituita da una sezione larga 500mm e profonda 800mm, che sarà riempita con:

- Sabbia di fiume nella parte più profonda per evitare che i cavi direttamente interrati possano essere a contatto diretto con sassi e/o detriti che ne possano scongiurare l'integrità durante tutti gli anni di esercizio, con:
 - uno spessore pari a circa 100mm sul fondo;
 - uno spessore pari a circa 200mm nel quale verranno installati cavi e corrugati in base alla specificità di ogni tratta;
- Un foglio plastico per la separazione tra strato inferiore e strato superiore, avente anche la funzione di protezione meccanica;
- Terra di riporto per il riempimento dello strato superiore, fino al livellamento nativo della sezione.

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

2.4.2 Cavi in corrente alternata (BT)

I cavi in corrente alternata sono necessari per collegare in parallelo gli inverter di stringa alle cabine di trasformazione ed in particolare sul Quadro Parallelo Corrente Alternata (di seguito QPCA).

La sezione CA lato generatore verrà esercita con un Sistema Trifase Isolato 3F+PE, a tutti gli effetti un sistema IT. In accordo con il Sistema Normativo Internazionale, il funzionamento in IT:

- prevede tutte e tre le fasi (R-S-T) NON connesse a terra in nessun punto ed in nessun caso;
- prevede un controllore di isolamento, che garantisca il continuo monitoraggio del valore di resistenza tra i poli e terra; il cedimento dell'isolamento dovrà essere chiaramente rilevato in modo da permettere al gestore dell'impianto di effettuare i necessari interventi di manutenzione straordinaria alla ricerca del guasto;
- permette il funzionamento del sistema con il primo guasto a terra, a patto che il primo guasto sia chiaramente rilevato e che il secondo guasto determini l'intervento degli organi di protezione atti al sezionamento della parte di circuito sottoposta al doppio guasto.

Per la realizzazione della rete di distribuzione in corrente alternata, ovvero per il collegamento elettrico in BT degli inverter di stringa al quadro di parallelo (QPCA), posizionato all'interno della cabina di trasformazione, si prevede l'utilizzo di cavi di tipo ARG16R16.

2.4.2.1 Cavi inverter – Configurazione e modalità di posa

I cavi BT in corrente alternata saranno installati:

- direttamente interrati lungo tutto il percorso, in formazione a trifoglio;
- all'interno di tubo corrugato agli estremi (un tubo per terna cavi inverter), in uscita dall'inverter per evitare l'irraggiamento diretto e in prossimità della cabina di trasformazione per raggiungere ordine il proprio interruttore scatolato (di seguito MCCB).

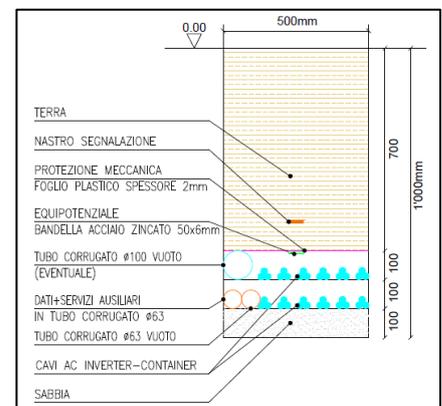
Come già specificato nel paragrafo precedente è scelto il cavo in Alluminio tipo ARG16R16, mentre la configurazione prevista sarà:

$$3 \times 300 \text{ mm}^2$$

In fase di progettazione esecutiva/costruttiva, potranno essere ottimizzate le configurazioni cavi, prevedendo cavi con sezione inferiore in funzione della distanza del collegamento e della corrente da trasportare.

Di seguito vengono riportate le principali caratteristiche del cavo selezionato.

Modello	ARG16R16
Conduttore	Corda compatta a fili di alluminio (CEI 20-29, classe 2)
Isolante	HEPR
Guaina	PVC speciale di qualità Rz
Temperatura di esercizio	0 – 90°C
Tensione massima AC	1200 V
Tensione massima DC	1800 V
Sezione conduttore	300 mm ²
Portata corrente [A]	A trifoglio direttamente interrati: 300 mm ² : 385 A



00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

La sezione tipica di questi cavidotti è essenzialmente costituita da una sezione larga 500mm e profonda 1'000mm, che sarà riempita con:

- Sabbia di fiume nella parte più profonda per evitare che i cavi direttamente interrati possano essere a contatto diretto con sassi e/o detriti che ne possano scongiurare l'integrità durante tutti gli anni di esercizio, con:
 - uno spessore pari a circa 100mm sul fondo;
 - uno spessore pari a circa 200mm nel quale verranno installati cavi e corrugati in base alla specificità di ogni tratta;
- Un foglio plastico per la separazione tra strato inferiore e strato superiore, avente anche la funzione di protezione meccanica;
- Terra di riporto per il riempimento dello strato superiore, fino al livellamento nativo della sezione.

In talune sezioni il cavidotto potrà essere allargato per evitare che i cavi siano troppo vicini.

2.4.3 Cavi in corrente alternata (MT)

I cavi in Media Tensione sono necessari per collegare in parallelo le varie cabine di trasformazione sparse per il Campo Fotovoltaico fino a raggiungere la cabina di consegna di ciascun impianto e successivamente la cabina primaria.

La media tensione verrà esercita con un sistema trifase isolato 3F, a tutti gli effetti un sistema IT. In accordo con il Sistema Normativo Internazionale, il funzionamento in IT:

- prevede tutte e tre le fasi (U-V-W) NON connesse a terra in nessun punto ed in nessun caso;
- prevede un coordinamento tra le protezioni di fase e di neutro, in modo che il cavo risulti sempre protetto.

È stata scelta una tipologia di cavo in funzione del tipo di collegamento da effettuare:

- cavo tipo ARP1H5EX per i collegamenti di distribuzione radiali di campo fino alla cabina di consegna;
- cavo tipo RG7H1R per il collegamento tra le cabine di consegna e la cabina primaria.

2.4.3.1 Cavi di Distribuzione MT

I cavi saranno installati:

- direttamente interrati lungo tutto il percorso, disposti a trifoglio nel cavidotto;
- all'interno di tubo corrugato, (un tubo per cavi MT) in entrata/uscita nel tratto di collegamento tra pozzetto e cabine di trasformazione arrivando in fondazione già sottoterra, raggiungerà il fondo dei quadri MT in aria libera.

Come già specificato nel paragrafo precedente è scelto il cavo in Alluminio tipo ARP1H5EX, mentre la configurazione prevista sarà in funzione del numero di cabine del quale è necessaria trasportare l'energia. Nelle distribuzioni secondarie saranno previste le seguenti configurazioni:

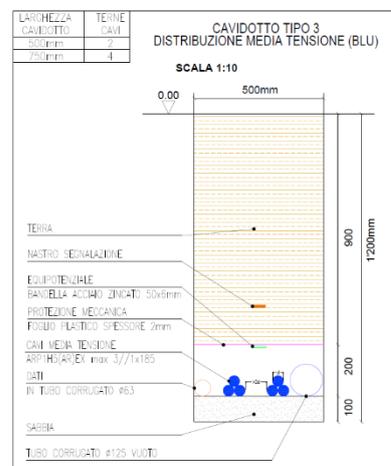
Collegamento 1 cabina di trasformazione	→	3// (1x95) mm ²
Collegamento 2 cabine di trasformazione	→	3// (1x120) mm ²
Collegamento 3 cabine di trasformazione	→	3// (1x150) mm ²

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

In fase di progettazione esecutiva/costruttiva, potranno essere ottimizzate le configurazioni cavi, prevedendo cavi con sezione inferiore in funzione della distanza del collegamento e della corrente da trasportare.

Di seguito vengono riportate le principali caratteristiche del cavo selezionato.

Modello	ARP1H5EX
Conduttore	Corda compatta a fili di alluminio (CEI 20-29, classe 2)
Isolante	HPTE (elastomero termoplastico)
Guaina	Polietilene
Temperatura di esercizio	0 – 105°C
Tensione nominale U_o/U (Um)	12/20 (24) kV
Sezione conduttore	95 / 120 / 150 mm ²
Portata corrente [A]	A trifoglio direttamente interrati: 95 mm ² : 268 A 120 mm ² : 306 A 150 mm ² : 341 A



La sezione tipica di questi cavidotti è essenzialmente costituita da una sezione larga 500 e profonda 1'200mm, che sarà riempita con:

- Sabbia di fiume nella parte più profonda per evitare che i cavi direttamente interrati possano essere a contatto diretto con sassi e/o detriti che ne possano scongiurare l'integrità durante tutti gli anni di esercizio, con:
 - uno spessore pari a circa 100mm sul fondo;
 - uno spessore pari a circa 200mm nel quale verranno installati cavi e corrugati in base alla specificità di ogni tratta; dovrà essere usata l'accortezza di posizionare i cavi MT opportunamente distanziati tra di loro (>2D con D diametro del cavo MT);
- Un foglio plastico per la separazione tra strato inferiore e strato superiore, avente anche la funzione di protezione meccanica;
- Terra di riporto per il riempimento dello strato superiore, fino al livellamento nativo della sezione.

In talune sezioni il cavidotto potrà essere allargato per evitare che i cavi siano troppo vicini.

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

2.4.4 Elettrodotta MT esterno all'impianto

La Media Tensione verrà esercita con un Sistema Trifase 3F-Neutro Isolato (collegamento lato secondario del trasformatore AT/MT a triangolo).

I cavi saranno installati:

- direttamente interrati lungo tutto il percorso, disposti a trifoglio nel cavidotto;
- all'interno di tubo corrugato, (un tubo per cavi MT) in entrata/uscita nel tratto di collegamento tra pozzetto e cabine di consegna e/o cabina primaria; arrivando in fondazione già sottoterra, raggiungerà il fondo dei quadri MT in aria libera.
- .

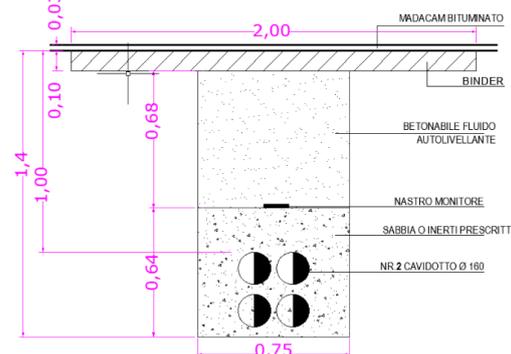
Il cavo selezionato è il cavo in Alluminio tipo ARP1H5(AR)EX, mentre la configurazione prevista sarà:

Cavidotto MT Esterno → 4 x [3x(1x150)] mm²

In fase di progettazione esecutiva/costruttiva, potrà essere ottimizzata la configurazione cavi, prevedendo cavi con sezione inferiore in funzione della distanza del collegamento e della corrente da trasportare.

Di seguito vengono riportate le principali caratteristiche del cavo selezionato.

Modello	RG7H1R
Conduttore	Rame rosso, formazione rigida compatta (Classe 2)
Isolante	Gomma HEPR
Guaina	Mescola a base PVC
Temperatura di esercizio	0 – 90°C
Tensione nominale U₀/U (Um)	12/20 (24) kV
Sezione conduttore	150 mm ²
Portata corrente [A]	A trifoglio direttamente interrati: 150mm ² : 402 A



00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

La sezione tipica di questi cavidotti è essenzialmente costituita da una sezione larga da 750mm e profonda 1'500mm, che sarà riempita con:

- Sabbia di fiume nella parte più profonda per evitare che i cavi direttamente interrati possano essere a contatto diretto con sassi e/o detriti che ne possano scongiurare l'integrità durante tutti gli anni di esercizio, con:
 - uno spessore pari a circa 100mm sul fondo;
 - uno spessore pari a circa 400mm nel quale verranno installati cavi e corrugati in base alla specificità di ogni tratta; dovrà essere usata l'accortezza di posizionare i cavi MT opportunamente distanziati tra di loro ($>2D$ con D diametro del cavo MT);
- Un foglio plastico per la separazione tra strato inferiore e strato superiore, avente anche la funzione di protezione meccanica;
- Terra di riporto per il riempimento dello strato superiore, fino al livellamento nativo della sezione.

In talune sezioni, ed in particolare in corrispondenza dell'attraversamento delle interferenze lungo il percorso, il cavidotto sarà differente, per cui ogni terna di cavi, mantenendo la configurazione a trifoglio, entrerà in un tubo corrugato di diametro 300mm e verrà installato posato con la tecnica Trivellazione Orizzontale Controllata (di seguito TOC). Nell'elaborato grafico dedicato (*Cavidotto MT – Interferenze su CTR*) sono state individuate le interferenze del percorso del cavidotto MT ed indicata la modalità di risoluzione di tale interferenza.

2.4.5 Altri cavi

Di seguito l'indicazione delle caratteristiche degli altri cavi previsti all'interno dell'Impianto Fotovoltaico.

2.4.5.1 Cavi nella Cabina di Trasformazione MT/BT

La cabina di trasformazione MT/BT è quell'insieme di componenti atti a rendere disponibile l'energia prodotta da un certo numero di inverter in Media Tensione. I componenti principali sono:

- QPCA: ovvero il quadro di parallelo in bassa tensione al quale sono collegati gli inverter di stringa;
- Trasformatore MT/BT, ovvero la macchina elettromeccanica che trasforma l'energia resa disponibile nel QPCA da Bassa a Media Tensione;
- QMT (Quadro Media Tensione), ovvero il quadro che rende disponibile i cavi MT per la distribuzione MT.

La fornitura ed il dimensionamento dei cavi elettrici all'interno di ogni cabina sono da considerarsi come inclusi nella fornitura della cabina di trasformazione.

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

2.4.5.2 Cavi di sicurezza e sorveglianza

Il sistema di sicurezza e videosorveglianza utilizza:

- Telecamere per vigilare l'area della recinzione (motion detection con illuminazione IR notturna);
- Telecamere tipo DOME nei punti strategici ed in corrispondenza delle cabine di trasformazione;
- Sistema di illuminazione da utilizzare come deterrente (nel caso il motion detection rilevi un'intrusione, l'illuminazione relativa a quella zona viene attivata).

2.4.5.3 Cavi Dati

I cavi dati sono i cavi di trasmissione di tutti i dati dei vari sistemi.

Le tipologie di cavo possono essere di due tipi:

- cavo RS485 per tratte di cavo di lunghezza limitata (tipicamente <100m);

cavo in fibra ottica, per tratti di cavo più lunghi.

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

3 Verifiche di coordinamento

3.1 Condizioni Ambientali

La verifica del dimensionamento dell'impianto fotovoltaico dipende inevitabilmente dalla definizione delle condizioni ambientali dell'area dove sorgerà l'impianto fotovoltaico.

Il sito di realizzazione dell'impianto presenta un'altitudine di pochi metri sopra il livello del mare (nello specifico 120m slm), per cui elettricamente è una zona standard e non sottoposta ad alcuna limitazione di caratteristiche dielettriche limitate a causa dell'altitudine.

Ai fini del dimensionamento dei componenti d'impianto e dei cavi elettrici, si considera il seguente intervallo di temperature ambiente:

intervallo temperature di funzionamento → $-5 \dots + 50^{\circ}\text{C}$

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

3.2 Coordinamento Elettrico Lato CC

L'elemento di partenza per il coordinamento lato corrente continua è il modulo fotovoltaico, i cui dati elettrici riportati alle condizioni STC sono:

$$P = 575\text{Wp, con } -0,30\%/^{\circ}\text{C}$$

$$V_{OC} = 50,88\text{V, con } -0,25\%/^{\circ}\text{C} - V_{MPP} = 42,22\text{V}$$

$$I_{SC} = 14,39\text{A, con } +0,046\%/^{\circ}\text{C} - I_{MPP} = 13,62\text{A}$$

Si procede quindi con il calcolo dei parametri elettrici del modulo FV in funzione delle condizioni ambientali del presente progetto; l'intervallo di funzionamento è tra le temperature ambiente di -5 e 50°C , che corrisponde indicativamente ad una temperatura di funzionamento delle celle FV tra $+5$ e 70°C . La temperatura ambiente minima di -5°C risulta relativa ad ore notturne, mentre per far sì che un modulo fotovoltaico raggiunga un valore di tensione prossimo a quello di V_{OC} riportato nella scheda tecnica fornita dal costruttore (relativo a condizioni STC, ovvero irraggiamento pari a 1000 W/m^2) si ritiene necessario un valore di irraggiamento pari o superiore a 100 W/m^2 . In conclusione si ritiene sufficientemente cautelativa l'ipotesi di considerare una temperatura minima di funzionamento di cella FV pari a 0°C , e quindi i parametri elettrici sono:

$$V_{OC} = 54,06\text{V @ } 0^{\circ}\text{C} - V_{MPP} @ 0^{\circ}\text{C} = 44,86\text{V} - V_{MPP} @ 70^{\circ}\text{C} = 38,52\text{V}$$

$$I_{SC} = 14,62\text{A @ } 70^{\circ}\text{C} - I_{MPP} = 13,84\text{A}$$

Si prevede di realizzare stringhe costituite da 26 moduli FV collegati tra di loro elettricamente in serie. Ciascuna stringa elettricamente si caratterizza come segue:

$$V_{OC} = 54,06 \times 26 = 1'405,56\text{V} - V_{MPP} = 44,86 \times 26 = 1'166,36\text{V}$$

$$I_{SC} = 14,62\text{A @ } 70^{\circ}\text{C} - I_{MPP} = 13,84\text{A}$$

A) Verifica di coordinamento → tensione di isolamento CC

$$V_{IS\ DC} \geq 1'405,56\text{ V}$$

Moduli FV presentano tensione di isolamento pari a $1'500\text{V}$.

Si rimanda ai paragrafi successivi della presente relazione per la verifica della tensione di isolamento dei cavi DC.

B) Verifica di coordinamento → inverter: corrente di stringa CC

$$I_{SC} = 14,62\text{A @ } 70^{\circ}\text{C} - I_{MPP} = 13,84\text{A}$$

Per ciascun MPPT saranno collegate un massimo di 2 stringhe per cui:

$$I_{SC} = 29,24\text{ A @ } 70^{\circ}\text{C} - I_{MPP} = 27,68\text{ A}$$

Inverter → I_{max} per MPPT = $30\text{A} > 27,7\text{ A}$ **OK ✓**

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

Per quanto concerne la verifica di coordinamento a livello di inverter di stringa si considera la configurazione più gravosa elettricamente ovvero un inverter al quale risultano afferenti 18 stringhe.

Quindi le grandezze elettriche da verificare sono:

$$I_{SC,MAX} = 14,62 \times 18 = 263,16 \text{ A} - I_{MPP,MAX} = 13,84 \times 18 = 249,12 \text{ A}$$

$$\text{Inverter} \rightarrow I_{MPP,MAX} \text{ in ingresso} = 300 \text{ A} > 249,12 \text{ A} \text{ OK } \checkmark$$

$$\rightarrow I_{SC,MAX} \text{ in ingresso} = 300 \text{ A} > 263,16 \text{ A} \text{ OK } \checkmark$$

C) Verifica di coordinamento → inverter: tensione isolamento e range MPP

$$V_{IS} = 1'500 \text{ V} \geq 1'405,56 \text{ V} \text{ OK } \checkmark$$

$$V_{MPP,SUP} = 1'500 \text{ V} > 1'166,36 \text{ V} \text{ OK } \checkmark$$

D) Verifica di coordinamento → tensione di isolamento BT

$$V_{IS} \geq 800 \text{ V}$$

Inverter, cavi di collegamento BT e trasformatori lato BT sono tutti con tensione di isolamento pari a 1'000V.

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

3.3 Coordinamento Elettrico Lato CA

L'elemento di partenza per il coordinamento lato CA è l'inverter, le cui grandezze elettriche lato CA sono di seguito riassunte:

$$V_N = 800V \pm 10\% - 50/60Hz$$

Inverter → Potenza Uscita = 200 kVA, Potenza MAX = 215 kVA

$$I_{MAX} = 155,2 \text{ A} - \text{intervallo } \cos \varphi = 0,8_{CAP} \dots 0,8_{IND}$$

A) Verifica di coordinamento → Trasformatore MT/BT

Tensione Uscita Inverter 800V – Rapporto di trasformazione MT/BT 20'000/800 [V] **OK** ✓

Inverter → Potenza inverter 200kVA

max 10 inverter per trasformatore → 2'000kVA @40°C

Potenza trasformatore MT/BT: 2'000kVA@40° **OK** ✓

B) Verifica di coordinamento → tensione di isolamento BT

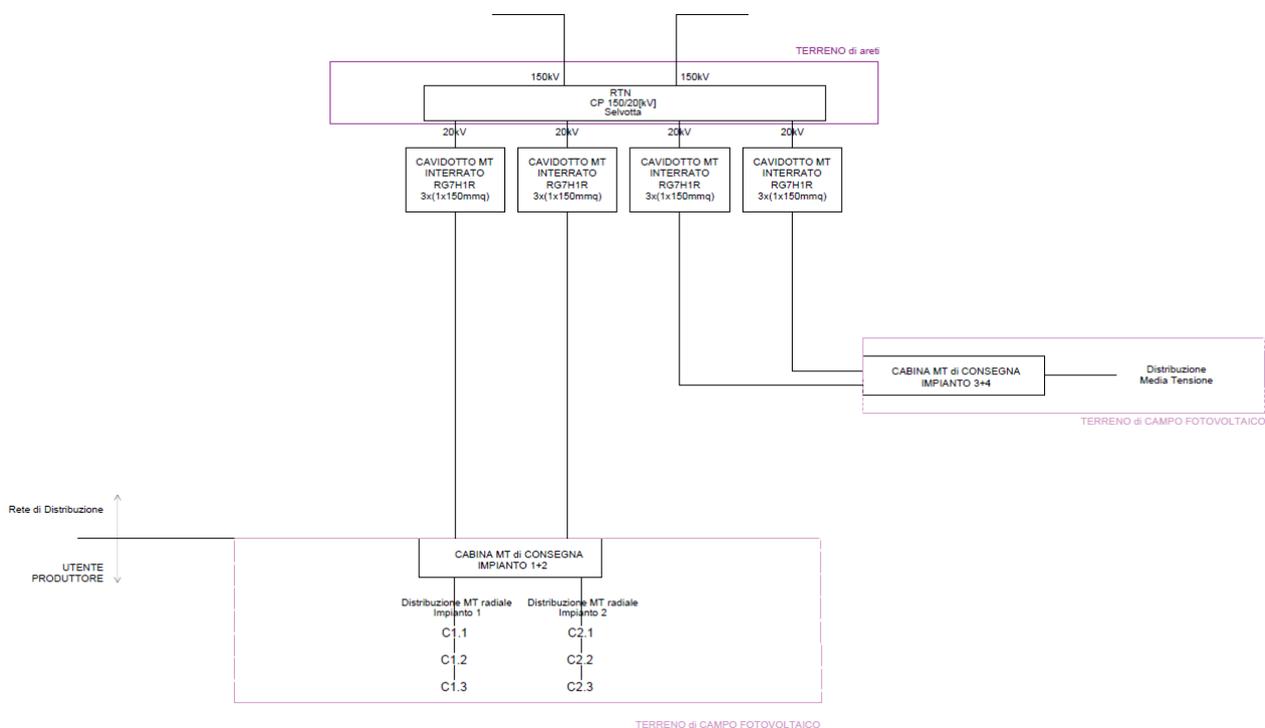
$$V_{IS BT} \geq 800V$$

Gli inverter d'impianto sono tutti con tensione di isolamento pari a 1'000V.

Si rimanda ai paragrafi successivi della presente relazione per la verifica della tensione di isolamento dei cavi CA.

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

Come specificato nello schema unifilare, la distribuzione MT di ciascun impianto è costituita da una singola linea radiale che confluisce nella cabina di consegna, di seguito riportato lo schema a blocchi e le potenze e corrente di ogni singola tratta:



Cabina	Linea MT	Potenza [MVA]	Corrente [A] @20kV
C1.1		2	57,8
C1.2		2	57,8
C1.3		2	57,8
	Cabina di consegna lotto 1	6	173,4
C2.1		2	57,8
C2.2		2	57,8
C2.3		2	57,8
	Cabina di consegna lotto 2	6	173,4
C3.1		2	57,8
C3.2		2	57,8
C3.3		2	57,8
	Cabina di consegna lotto 3	6	173,4
C3.1		2	57,8
C3.2		2	57,8
C3.3		2	57,8
	Cabina di consegna lotto 4	6	173,4
Lotto d'impianti		24	

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

C) Verifica di coordinamento → Quadro MT di cabina di trasformazione

Caratteristiche e classificazione: 24kV-16kA-630A - LSC2A/PI IAC AFLR 16kA x 1s

Tensione Uscita Trasformatore 20'000V - Tensione isolamento quadro MT di Cabina 24'000V **OK ✓**Corrente massima linee radiale massima 173,4A – Corrente nominale quadro MT di cabina 630A **OK ✓**

D) Verifica di coordinamento → corrente di linea MT

$$I_{CAB} = 57,8A$$

Si rimanda ai paragrafi successivi della presente relazione per la verifica della portata di corrente del cavo MT nelle varie tratte.

E) Verifica di coordinamento → Quadro MT di SE di Trasformazione

Caratteristiche e classificazione: 24kV-16kA-630A - LSC2A/PI IAC AFLR 16kA x 1s

Tensione Uscita Trasformatore 20'000V - Tensione isolamento quadro MT di Cabina 24'000V **OK ✓**Corrente massima linee radiali 173,2A – Corrente nominale linee partenza cavo 630A **OK ✓**

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

Come indicato, la potenza massima in immissione del lotto di impianti è pari a 24 MW.

La potenza installata lato DC dell'impianto è pari a 31'006,30 kWp, che è la potenza @STC della somma di tutti i moduli fotovoltaici. La potenza massima generabile dagli inverter è pari a 24'000 kVA.

H) Verifica impianto → Rapporto potenza DC / potenza AC

Potenza DC = a 31'006,30 kWp – Potenza massima generabile dagli inverter = 24'000 kVA

Rapporto potenze DC/AC = 1,29 **OK** 

Tenuto conto:

- della potenza effettivamente resa disponibile nel punto di generazione per effetto degli scostamenti dalle STC (25°C temperatura di cella FV, 1000W/m²),
- delle perdite dal punto di generazione (morsetti moduli FV) al PdC,

si ritiene che il rapporto DC/AC sia corretto.

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

4 Verifica cavi elettrici

Questo capitolo è dedicato alla verifica della correttezza della tipologia di cavo scelto, verificando per ogni tipologia di cavi e per ogni tratta:

- Verifica portata corrente e coordinamento protezioni;
- Verifica caduta di tensione;
- Verifica tenuta al corto circuito;
- Verifica delle perdite.

4.1 Cavi di Stringa

I cavi in corrente continua da verificare sono di due tipologie: cavi di stringa.

4.1.1 Tensione di esercizio

In merito alla tensione, la sezione in corrente continua di un impianto di generazione fotovoltaico ha un valore di tensione di esercizio variabile, a seconda dell'irraggiamento e della regolazione dell'inverter, che impone la tensione di esercizio in ricerca del punto di massima (MPP) o, in rarissimi casi, impone una tensione di esercizio che mantenga in uscita (lato CA) un valore imposto di potenza.

Per conoscere i valori di riferimento di tensione bisogna quindi fare riferimento al dimensionamento campo FV; la tensione può variare all'interno di un intervallo 0...1'405,56 V, per cui il valore di riferimento della tensione è pari a:

$$V_e = 1'500 \text{ V}$$

4.1.2 Corrente di esercizio

In merito alla corrente, analogamente a quanto descritto nel paragrafo precedente, bisogna fare riferimento al dimensionamento campo FV; la corrente si muove all'interno di un intervallo 0...14,39A; in accordo con le Norme di riferimento, la corrente di dimensionamento è pari alla corrente di corto circuito a 70°C di temperatura di cella, per cui il valore di riferimento della corrente è pari a:

$$I_N = 14,62 \text{ A}$$

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

4.1.3 Verifica Portata di Corrente e Coordinamento Protezioni

Per valutare la portata in corrente devono essere determinati su ogni tratta i coefficienti di declassamento della portata in funzione delle condizioni di installazione.

I coefficienti di declassamento sono in funzione della modalità di posa, che per i cavi in Corrente Continua sono:

- in aria, nei tratti lungo la struttura fotovoltaica di sostegno dei moduli fotovoltaici, con più circuiti;
- all'interno di tubo corrugato nei tratti sotterranei per il collegamento tra diverse file strutture fotovoltaiche, con più circuiti.

I coefficienti sono rispettivamente:

Cavi in aria	Cavi in Tubo Corrugato interrato
Temperatura → $k_1 = 1$	Temperatura → $k_1 = 1$
Tipo di posa: stesso piano, circuiti a contatto → $k_2 = 0,80$	Tipo di posa: più circuiti per tubo in aria → $k_2 = 0,6$
	profondità = 0,7m → $k_3 = 1$
	resistività terreno = 1,5 °K x m/W → $k_4 = 1$
fattore di sicurezza → $k_5 = 1$	fattore di sicurezza → $k_5 = 1$
TOTALE → $k_{TOT} = k_1 \times k_2 \times k_5 = 0,8$	TOTALE → $k_{TOT} = k_1 \times k_2 \times k_3 \times k_4 \times k_5 = 0,6$

(*) = il valore di portata del cavo solare è già dichiarato a 60°C, per cui in via cautelativa si considera un fattore di temperatura unitario.

È evidente che la condizione peggiorativa sia il tratto in cui i cavi sono posizionati all'interno del tubo corrugato: la verifica della portata di corrente deve essere fatta considerando questa condizione peggiorativa: verrà quindi considerato il fattore $k_{TOT} = 0,6$.

La verifica ha esito positivo per ogni tratta della condizione:

$$I_N < I_Z$$

dove:

- I_N è la corrente nominale della linea da proteggere;
- I_Z è la portata del cavo.

Facendo riferimento alla configurazione cavi riportata in relazione tecnica impianto e nello schema unifilare, e al valore di portata lorda dei cavi (portata in aria libera), riportato nel data sheet in appendice, di seguito la tabella riassuntiva di verifica portata di corrente.

(unità di misura: I_N , I_Z e la portata lorda sono espresse in A, la configurazione cavi è espressa in mm²)

I_N	Configurazione Cavo	Potata lorda	ktot	I_Z	Verifica
14,62	2x(1x6)	70	0,6	42	OK

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

4.1.3.1 Coordinamento Protezioni

Ogni cavo di corrente continua sarà protetto direttamente dall'inverter, che impone che ogni canale di ingresso abbia una corrente inferiore a 30A.

La verifica del coordinamento ha esito positivo se è rispettata la seguente condizione:

$$I_N < I_r < I_Z$$

dove:

- I_N è la corrente nominale di stringa, pari a 14,62 A;
- I_r è la corrente regolata, ovvero settaggio della protezione all'interno dell'inverter, pari a 30 A;
- I_Z è la corrente del cavo selezionato, calcolata nel precedente paragrafo, pari a 42 A.

Nel presente caso si ha:

$$14,62 < 30 < 42$$

La portata di corrente e la verifica coordinamento di protezioni di tutte le linee è verificata. OK 

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

4.1.4 Verifica Caduta di Tensione

Per valutare la caduta di tensione sarà applicata la seguente formula:

$$\Delta v\% = \frac{n \times I_e \times L \times r}{V_e}$$

dove:

- n una costante che dipende dal sistema di distribuzione, che nel caso di corrente continua è pari a 2;
- I_e è la corrente della singola stringa, che non può essere la corrente di dimensionamento, ma quella di funzionamento a massima potenza, pari a 13,84A;
- L è la lunghezza del tratto di stringa, si considera la stringa che ha il tratto più lungo, con L pari a circa 100m;
- r è la resistenza specifica del conduttore, in accordo con data sheet pari a 3,39 Ω /km;
- V_e è la tensione di esercizio della stringa, che come spiegato è variabile durante l'esercizio; si considera il valore di MPP, quindi pari a $V_{MPP} = 1'166,36V$.

Si può quindi applicare la formula del calcolo della caduta di tensione:

$$\Delta v\%_{media} = \frac{2 \times 13,84 \times 0,100 \times 3,39}{1'166,36} = 0,81\%$$

Il valore di caduta di tensione per ogni sezione è limitato dalle Norme ed il valore limite è pari al 3%, per cui:

$$\Delta v\%_{MAX} = 0,81\% < 3\%$$

Il dimensionamento del cavo CC rispetta le condizioni di massima caduta di tensione della tratta. OK 

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

4.1.5 Verifica Tenuta al corto circuito

Per valutare la tenuta al corto circuito (energia passante) sarà applicata la seguente formula:

$$S_{\min} = \frac{I_{CC} \times \sqrt{t}}{k_C}$$

Il funzionamento della sezione in corrente continua dell'impianto fotovoltaico prevede una corrente di corto circuito pari a 14,62A e quindi la verifica della tenuta al corto circuito altro non è che la verifica della portata del cavo, già verificata nei paragrafi precedenti.

4.1.6 Verifica Perdite

Per valutare le perdite dei cavi corrente continua si applica la seguente formula:

$$\Delta P_{CC} = \frac{n \times r \times L \times I_e^2}{P_N}$$

dove:

- n è il numero di fasi della linea, pari a 2 nelle linee in Corrente Continua;
- r è la resistenza specifica del conduttore, in accordo con data sheet pari a 3,39 Ω/km;
- L è la lunghezza del cavo di stringa, espressa in km, si considera la lunghezza calcolata nel paragrafo precedente e pari a 100m, ovvero 0,1km;
- I_e è la corrente della singola stringa, che non può essere la corrente di dimensionamento, ma quella di funzionamento a massima potenza, pari a 13,84A;
- P_N è la potenza trasmessa dalla stringa a corrente I_e, quindi pari alla potenza di picco della stringa, pari a 0,575x26= 14,95kW.

In conclusione le perdite di potenza nel cavo di stringa sono pari a:

$$\Delta P_{CC} = \frac{2 \times 3,39 \times 0,100 \times 13,84^2}{14'950} = 0,87\%$$

Nel calcolo delle perdite si potrà quindi considerare in via cautelativa un valore medio di perdite collegamenti CC stringa pari a 1%.

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

4.2 Cavi BT – Corrente alternata

4.2.1 Tensione di esercizio

La tensione di esercizio è 800V.

4.2.2 Corrente di esercizio

La corrente nominale di ogni singola tratta è determinata dall'inverter che è l'elemento generatore dell'impianto fotovoltaico ed alimenta la singola tratta. Facendo riferimento al data sheet della macchina, la corrente di esercizio è pari a:

$$I_e = 155,2 A$$

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

4.2.3 Verifica Portata di Corrente e Coordinamento Protezioni

Per valutare la portata in corrente devono essere determinati su ogni tratta i coefficienti di declassamento della portata in funzione delle condizioni di installazione.

I coefficienti di declassamento sono in funzione della modalità di posa, che per i cavi in corrente alternata in BT sono:

- direttamente interrati lungo tutto il percorso, in formazione in piano;
- all'interno di tubo corrugato per brevi tratti di raccordo (un tubo per terna cavi inverter), in uscita dall'inverter per evitare l'irraggiamento diretto e in prossimità della cabina di trasformazione per raggiungere il proprio interruttore scatolato.

I coefficienti sono rispettivamente:

Cavi Direttamente Interrati	Cavi in Tubo Corrugato (un circuito per tubo)
Temperatura → $k_1 = 1$	Temperatura ≤ 45 → $k_1 = 0,87$
Tipo di posa: stesso piano, circuiti a distanza 2D → $k_2 = 0,80$	Tipo di posa: un circuito per tubo in aria → $k_2 = 0,80$
profondità = 0,7m → $k_3 = 1$	
resistività terreno = $1,5 \text{ }^\circ\text{K} \times \text{m/W}$ → $k_4 = 1$	
fattore di sicurezza → $k_5 = 1$	fattore di sicurezza → $k_5 = 1$
TOTALE → $k_{TOT} = k_1 \times k_2 \times k_3 \times k_4 \times k_5 = 0,8$	TOTALE → $k_{TOT} = k_1 \times k_2 \times k_3 \times k_4 \times k_5 = 0,7$

La condizione peggiorativa è quindi della tratta in tubo corrugato.

La verifica ha esito positivo per ogni tratta della condizione:

$$I_N < I_Z$$

dove:

- I_N è la corrente nominale della linea da proteggere;
- I_Z è la portata del cavo.

I_N	Configurazione Cavo	Portata lorda	k tot	I_z	Verifica
155,2A	3x(1x300)	385	0,7	269,5	OK

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

4.2.3.1 Coordinamento Protezioni

Deve essere verificato anche il coordinamento protezioni, ed ogni cavo di corrente alternata sarà protetto dall'interruttore scatolato (MCCB), che avrà anche funzione di Interruttore Generale di Generatore (Inverter), con soglie regolabili in funzione della propria corrente nominale 250A. A lato è riportato un estratto del catalogo ABB che illustra le caratteristiche elettriche principali che deve avere l'interruttore – Tmax T4-L relè PR221DS.

Il settaggio di questo relè per la protezione cavo BT è il seguente:

Protezione linee inverter BT Relè PR221DS

Termica → 200A t=0,7s

Magnetica → $I \geq 5I_N$ t=40ms

		Tmax T4	
Corrente ininterrotta nominale	[A]	250	
Poli		3, 4	
Tensione nominale d'impiego, U _e (AC) 50-60 Hz	[V]	1000	1150
Tensione nominale di tenuta ad impulso, U _{imp}	[kV]	8	
Tensione nominale d'isolamento, U _i	[V]	1000	1150
Tensione di prova a frequenza industriale per 1 min.	[V]	3500	
Potere di interruzione nominale limite in cortocircuito, I _{cu}	[kA]	12	20
	(AC) 50-60 Hz 1000 V	[kA]	12
	(AC) 50-60 Hz 1150 V	[kA]	12
Potere di interruzione nominale di servizio in cortocircuito, I _{cs}	[kA]	12	12
	(AC) 50-60 Hz 1000 V	[kA]	6
	(AC) 50-60 Hz 1150 V	[kA]	6
Potere di chiusura nominale in cortocircuito, I _{cm}	[kA]	24	40
	(AC) 50-60 Hz 1000 V	[kA]	24
	(AC) 50-60 Hz 1150 V	[kA]	24
Categoria di utilizzazione (IEC 60947-2)		A	
Attitudine al sezionamento		■	
Norma di riferimento		IEC 60947-2	
Sganciatori termomagnetici	TMD	■	
	TMA	■	
Sganciatori elettronici	PR21DS/LS/I	■	
	PR21DS/I	■	
	PR22DS/P_LSI	■	
	PR22DS/P_LSIG	■	
	PR22DS/PD_LSI	■	
	PR22DS/PD_LSIG	■	
	PR22MP	■	
Terminali		FC Cu - F - EF	
Esecuzione		F, R, W	F
Vita meccanica	[Nr. manovre]	20000	
	[Nr. manovre orarie]	240	
Dimensioni base fuso ⁶⁾	3 poli	L [mm]	105
	4 poli	L [mm]	140
		P [mm]	103,5
		H [mm]	295
Peso	fisso	3/4 poli	[kg] 2,95 / 3,05 2,95 / 3,05
	rimovibile	3/4 poli	[kg] 3,6 / 4,65
	estrabile	3/4 poli	[kg] 3,85 / 4,9

La verifica del coordinamento ha esito positivo se è rispettata la seguente condizione:

$$I_N < I_r < I_Z$$

dove:

- I_N è la corrente nominale della linea da proteggere, pari a 155,2A;
- I_r è la corrente regolata, ovvero settaggio della protezione all'interno dell'inverter, pari a 200A;
- I_Z è la corrente calcolata nel precedente paragrafo, pari a 269,5A.

Nel presente caso si ha:

$$155,2 < 200 < 269,5 \text{ A}$$

La portata di corrente e la verifica coordinamento di protezioni di tutte le linee è verificata. **OK** 

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

4.2.4 Verifica Caduta di Tensione

Per valutare la caduta di tensione sarà applicata la seguente formula:

$$\Delta v\% = \frac{n \times I_e \times L \times r}{V_e}$$

dove:

- n una costante che dipende dal sistema di distribuzione, che nel caso di corrente continua è pari a $\sqrt{3} = 1,73$;
- I_e è la corrente di esercizio del singolo inverter, pari a 155,2A;
- L è la lunghezza del tratto di inverter, si considera l'inverter che ha il tratto più lungo, con L pari a 320m;
- r è la resistenza specifica del conduttore, in accordo con data sheet pari a 0,125 Ω /km a 20°C che riportati a 60°C sono pari a 0,144 Ω /km;
- V_e è la tensione di esercizio, pari a 800V

Si può quindi applicare la formula del calcolo della caduta di tensione:

$$\Delta v\% = \frac{1,73 \times 155,2 \times 0,320 \times 0,144}{800} = 1,54\%$$

e quindi:

$$\Delta v\%_{CC} = 1,54\% < 3\% = \Delta v\%_{MAX}$$

Il dimensionamento del cavo CA rispetta le condizioni di massima caduta di tensione della tratta. OK 

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

4.2.5 Verifica Tenuta al corto circuito

Per valutare la tenuta al corto circuito (energia passante) sarà applicata la seguente formula:

$$S_{\min} = \frac{I_{CC} \times \sqrt{t}}{k_C}$$

Il valore della corrente da considerare per la presente verifica è pari alla corrente di corto circuito in bassa tensione del trasformatore MT/BT pari a 24,08 kA.

dove:

- I_{CC} è la corrente di corto circuito sulla tratta in analisi, pari a 24,08kA ovvero pari alla corrente di corto circuito in bassa tensione del trasformatore sommata alla corrente di corto circuito degli inverter di stringa (155,4 A) afferenti alla medesima cabina;
- t è il tempo di estinzione del guasto, pari a 170ms (100ms ritardo intenzionale del relè protezione MT + 70ms tempo medio dell'effettiva apertura dei circuiti dell'interruttore dal comando del relè);
- K_c è un fattore il cui valore dipende dal materiale del conduttore, dal materiale isolante e dal tipo di conduttore utilizzato; nel presente caso pari a 143.

Si può quindi applicare la formula di verifica di tenuta all'energia passante:

$$S_{\min} = \frac{I_{CC} \times \sqrt{t}}{k_C} = \frac{25'478 \times \sqrt{0,170}}{143} = 73,5 \text{ mm}^2$$

e quindi:

Il cavo è in grado di supportare l'energia passante di corto circuito in ogni sua tratta. OK 

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

4.2.6 Verifica Perdite

Per valutare le perdite dei cavi corrente continua si applica la seguente formula:

$$\Delta P_{CC} = \frac{n \times r \times L \times I_e^2}{P_N}$$

dove:

- n è il numero di fasi della linea, pari a 3 nelle linee in Corrente Alternata;
- r è la resistenza specifica del conduttore, in accordo con data sheet pari a 0,125 Ω /km a 20°C che riportati a 60°C sono pari a 0,144 Ω /km;
- L è la lunghezza del cavo di stringa, si considera la lunghezza media del cavo;
- I_e è la corrente della singola stringa, che non può essere la corrente di dimensionamento, ma quella di funzionamento a massima potenza, pari a 155,4A;
- P_N è la potenza trasmessa dalla singola linea AC a corrente I_e , quindi pari alla potenza inverter, pari a 200,0kW.

In conclusione le perdite di potenza nel cavo di stringa sono pari a:

$$\Delta P_{CA} = 0,5\%$$

Nel calcolo delle perdite si potrà quindi considerare in via cautelativa un valore medio di perdite collegamenti CA pari a 0,5%.

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

4.3 Cavi in Media Tensione

I cavi in media tensione sono necessari per portare l'energia prodotta dalle cabine di trasformazione alla cabina di consegna.

Il dimensionamento dei cavi di collegamento tra cabina di consegna e cabina primaria non verrà trattato nella presente relazione in quanto tipologia e sezione dei cavi sono stati indicati dal Distributore.

4.3.1 Tensione di esercizio

La tensione di esercizio della rete di Media Tensione del presente impianto è 20'000V.

La variazione di tensione di rete ammessa su Media Tensione (CEI 016) è 85% V_N ... 110% V_N .

In conclusione i valori di riferimento della tensione di esercizio sono:

$$V_e = 20'000 \text{ V, con intervallo funzionamento su rete MT pari a } 85\% \dots 110\% V_e$$

4.3.2 Verifica Portata di Corrente e Coordinamento Protezioni

La corrente nominale di ogni singola tratta è determinata dalla potenza trasmessa, che in prima approssimazione equivale a dire il numero di inverter che è l'elemento generatore sottesi alla singola tratta.

Per valutare la portata in corrente devono essere determinati su ogni tratta i coefficienti di declassamento della portata in funzione delle condizioni di installazione.

I coefficienti di declassamento sono in funzione della modalità di posa, che per i cavi di Media Tensione sono:

- direttamente interrati lungo tutto il percorso, in formazione a trifoglio;
- all'interno di tubo corrugato agli estremi (un tubo per terna cavi inverter), in ingresso ed in uscita dalle varie cabine di collegamento.

I coefficienti sono rispettivamente:

Cavi Direttamente Interrati	Cavi in Tubo Corrugato (un circuito per tubo)
Temperatura $\rightarrow k_1 = 1$	Temperatura $\leq 45^\circ\text{C} \rightarrow k_1 = 0,87$
Tipo di posa: stesso piano, circuiti a distanza 2D $\rightarrow k_2 = 0,80$	Tipo di posa: più circuiti per tubo in aria $\rightarrow k_2 = 0,80$
profondità = 1,1 m $\rightarrow k_3 = 0,97$	
resistività terreno = 1,5 °K x m/W $\rightarrow k_4 = 1$	
fattore di sicurezza $\rightarrow k_5 = 0,95$	fattore di sicurezza $\rightarrow k_5 = 0,95$
TOTALE $\rightarrow k_{TOT} = k_1 \times k_2 \times k_3 \times k_4 \times k_5 = 0,74$	TOTALE $\rightarrow k_{TOT} = k_1 \times k_2 \times k_3 \times k_4 \times k_5 = 0,66$

(*) = il valore di portata del cavo solare è già dichiarato a 60°C, per cui in via cautelativa si considera un fattore di temperatura unitario.

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

Si determina ora la condizione peggiorativa prendendo ad esempio il cavo da 120mm², seguendo l'indicazione fornita dal costruttore a seconda che sia direttamente interrata o in tubo, calcoliamo la condizione peggiorativa:

Cavi Direttamente Interrati	Cavi in Tubo Corrugato (un circuito per tubo)
Portata Cavo interrato Lorda = 306A	Portata Cavo in aria Lorda = 345A
$k_{TOT} = 0,74$	$k_{TOT} = 0,66$
Portata Cavo Netta = 226,4A	Portata Cavo Netta = 227,7A

La condizione peggiorativa è quindi della tratta in tubo corrugato, che verrà verificata per ogni tipologia di cavo e di collegamento.

La verifica ha esito positivo per ogni tratta se:

$$I_N < I_z$$

dove:

- I_N è la corrente nominale della linea da proteggere;
- I_z è la portata del cavo.

TRATTA		L [km]	Tipologia Cavo	Configurazione cavo	Pn [kW]	In [A]	llorda [A]	ktot	Iz [A]	Iz>In
CC1	C1.1	0,42	AI - ARP1H5EX	3//(1x150)	6000	173,4	341,0	0,66	225,1	OK
C1.1	C1.2	0,15	AI - ARP1H5EX	3//(1x120)	4000	115,6	306,0	0,66	202,0	OK
C1.2	C1.3	0,10	AI - ARP1H5EX	3//(1x95)	2000	57,8	268,0	0,66	176,9	OK
CC2	C2.1	0,32	AI - ARP1H5EX	3//(1x150)	6000	173,4	341,0	0,66	225,1	OK
C2.1	C2.2	0,26	AI - ARP1H5EX	3//(1x120)	4000	115,6	306,0	0,66	202,0	OK
C2.2	C2.3	0,15	AI - ARP1H5EX	3//(1x95)	2000	57,8	268,0	0,66	176,9	OK
CC3	C3.1	0,19	AI - ARP1H5EX	3//(1x150)	6000	173,4	341,0	0,66	225,1	OK
C3.1	C3.2	0,35	AI - ARP1H5EX	3//(1x120)	4000	115,6	306,0	0,66	202,0	OK
C3.2	C3.3	0,13	AI - ARP1H5EX	3//(1x95)	2000	57,8	268,0	0,66	176,9	OK
CC4	C4.1	0,37	AI - ARP1H5EX	3//(1x150)	6000	173,4	341,0	0,66	225,1	OK
C4.1	C4.2	0,17	AI - ARP1H5EX	3//(1x120)	4000	115,6	306,0	0,66	202,0	OK
C4.2	C4.3	0,03	AI - ARP1H5EX	3//(1x95)	2000	57,8	268,0	0,66	176,9	OK

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

4.3.2.1 Coordinamento Protezioni

Nella sezione di verifica della portata di corrente, dovrà essere verificato anche il coordinamento protezioni.

Il criterio per il settaggio delle protezioni lato MT è il seguente:

Protezione linee radiali MT	Relè di protezione elettronica
	51> → $I \geq 1,05 I_N$ t=1s
	51>> → $I \geq 3 I_N$ t=430ms
	51>>> → $I > 5 I_N$ t=100ms

La verifica del coordinamento ha esito positivo se è rispettata la seguente condizione:

$$I_N < I_r < I_z$$

dove:

- I_N è la corrente nominale della linea da proteggere;
- I_r è la corrente regolata, ovvero settaggio della protezione 51>;
- I_z è la corrente del cavo, ovvero quella calcolata con la portata del cavo.

TRATTA		L [km]	Tipologia Cavo	Configurazione cavo	Pn [kW]	In [A]	Ir [A]	Iz [A]	Verifica
CC1	C1.1	0,42	AI - ARP1H5EX	3//(1x150)	6000	173,4	< 190,8	< 225,1	OK
C1.1	C1.2	0,15	AI - ARP1H5EX	3//(1x120)	4000	115,6	< 127,2	< 202,0	OK
C1.2	C1.3	0,10	AI - ARP1H5EX	3//(1x95)	2000	57,8	< 63,6	< 176,9	OK
CC2	C2.1	0,32	AI - ARP1H5EX	3//(1x150)	6000	173,4	< 190,8	< 225,1	OK
C2.1	C2.2	0,26	AI - ARP1H5EX	3//(1x120)	4000	115,6	< 127,2	< 202,0	OK
C2.2	C2.3	0,15	AI - ARP1H5EX	3//(1x95)	2000	57,8	< 63,6	< 176,9	OK
CC3	C3.1	0,19	AI - ARP1H5EX	3//(1x150)	6000	173,4	< 190,8	< 225,1	OK
C3.1	C3.2	0,35	AI - ARP1H5EX	3//(1x120)	4000	115,6	< 127,2	< 202,0	OK
C3.2	C3.3	0,13	AI - ARP1H5EX	3//(1x95)	2000	57,8	< 63,6	< 176,9	OK
CC4	C4.1	0,37	AI - ARP1H5EX	3//(1x150)	6000	173,4	< 190,8	< 225,1	OK
C4.1	C4.2	0,17	AI - ARP1H5EX	3//(1x120)	4000	115,6	< 127,2	< 202,0	OK
C4.2	C4.3	0,03	AI - ARP1H5EX	3//(1x95)	2000	57,8	< 63,6	< 176,9	OK

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

4.3.3 Verifica Caduta di Tensione

Per valutare la caduta di tensione sarà applicata la seguente formula:

$$\Delta v\% = \frac{\sqrt{3} \times I_N \times L \times (r \times \cos \phi + x \times \sin \phi)}{V_e}$$

dove:

- I_N è la corrente di riferimento per la tratta, calcolata come multiplo della corrente di ogni cabina;
- L è la lunghezza della tratta, espressa in km, ricavata dal lay-out;
- r è la resistenza specifica, espressa in Ω/km , ricavata dalla tipologia di cavo utilizzata;
- x è la reattanza specifica, espressa in Ω/km , ricavata dalla tipologia di cavo utilizzata;
- $\cos \phi$ è il fattore di potenza del carico, posto pari a 0,99 per il tratto MT;
- $\sin \phi$ si deriva dal fattore di potenza;
- V_e è la tensione di esercizio, pari a 20'000V.

Dovrà essere calcolata la caduta di tensione di ogni singola linea MT, ovvero dalla cabina SSE all'ultima cabina di trasformazione di ogni linea radiale, sommando i vari contributi di ogni tratta che costituisce la linea MT.

In questa sezione si verificano i tratti di distribuzione MT.

TRATTA		L [km]	Tipologia Cavo	Configurazione cavo	Pn [kW]	In [A]	r [Ω/km]	x [Ω/km]	Δv_x [V]	ΔV_{tot} [V]	Δv_{tot} [%]	Verifica
CC1	C1.1	0,42	AI - ARP1H5EX	3//(1x150)	6000	173,4	0,218	0,12	29,310	45,387	0,227%	OK
C1.1	C1.2	0,15	AI - ARP1H5EX	3//(1x120)	4000	115,6	0,333	0,13	10,436			
C1.2	C1.3	0,10	AI - ARP1H5EX	3//(1x95)	2000	57,8	0,58	0,14	5,641			
CC2	C2.1	0,32	AI - ARP1H5EX	3//(1x150)	6000	173,4	0,218	0,12	21,983	48,682	0,243%	OK
C2.1	C2.2	0,26	AI - ARP1H5EX	3//(1x120)	4000	115,6	0,333	0,13	18,089			
C2.2	C2.3	0,15	AI - ARP1H5EX	3//(1x95)	2000	57,8	0,58	0,14	8,610			
CC3	C3.1	0,19	AI - ARP1H5EX	3//(1x150)	6000	173,4	0,218	0,12	13,259	45,033	0,225%	OK
C3.1	C3.2	0,35	AI - ARP1H5EX	3//(1x120)	4000	115,6	0,333	0,13	24,351			
C3.2	C3.3	0,13	AI - ARP1H5EX	3//(1x95)	2000	57,8	0,58	0,14	7,423			
CC4	C4.1	0,37	AI - ARP1H5EX	3//(1x150)	6000	173,4	0,218	0,12	25,821	38,785	0,194%	OK
C4.1	C4.2	0,17	AI - ARP1H5EX	3//(1x120)	4000	115,6	0,333	0,13	11,480			
C4.2	C4.3	0,03	AI - ARP1H5EX	3//(1x95)	2000	57,8	0,58	0,14	1,485			

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

4.3.4 Tenuta al corto circuito

Per valutare la tenuta al corto circuito (energia passante) sarà applicata la seguente formula:

$$S_{\min} = \frac{I_{CC} \times \sqrt{t}}{k_C}$$

dove:

- I_{CC} è la corrente di corto circuito sulla tratta in analisi, considerati i dati di targa, abbiamo un massimo pari a 3,85kA dato dalla somma della I_{CC} immediatamente a valle del singolo trasformatore AT/MT (contributo del trasformatore AT/MT);
- t è il tempo di estinzione del guasto, pari a 170ms (100ms ritardo intenzionale del relè protezione MT + 70ms tempo medio dell'effettiva apertura dei circuiti dell'interruttore dal comando del relè);
- K_c è un fattore il cui valore dipende dal materiale del conduttore, dal materiale isolante e dal tipo di conduttore utilizzato; nel presente caso pari a 116.

La verifica della tenuta al corto circuito ha esito positivo se è rispettata la seguente condizione:

$$S_{\text{tratta}} > S_{\min}$$

Tutte le linee hanno l'ultimo tratto di alimentazione di una singola cabina di trasformazione in configurazione 3//(1x90) mm², che è quindi la sezione minima di ogni tratta.

Si può quindi applicare la formula di verifica di tenuta all'energia passante:

$$S_{\min} = \frac{I_{CC} \times \sqrt{t}}{k_C} = \frac{3'850 \times \sqrt{0,170}}{116} = 13,7 \text{ mm}^2$$

e quindi:

$$S_{\text{tratta}} = 90 > 13,7 = S_{\min}$$

Il cavo è in grado di supportare l'energia passante di corto circuito in ogni sua tratta. OK 

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione

4.3.5 Perdite

Per valutare le perdite della linea si dovrà applicare la seguente formula ad ogni singola linea di alimentazione della cabina x:

$$\Delta P_x = \frac{n \times \sum_0^n (r \times L) \times I_{N_x}^2}{P_{N_x}}$$

dove:

- n è il numero di fasi della linea, pari a 3 nelle linee in Media Tensione;
- $\Sigma (r \times L)$ è la sommatoria delle resistenze specifiche di ogni singola tratta di lunghezza L che compone il collegamento tratta x;
- I_{N_x} è la corrente nominale della tratta x;
- P_N è la potenza attiva nominale della tratta x.

Dovrà essere verificata la sezione di ogni singola linea MT, ovvero dalla cabina SSE all'ultima cabina di trasformazione di ogni linea radiale, sommando le perdite di ogni tratta che costituisce la linea MT.

Non ci sono condizioni di massime perdite imposte dalle Norme di riferimento, ma essendo un impianto di produzione di energia elettrica, si vogliono limitare il più possibile le perdite in modo da massimizzare l'energia in uscita dal contatore di energia nel Punto di Misura Fiscale (Punto di Consegna impianto Utente-Produttore).

In questa sezione si verificano i tratti di distribuzione MT.

TRATTA	L [km]	Tipologia Cavo	Configurazione cavo	Pn [kW]	In [A]	r [Ω/km]	ΔP _x [W]	ΔP _{tot} [W]	ΔP% [%]	
CC1	C1.1	0,42	AI - ARP1H5EX	3//(1x150)	6000	173,4	0,218	8260	10815	0,18%
C1.1	C1.2	0,15	AI - ARP1H5EX	3//(1x120)	4000	115,6	0,333	2003		
C1.2	C1.3	0,10	AI - ARP1H5EX	3//(1x95)	2000	57,8	0,58	552		
CC2	C2.1	0,32	AI - ARP1H5EX	3//(1x150)	6000	173,4	0,218	6195	10509	0,18%
C2.1	C2.2	0,26	AI - ARP1H5EX	3//(1x120)	4000	115,6	0,333	3471		
C2.2	C2.3	0,15	AI - ARP1H5EX	3//(1x95)	2000	57,8	0,58	843		
CC3	C3.1	0,19	AI - ARP1H5EX	3//(1x150)	6000	173,4	0,218	3737	9136	0,15%
C3.1	C3.2	0,35	AI - ARP1H5EX	3//(1x120)	4000	115,6	0,333	4673		
C3.2	C3.3	0,13	AI - ARP1H5EX	3//(1x95)	2000	57,8	0,58	727		
CC4	C4.1	0,37	AI - ARP1H5EX	3//(1x150)	6000	173,4	0,218	7277	9625	0,16%
C4.1	C4.2	0,17	AI - ARP1H5EX	3//(1x120)	4000	115,6	0,333	2203		
C4.2	C4.3	0,03	AI - ARP1H5EX	3//(1x95)	2000	57,8	0,58	145		

Il valore di perdite medie cavi MT è pari a 1% @STC, valore ritenuto accettabile. OK ✓

Nel calcolo della producibilità, il valore delle perdite dei cavi MT sarà cautelativamente computato pari a 0,1 % @STC.

00	30-11-2022	Prima Emissione
Revisione	Data	Descrizione