Firmato digitalmente da
Alessandro Tedeschi
CN = Tedeschi Alessandro
C = IT

REGIONE SICILIA

PROVINCIA DI PALERMO

COMUNE DI CORLEONE

OGGETTO

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO AGRO-FOTOVOLTAICO E DELLE OPERE E INFRASTRUTTURE CONNESSE, NEL COMUNE DI CORLEONE (PA) DELLA POTENZA IN IMMISSIONE PARI A 37,62 MW DENOMINATO "TRENTASALME".

PROGETTO DEFINITIVO

PROPONENTE

Edison Rinnovabili S.p.A.

TITOLO

RELAZIONE CAVIDOTTO E SCHEMA A BLOCCHI

PROGETTISTA

Dott. Ing. Girolamo Gorgone

Collaboratore elettrico

Per. Ind. Alessandro Tedeschi per conto di Tesi s.r.l., Ordine dei periti industriali delle province di Bologna e Ferrara n°613

CODICE ELABORATO

ERIN-CO_R_06_A_D

SCALA

Girolamo Gorgone
05.12.2023
15:24:11
GMT+00:00

n°.Rev.	DESCRIZIONE REVISIONE	DATA	ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO

Rif. PROGETTO

N.

NOME FILE DI STAMPA

SCALA DI STAMPA DA FILE

COPYRIGHT EDISON RINNOVABILI S.P.A. - TUTTI I DIRITTI SONO RISERVATI A NORMA DI LEGGE

Sommario

1 PREMESSA 3
1.1 Società proponente 3
1.2 Inquadramento territoriale dell'intervento 3
1.3 Breve descrizione del progetto 8
2 NORMATIVE DI RIFERIMENTO 10
3 GLOSSARIO E DEFINIZIONI 11
4 CARATTERISTICHE GENERALI E DESCRIZIONE DEL TRACCIATO 13
4.1 Soluzione tecnica minima generale (STMG) 13
4.2 Dati generali dell'impianto fotovoltaico 13
4.3 Cavidotti interni ed esterni all'area di impianto 15
4.4 Caratteristiche dei cavi 16
5 DIMENSIONAMENTO E VERIFICA DEI CAVI 18
5.1 Calcolo di dimensionamento dei cavi 18
5.2 Calcolo di verifica dei cavi 18
6 CONNESIONE DELL'IMPIANTO ALLA RTN 19
6.1 Impianto di consegna 19
7 METODOLOGIA 19
7.1 Generale 19
7.2 Corrente nominale dei raffreddatori ad aria (i trasformatori scelti dovrebbero essere ONAN quindi il paragrafo salta) 20
7.3 Capacità di corrente dei cavi mt di 630 mm^2 20
7.4 Fattore di correzione 34
7.5 Convalida per corrente di generazione 36
7.6 Dimensionamento delle perdite in Corrente Alternata (AC) 37
7.7 Dimensionamento del cortocircuito 37
7.8 Dimensionamento della caduta di tensione 39
7.9 Schema a blocchi 40
8 RISULTATI 40
9 CONCLUSIONE 41

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 - Inquadramento generale su IGM 5
Figura 2 - Schema di inquadramento territoriale 6
Figura 3 Layout generale d'impianto ..... **Errore. Il segnalibro non è definito.**
Figura 3 - Sezione trifoglio 22
Figura 4 - Valori di portata effettiva per ogni circuito 36
Figura 5 - Verifica capacità di esportazione della massima potenza 36
Figura 6 - Valori di perdita di potenza del sistema 37
Figura 7 - Valori di cadute di tensione 39
Figura 8 Schema a blocchi 40

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 2 - Temperatura massima del conduttore per diversi tipi di composti isolante 20
Tabella 3 - Corrente nominale per cavi unipolari con isolante in XLPE - tensione nominale da 3,6 kV a 18/30 kV - conduttore in alluminio 21
Tabella 4 - Resistenza termica dei materiali 24
Tabella 5 - Spessore nominale dell'isolante in polietilene reticolato 25
Tabella 6 - Diametri minimi e massimi dei conduttori circolari in alluminio 25
Tabella 7 - Resistività termica dei materiali 27
Tabella 8- Diametro fittizio del conduttore 28
Tabella 9 - Conduttori a trifoglio per cavi unipolari e multipolari 30
Tabella 10 - Resistività elettriche e coefficienti di temperatura dei metalli utilizzati 30
Tabella 11 - Valori sperimentali per i coefficienti kp e ks 32
Tabella 12 - Valori di permittività relativa e fattori di perdita per l'isolamento di cavi ad alta e media tensione alla frequenza di alimentazione 33
Tabella 13 - Fattori correttivi per temperature ambiente al suolo diverse da 20° 34
Tabella 14 - Fattori di correzione per gruppi di circuiti trifase unipolari posati direttamente nel terreno 35
Tabella 15 - Fattori correttivi per profondità di posa diverse da 0,8 m per cavi interrati diretti 35
Tabella 16 - Fattori correttivi per le resistività termiche del suolo diverse da quelle dei cavi unipolari interrati 36
Tabella 17 - Valori di B, Q_e, Q_{20} dei materiali 38

1 PREMESSA

Il presente documento costituisce la Relazione cavidotto e schema a blocchi parte integrante del Progetto Definitivo per la realizzazione di un impianto di generazione di energia da fonte solare di tipo agro-fotovoltaico per una potenza nominale pari a 37,62 MW (37,62 MW in immissione), costituito da moduli fotovoltaici montati su strutture ad inseguimento monoassiale o *tracker*.

L'impianto interessa il comune di Corleone facente parte della Città metropolitana di Palermo. Le opere di connessione alla Rete Elettrica Nazionale interessano il medesimo comune nel cui territorio si localizza anche il punto di trasformazione e connessione.

1.1 Società proponente

La società realizzatrice dell'impianto è **Edison Rinnovabili S.p.A**. In circa 130 anni di storia aziendale, Edison ha saputo consolidarsi in vari settori ampliando le attività in cui è presente, in particolare quello della produzione, distribuzione e vendita di energia elettrica; i parchi di produzione energetica di Edison sono altamente sostenibili, flessibili ed efficienti e sono composti da impianti termoelettrici a ciclo combinato a gas (CCGT), impianti idroelettrici, eolici, solari e a biomasse.

Oggi Edison è una delle maggiori aziende in Italia nel settore delle rinnovabili configurandosi come un operatore integrato lungo la filiera energetica con attività che vanno dalla produzione alla gestione e manutenzione degli impianti fino alla vendita dell'energia.

1.2 Inquadramento territoriale dell'intervento

L'area destinata ad accogliere l'impianto agro-fotovoltaico (al seguito definita "area di impianto") ricade interamente nel comune di Corleone (PA), in contrada Trentasalme, e si compone di due aree contigue, separate dalla strada Provinciale SP 4, che collega la città di Corleone e di San Cipirello.

Il tracciato del cavidotto di connessione in uscita dall'area di impianto ricade, nella sua interezza, nel medesimo Comune e confluirà in un'area sita in località Circotta (a circa 9,5 km in linea d'area di impianto) ove si prevede una SSE Utente di trasformazione collegata alla nuova stazione elettrica 150/30 kV da realizzarsi.

Con riferimento alla cartografia della serie IGM 25V in scala 1:25000 l'area di impianto ricade nel Foglio n. 258-I-SO, il tracciato del cavidotto di connessione e la stazione di connessione interessano anche i Fogli n. 258-II-NO e n. 258-II-NE. In relazione alla Carta Tecnica Regionale in scala 1:10000,

il parco fotovoltaico e tutte le opere ad esso connesse ricadono nei fogli 607110, 607120, 607160 e 618130.

La superficie complessiva dell'Area disponibile per l'impianto è di circa 52,14 ettari, di cui soltanto una parte verrà effettivamente interessata dalla realizzazione del campo fotovoltaico.

L'area disponibile è interamente adibita ad accogliere seminativo semplice. L'altimetria nel complesso varia da un minimo di 307 ed un massimo di 374 m s.l.m. All'interno dell'area non sono presenti singolarità morfologiche fuorché una modesta area di impluvio esclusa da ogni intervento.

L'impianto è raggiungibile da Palermo attraverso la SS 624 Palermo - Sciacca, successivamente in corrispondenza dell'uscita per San Cipirello ed imboccando la SP 4 per circa 20 km si raggiunge contrada Trentasalme.

Di seguito si riporta uno schema di inquadramento territoriale dell'intervento ed una sintesi in forma tabellare di quanto sopra esposto, nonché le particelle del catasto del comune di Corleone nella disponibilità della Società proponente.

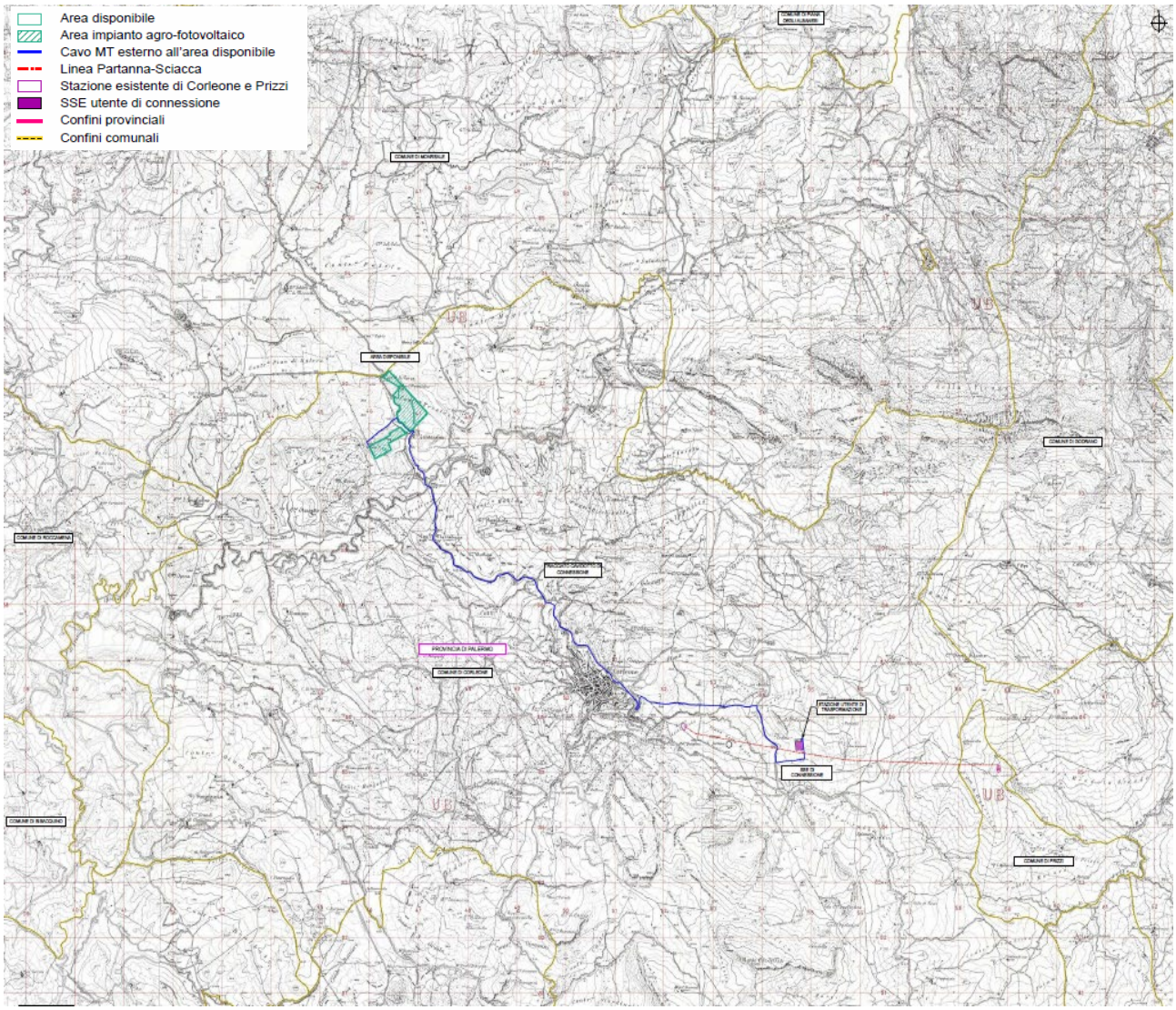


Figura 1 - Inquadramento generale su IGM

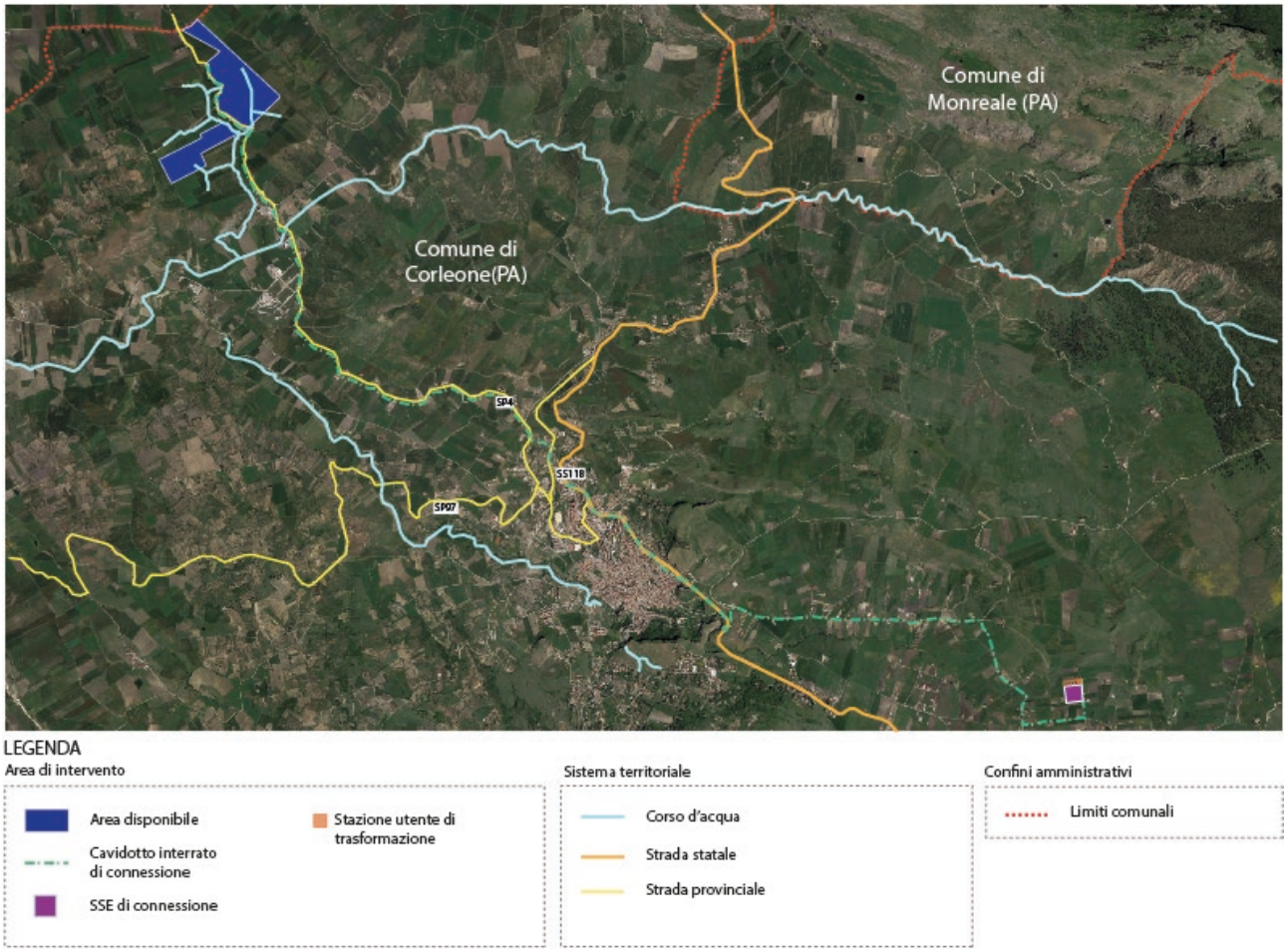


Figura 2 - Schema di inquadramento territoriale

IMPIANTO AGRO-FOTOVOLTAICO "TRENTASALME"				
CARATTERISTICHE DELL'IMPIANTO				
Potenza in immissione	37,62 MWp			
Superficie area disponibile	52,14 ha			
INQUADRAMENTO TERRITORIALE				
	IMPIANTO AGRO-FOTOVOLTAICO		SSE UTENTE DI TRASFORMAZIONE	
Località impianto	Contrada Trentasalme		Località Circotta	
Comuni interessati	Corleone (PA)			
Inquadramento CTR	607110, 607120, 607160, 618130			
Inquadramento IGM	258-I-SO, 258-II-NO, 258-II-NE			
INQUADRAMENTO CATASTALE				
Comune	Foglio	Particelle		
Corleone (PA)	4	31-109-111-112-113-115-116-708-709-711-712-713-714-715-716-717-846-847		
	9	140-141- 218-238-261		
TRACCIATO DEL CAVIDOTTO DI CONNESSIONE				
Comune	Strada percorsa	Tipologia di sedime	Distanza [m]	Tipologia di cavidotto
Corleone (PA)	Strada locale	Asfalto	975,97	Media tensione (MT)
	SP4	Asfalto	5755,10	
	Strada bianca	Sterrato	201,14	
	Via Pino Puglisi	Asfalto	164,87	
	Via G. Impastato	Asfalto	198,38	
	Via Salvatore Aldisio	Asfalto	1460,86	
	Via Napoli	Asfalto	275,27	
	SS118 - galleria	Asfalto	437,90	
	SS 118	Asfalto	202,54	
	SP75	Asfalto	255,30	
	T.O.C	Terreno	53,20	
	Strada locale	Asfalto	2418,28	
	Strada locale	Asfalto	1179,50	
	Strada bianca	Sterrato	590,52	
	Strada bianca	Sterrato	373,58	
	Pista di progetto	Sterrato	44,00	
Lunghezza totale del cavidotto			14,5 km circa	

1.3 Breve descrizione del progetto

La tecnologia fotovoltaica consente la trasformazione dell'energia associata alla radiazione solare in energia elettrica sfruttando la capacità di alcuni materiali semiconduttori (tra cui il silicio) di liberare elettroni a seguito dell'energia ceduta agli stessi da una radiazione elettromagnetica. L'effetto fotovoltaico è alla base della produzione di energia nelle *celle* che compongono i moduli fotovoltaici, comunemente chiamati *pannelli solari*.

I moduli o pannelli fotovoltaici sono montati in serie (stringhe) su telai ad inseguimento solare monoassiale che si sviluppano lungo l'asse Nord-Sud e permettono la rotazione dei moduli intorno a tale asse al fine di massimizzare la radiazione solare intercettata nel corso della giornata. I telai sono fissati al terreno per mezzo di pali infissi, evitando il ricorso a fondazioni in cemento armato.

In linea generale, un impianto fotovoltaico si compone di stringhe di moduli collegate tra loro. Gruppi di stringhe compongono i campi fotovoltaici in cui l'impianto è suddiviso, ciascuno afferente a una Power Station (o Cabina di campo). La power station ha il compito di innalzare la tensione della corrente convertendola da continua in alternata. Tutte le linee elettriche in uscita dalle power stations vengono convogliate alla cabina principale di impianto (o Cabina MTR - *Main Technical Room*) dalla quale parte la connessione alla rete elettrica nazionale.

L'impianto dispone anche di due Control room, locale adibito ad ufficio in cui sono collocati i terminali che consentono di monitorare il funzionamento di tutte le sue componenti.

All'impianto di produzione energetica è associato un programma agronomico che prevede la coltivazione di foraggere per raccolta e/o pascolamento diretto. Una fascia arborata correrà lungo il perimetro dell'impianto; la scelta delle specie e del sesto di impianto rifletterà la vocazione dello specifico tratto di fascia: produttiva e/o di miglioramento ambientale del sito. Le specie utilizzate saranno comunque tipiche del paesaggio agrario locale e della regione fitogeografica.

A seguire si riportano il layout generale di progetto e una tabella riassuntiva delle componenti principali dell'intervento. Per maggiori dettagli si rimanda agli elaborati di Progetto definitivo e dello Studio di impatto ambientale.

PRINCIPALI CARATTERISTICHE DELL'INTERVENTO	
IMPIANTO AGRIVOLTAICO	• N. 56.160 moduli fotovoltaici montati su strutture ad inseguimento solare monoassiale (*trackers*); il terreno tra e sotto i trackers mantiene la capacità produttiva; • N. 8 cabine di campo o power stations; • N. 2 cabine principali di impianto (Main Technical Room – MTR); • N. 2 Control room per il personale con annesso magazzino; • N. 2 magazzini dedicati all'attività agricola; • N. 2 cisterne per irrigazione; • Viabilità interna di servizio (strade bianche); • Recinzione e sistemi di illuminazione di emergenza e di sorveglianza; • Fascia alberata di mitigazione.
OPERE DI CONNESSIONE	• Cavidotto interrato MT lungo viabilità esistente dall'impianto alla Stazione Utente di Trasformazione; • SSE Utente di Trasformazione 150/30 kV; • Collegamento in antenna a 150 kV con la nuova SSE 150/36 KV da inserire in entra-esce alla linea RTN 150 kV "Prizzi - Corleone"; • Risoluzione degli elementi limitanti della risultante linea RTN 150 kV "Nuova SE - Ciminna" e/o potenziamento/rifacimento della linea RTN a 150 kV "S. Carlo – Sciacca". • Realizzazione di un nuovo elettrodotto RTN a 150 kV di collegamento tra le Cabine Primarie di Corleone e San Carlo, a cura Terna;

2 NORMATIVE DI RIFERIMENTO

- **IEC 60287-1-1**: Cavi elettrici - Calcolo della portata di corrente - Parte 1-1: Equazioni della portata di corrente (fattore di carico 100 %) e calcolo delle perdite - Generale;
- **IEC 60287-2-1**: Cavi elettrici - Calcolo della portata di corrente - Parte 2-1: Resistenza termica - Calcolo della resistenza termica;
- **IEC 60228**: Conduttori di cavi isolati;
- **IEC 60502-2**: Cavi elettrici con isolamento estruso e loro accessori per tensioni nominali da 1 kV (Um = 1,2 kV) a 30 kV (Um = 36 kV) - Parte 2: Cavi per tensioni nominali da 6 kV (Um = 7,2 kV) a 30 kV (Um = 36 kV).
- **IEEE Std 575-2014**: Guida per il collegamento delle schermature dei cavi di potenza a conduttore singolo con tensione nominale da 5kV a 500kV.
- **IEC 60949**: 1988 Calcolo delle correnti di cortocircuito termicamente ammissibili, tenendo conto degli effetti del riscaldamento non adiabatico.

3 GLOSSARIO E DEFINIZIONI

- **Tensione**: grandezza fisica che quantifica la differenza di potenziale elettrico tra due punti;
- **Tensione massima del sistema**: valore massimo di tensione ammissibile in un determinato momento e in qualsiasi punto del sistema, in condizioni di funzionamento normali;
- **Tensione nominale**: tensione con cui viene designato il sistema e a cui si riferiscono alcune delle sue caratteristiche di funzionamento;
- **Media tensione**: sistemi con tensioni superiori a 1kV con un massimo di 30kV;
- **Alta tensione**: sistemi con tensioni superiori a 30kV con un massimo di 220kV;
- **Altissima tensione**: sistemi con tensioni superiori a 220kV;
- **Alimentatore**: tutti i conduttori di un circuito tra l'apparecchiatura di origine del generatore e la protezione da sovracorrenti.
- **Amperaggio/Ampacity**: intensità massima di corrente che può essere stabilita costantemente attraverso un conduttore senza superare i limiti di temperatura che influenzano le caratteristiche fisiche ed elettriche del conduttore. Questa corrente varia a seconda delle condizioni di installazione;
- **Carico (elettrico)**: la potenza installata o richiesta su un alimentatore;
- **Resistività termica:** la resistività termica è una proprietà fisica dei materiali che misura la capacità di opporsi al passaggio del calore. Nel Sistema Internazionale di Unità di Misura, la resistività termica è misurata in K-m/W;
- **S (kVA)**: potenza apparente. Somma dell'energia dissipata dal circuito in un certo tempo sotto forma di calore o lavoro e dell'energia utilizzata per la formazione dei campi elettrici e magnetici dei suoi componenti;
- **cos ρ**: fattore di potenza, rapporto tra potenza attiva e reattiva;
- **Sezione (mm^2)**: area della sezione trasversale di un conduttore elettrico;
- **R (Ω/km)**: resistenza del conduttore a 90°C in corrente alternata (CA);
- **X (Ω/km)**: reattanza del conduttore a 90°C in corrente alternata;
- **ΔV (V)**: caduta di tensione su un alimentatore o un circuito, in volt;
- **ΔV%**: caduta di tensione su un alimentatore o un circuito, in percentuale;
- **%PJ = $3I^2R$**: percentuale delle perdite di potenza dovute all'effetto Joule;
- **Iz (A)**: amperaggio/ampacity nominale del conduttore elettrico;
- **Iz' (A)**: amperaggio/ampacity nominale del conduttore elettrico dopo l'applicazione dei fattori di correzione;
- **K**: Costante del materiale conduttivo (Tabella 43A, IEC 60364-4-43);

- **k_1**: Fattore di correzione da applicare quando la temperatura del suolo è diversa da 20°C (Tabella B.11, IEC 60502-2);
- **k_2**: Fattore correttivo da applicare per gruppi di circuiti posati nella stessa trincea (Tabella B.19, IEC 60502-2);
- **k_3**: Fattore di correzione da applicare quando la profondità di interramento è diversa da 0,8 m (Tabella B.12, IEC 60502-2);
- **k_4**: Fattore di correzione da applicare quando la resistività termica del terreno è diversa da 1,5 K·m/W (Tabella B.14, IEC 60502-2);

4 CARATTERISTICHE GENERALI E DESCRIZIONE DEL TRACCIATO

4.1 Soluzione tecnica minima generale (STMG)

A seguito di richiesta di connessione effettuata dal soggetto proponente Edison Rinnovabili S.p.A, è stata individuata da Terna S.p.A. la soluzione tecnica minima generale emessa in data 12/07/2023 e avente come oggetto:

"Codice Pratica: 202301794 – Comune di CORLEONE (PA) – Preventivo di Connessione Richiesta di connessione alla Rete di Trasmissione Nazionale (RTN) per un impianto di generazione da fonte rinnovabile (fotovoltaica) con potenza nominale ed in immissione pari a 37,62 MW".

La STMG prevede che l'impianto di produzione venga collegato in antenna a 150 kV con una nuova stazione elettrica di trasformazione (SE) 150/36 kV da inserire in entra -esce alla linea RTN 150 kV "Prizzi – Corleone", previa:

- realizzazione di un nuovo elettrodotto RTN a 150 kV di collegamento tra le Cabine Primarie di Corleone e San Carlo, a cura Terna;
- risoluzione degli elementi limitanti della risultante linea RTN 150 kV "Nuova SE – Ciminna" e/o potenziamento/rifacimento della linea RTN a 150 kV "S.Carlo – Sciacca".

4.2 Dati generali dell'impianto fotovoltaico

L'impianto fotovoltaico, tipo Agro-fotovoltaico, in questione, si compone di tre parti:

- Un impianto agro-fotovoltaico (area di impianto);
- Un cavidotto interrato di connessione, tra l'impianto agro-fotovoltaico e la stazione di connessione, che si articola pressoché lungo la viabilità esistente;
- Una stazione utente di connessione collegata in antenna a 150 kV con nuova stazione elettrica 150/36 kV da inserire in entra - esce alla linea RTN 150 kV "Prizzi – Corleone".

L'impianto è costituito da moduli o pannelli fotovoltaici di tipo bifacciale montati in serie su telai ad inseguimento solare monoassiali (tracker) per la massimizzazione della radiazione solare intercettata nel corso della giornata. I moduli sono associati in stringhe da 30 unità disposti su strutture ad inseguimento solare monofila da 30 pannelli o su due strutture ad inseguimento solare monofila da 15 pannelli.

Le stringhe, vengono raggruppate a formare i campi fotovoltaici, l'impianto di progetto prevede l'individuazione dal punto di vista elettrico di 8 campi comprendenti da stringhe da 28 o 29 moduli,

ciascuno servito da una power station contenente da due a quattro inverter; il tutto dimensionato e rappresentato dagli schemi elettrici.

L'impianto agro-fotovoltaico comprende:

- N. 8 cabine di campo o power stations che ricevono i cavi provenienti dai moduli FV interconnessi convertendo l'energia elettrica da essi prodotta da corrente continua a corrente alternata tramite inverter ed elevando la tensione da bassa BT a media MT;
- N. 2 cabina principale di impianto (Main technical room-MTR) nella quale sono convogliate tutte le linee di media tensione provenienti dalle power stations. Una MTR di connessione intraimpianto tra l'area Sud e l'area Nord, l'altra di connessione estraimpianto tra l'impianto FV e la SE di trasformazione;
- N. 2 control room che ospita un locale a ufficio e i servizi igienici per il personale;
- Viabilità interna di servizio;
- Recinzione e sistemi di illuminazione di emergenza e di sorveglianza;
- N. 8 subcampi fotovoltaici, composti da un totale di 2003 stringhe, montati su tracker ad una o mezza stringa e disposti tra un area a Sud e una a Nord rispetto alla SP4.

Le opere di connessione comprendono:

- Una linea interrata in media tensione (30 kV) per il convogliamento dell'energia elettrica prodotta dalla Cabina principale di impianto alla nuova stazione elettrica 150/36 kV da inserire in entra - esce alla linea RTN 150 kV "Prizzi – Corleone", della lunghezza di circa 14,4 km, giacente pressoché lungo viabilità esistente in territorio del comune di Corleone;
- Una stazione utente di trasformazione 30/150 kV da allacciarsi in antenna alla adiacente nuova stazione elettrica (SSE di connessione);
- Una nuova stazione elettrica 150/36 kV (SSE di connessione) da inserire in entra - esce alla linea RTN 150 kV "Prizzi - Corleone" previa realizzazione di un nuovo elettrodotto RTN a 150 kV di collegamento tra le Cabine Primarie di Corleone e San Carlo, a cura Terna e risoluzione degli elementi limitanti della risultante linea RTN 150 kV "Nuova SE - Ciminna" e/o potenziamento/rifacimento della linea RTN a 150 kV "S. Carlo - Sciacca".

4.3 Cavidotti interni ed esterni all'area di impianto

Il progetto dell'impianto prevede la realizzazione di cavidotti interrati a bassa e media tensione. I cavidotti a bassa tensione serviranno a collegare le stringhe alle string box e le string box alle power stations, mentre i cavidotti a media tensione collegheranno le power stations tra loro e alla cabina principale di impianto MTR.

Le power stations sono collegate l'una all'altra in entra-esce con una linea di cavo interrato da 30 kV a sezione crescente dalla prima stazione fino alla connessione con la MTR. La prima delle power stations è anche collegata direttamente alla MTR in modo che guasti alla power station intermedia non pregiudichino il recapito dell'energia proveniente dalle altre due.

Un cavidotto esterno all'impianto collegherà la cabina MTR alla SE utente sita nel Comune di Belpasso.

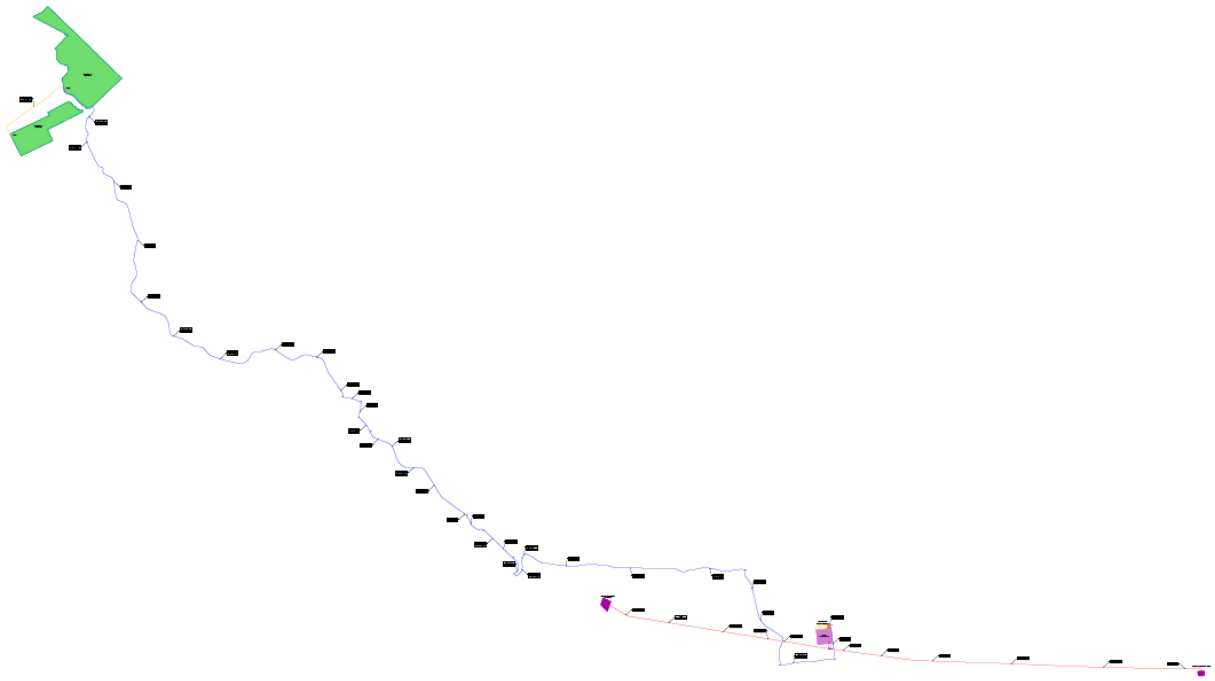


Fig. 1 *percorso dorsali cavidotto*

4.4 Caratteristiche dei cavi

I cavi per i collegamenti interni ed esterni all'impianto, di bassa e media tensione, saranno di tipo schermato con conduttore in alluminio e, per la quasi totalità del tracciato, saranno interrati e pertanto di impatto nullo sull'ambiente circostante.

Essi inoltre correranno in via preferenziale lungo il tracciato delle piste di impianto e della rete stradale esterna. Nello specifico si prevede la posa dei cavi all'interno di una trincea scavata a sezione, di larghezza variabile tra 60 e 80 cm e profondità di posa tale da garantire la non interferenza dei cavidotti con l'attività agricola, qualora il tracciato dovesse attraversate zone di coltivazione. Il cavo MT sarà posato in un letto di sabbia fine vagliata ad una profondità di circa 1,00 m al disotto del piano di campagna, ed opportunamente protetto con elementi prefabbricati in resina. Il riempimento dello scavo avverrà con tout-venant di cava opportunamente costipato. Lo strato di finitura della trincea di posa avverrà differentemente a seconda delle necessità, con terreno di riporto vagliato e costipato, in corrispondenza delle piste e strade sterrate con misto granulometrico, in corrispondenza degli attraversamenti stradali asfaltati, con binder e ripristino del tappeto di usura.

La tipologia dei cavi che sarà utilizzata è quella descritta nella seguente scheda tecnica.

Nexans

ARE4H5E
20,8/36kV
1x... SR/0,2

HIGH VOLTAGE POWER CABLES

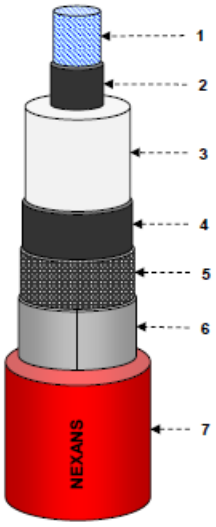
SINGLE CORE CABLES WITH ALUMINIUM CONDUCTOR, REDUCED THICKNESS XLPE INSULATION, ALLUMINIUM TAPE SCREEN AND PE OUTER SHEATH, LONGITUDINAL AND RADIAL WATERTIGHTNESS

APPLICATIONS

In HV energy distribution networks for voltage systems up to **42kV**.
Suitable for fixed installation indoor or outdoor laying in air or directly or indirectly buried, also in wet location.

FUNCTIONAL CHARACTERISTICS

Rated voltage U_0/U:	**20,8/36** kV
Maximum voltage U_m:	**42** kV
Test voltage:	**2,5** U_0
Max operating temperature of conductor:	**90** °C
Max short-circuit temperature:	**250** °C (max duration 5 s)
Max short-circuit temperature (screen):	**150** °C



CONSTRUCTION

1. Conductor
stranded, compacted, round ***aluminium*** *- class* ***2*** *acc. to IEC 60228*

2. Conductor screen
extruded semiconducting compound

3. Insulation
extruded ***XLPE*** *compound*

4. Insulation screen
extruded semiconducting compound - ***fully bonded***

5. Longitudinal watertightness
semiconducting ***water blocking tape***

6. Metallic screen and radial water barrier
aluminium tape *longitudinally applied (nominal thickness = 0,20 mm)*

7. Outer sheath
extruded ***PE*** *compound - colour:* ***red***

INSTALLATION DATA

Max pulling force during laying
50 N/mm² (applied on the conductors)

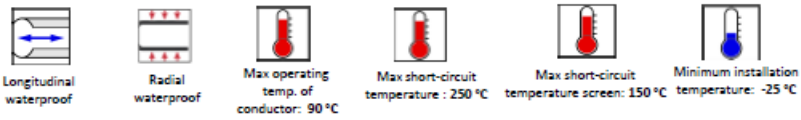
Min bending radius during laying
14 D_{cable} (dynamic condition)

Min temperature during laying
- 25 °C (cable temperature)

STANDARDS

IEC 60840 where applicable *(testing)*
Nexans Design
HD 620 where applicable *(materials)*

MARKING by ink-jet of the following legend:
"NEXANS B <Year> ARE4H5E 20,8/36kV 1x<S> <meter marking>"
<Year> = year of manufacturing
<S> = section of the conductor



NEXANS
Technical Dept

Rev. 3
22/06/2022

1 / 2

ARE4H5E 20,8/36kV 1x...														
Type	Conductor	Insulation		Sheath	Cable		Electrical resistance		X	C	Current capacity		Short circuit current	
	diameter nominal	thickness min	diameter nominal	thickness nominal	diameter approx	weight indicative	at 20 °C - d.c. max	at 90 °C - a.c.	at 50 Hz		in ground at 20 °C	in free air at 30 °C	conductor Tmax 250°C	screen Tmax 150°C
n° x mm²	mm	mm	mm	mm	mm	kg/km	Ω/km	Ω/km	Ω/km	μF/km	A	A	kA x 1,0 s	kA x 0,5 s
1x120	13,1	7,9	30,7	2,2	39,2	1.260	0,253	0,325	0,125	0,185	254	332	11,3	2,2
1x150	14,3	7,6	31,3	2,2	39,8	1.340	0,206	0,265	0,121	0,201	283	374	14,2	2,2
1x185	16,0	7,4	32,6	2,2	41,2	1.470	0,1640	0,211	0,116	0,221	321	430	17,5	2,3
1x240	18,5	7,1	34,5	2,3	43,4	1.690	0,1250	0,161	0,110	0,252	372	508	22,7	2,3
1x300	20,7	6,8	36,1	2,3	45,0	1.880	0,1000	0,129	0,105	0,283	419	583	28,3	2,4
1x400	23,5	6,9	39,1	2,4	48,3	2.220	0,0778	0,101	0,101	0,308	479	680	37,8	2,6
1x500	26,5	7,0	42,6	2,5	52,2	2.670	0,0605	0,079	0,099	0,337	547	792	47,2	2,9
1x630	30,0	7,1	46,3	2,7	56,4	3.220	0,0469	0,063	0,096	0,367	622	921	59,5	3,0

Note

Laying condition:	trefoil formation
depth (m):	0,8
soil thermal resistivity (°Cm/W):	1,5
metallic layers connection:	solid bonding (earthed at both ends)

X = phase reactance
C = capacitance

5 DIMENSIONAMENTO E VERIFICA DEI CAVI

5.1 Calcolo di dimensionamento dei cavi

La sezione dei cavi di collegamento è stata calcolata in modo da essere adeguata alla corrente transitante nelle condizioni di potenza nominale dell'impianto. La lunghezza delle tratte è stata calcolata in base a planimetrie geo-referenziate e tenendo conto dei dislivelli altimetrici.

La sezione e la formazione delle tratte è riportata nella Tabella di Calcolo Elettrico delle Linee MT (in Allegato B).

5.2 Calcolo di verifica dei cavi

La lunghezza delle tratte è stata calcolata in base a planimetrie geo-referenziate e tenendo conto dei dislivelli altimetrici (si veda Allegato A - Schema a blocchi).

Nella Tabella di Calcolo Elettrico delle Linee MT (Allegato B) è riportato il dimensionamento dei cavi come sopra esposto, mentre nello schema a blocchi, in corrispondenza della SSE, è indicata la lunghezza complessiva della tratta.

6 CONNESIONE DELL'IMPIANTO ALLA RTN

La connessione alla RTN di tale impianto è prevista con uno schema in antenna a 150 kV con nuova stazione elettrica 150/36 kV da inserire in entra - esce alla linea RTN 150 kV "Prizzi - Corleone".

Per la realizzazione di tali opere verrà utilizzato un terreno esteso ca. 1200,00 m^2 per la stazione utente e un terreno esteso ca. 25600,00 m^2 per la SSE di connessione.

Il nuovo elettrodotto in antenna a 150 kV per il collegamento alla SE costituisce l'impianto di utenza per la connessione, mentre lo stallo a 150 kV nella suddetta stazione costituisce impianto di rete per la connessione. In un'ottica di razionalizzazione dell'uso delle strutture di rete, lo stallo in stazione verrà condiviso con altri impianti di produzione energetica.

6.1 Impianto di consegna

Le caratteristiche tecnico-funzionali delle apparecchiature e dei componenti dell'impianto di consegna sono conformi alle prescrizioni tecniche TERNA.

L'area è delimitata all'esterno da una recinzione in pannelli di cemento prefabbricati modulari. La separazione tra l'impianto di competenza TERNA e quello del produttore. è realizzata mediante una recinzione di altezza non inferiore a 2 m, tale da permettere una chiara e reciproca visibilità degli impianti.

7 METODOLOGIA

7.1 Generale

Per il corretto dimensionamento del sistema di collettori MT, è necessario tenere in considerazione la temperatura del suolo, il numero di circuiti raggruppati nella stessa trincea, la profondità di interramento e la resistività termica, al fine di garantire il ciclo di vita del conduttore e il suo isolamento.

La corrente massima che attraverserà il conduttore in regime permanente deve corrispondere alla temperatura massima consentita dal suo isolante, secondo quanto indicato nella norma IEC 60502-2.

Insulating compound		Maximum conductor temperature °C	
		Normal operation	Short-circuit (5 s maximum duration)
Polyvinyl chloride	(PVC/B)		
	Conductor cross-section ≤300 mm²	70	160
	Conductor cross-section >300 mm²	70	140
Cross-linked polyethylene	(XLPE)	90	250
Ethylene propylene rubber	(EPR and HEPR)	90	250

Tabella 1 - Temperatura massima del conduttore per diversi tipi di composti isolante

7.2 Corrente nominale dei raffreddatori ad aria (i trasformatori scelti dovrebbero essere ONAN quindi il paragrafo salta)

Per il calcolo dei conduttori, si considera la corrente massima in uscita dall'impianto fotovoltaico e fissata , considerando la potenza massima secondo la scheda tecnica di 6600 kW, (fattore di potenza 0,9).

A tal fine si utilizza il seguente calcolo:

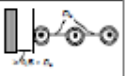
$$I_{n(WTG)} = \frac{P_{TR}}{\sqrt{3} \cdot Cos\theta \cdot V} = \frac{6600kW}{\sqrt{3} \cdot 0.9 \cdot 30kV} = 141.13\ A$$

Dove:

- **P_{TR}**: Potenza attiva del trasformatore BT/MT.
- **V**: Tensione nominale.

7.3 Capacità di corrente dei cavi mt di 630 mm²

La tabella seguente, riferita ai cavi isolanti in XLPE della norma IEC 60502-2 fornisce l'amperaggio/ampacity per i conduttori di media tensione fino a 400 mm².

Nominal area of conductor	Buried direct in the ground		In single-way ducts		In air		
	Trefoil	Flat spaced	Trefoil ducts	Flat touching ducts	Trefoil	Flat touching	Flat spaced
							
mm²	A	A	A	A	A	A	A
16	84	88	80	81	97	99	116
25	108	112	102	103	127	130	153
35	129	134	122	123	154	157	185
50	152	157	144	146	184	189	222
70	186	192	176	178	230	236	278
95	221	229	210	213	280	287	338
120	252	260	240	242	324	332	391
150	281	288	267	271	368	376	440
185	317	324	303	307	424	432	504
240	367	373	351	356	502	511	593
300	414	419	397	402	577	586	677
400	470	466	451	457	673	676	769

Maximum conductor temperature	90 °C
Ambient air temperature	30 °C
Ground temperature	20 °C
Depth of laying	0,8 m
Thermal resistivity of soil	1,5 K·m/W
Thermal resistivity of earthenware ducts	1,2 K·m/W
Screens bonded at both ends.	

* Current rating calculated for cables having a rated voltage of 6/10 kV.

Tabella 2 - Corrente nominale per cavi unipolari con isolante in XLPE - tensione nominale da 3,6 kV a 18/30 kV - conduttore in alluminio

È necessario applicare l'equazione secondo la norma IEC 60287-1-1 (sezione 1.4.1.1) per i cavi da 630 mm², per i cavi in corrente alternata in cui non si considera il "*dry-out*":

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d[0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1+\lambda_1)T_2 + nR(1+\lambda_1+\lambda_2)(T_3+T_4)}\right]^{0.5}$$

Dove:

- **Δθ** Aumento della temperatura del conduttore elettrico rispetto alla temperatura ambiente (K).
- **n**: Numero di conduttori carichi.

- **T_1**: Resistività termica tra un conduttore e il suo isolante (m.K/W).
- **T_2**: Resistività termica tra l'isolante e l'armatura (m.K/W).
- **T_3**: Resistività termica dell'isolante (m.K/W).
- **T_4**: Resistività termica tra la superficie del cavo e il fluido (m.K/W) - Tre cavi unipolari in configurazione trifoglio.
- **R**: Resistenza elettrica CA del conduttore alla massima temperatura di esercizio (Ω/m).
- **R'**: resistenza elettrica CD del conduttore alla massima temperatura di esercizio (Ω/m).
- **Wd**: perdita dielettrica dell'isolante (W/m).
- **λ_1**: rapporto tra le perdite dell'isolante metallico e le perdite totali in tutti i conduttori del cavo. Si considera pari a zero (0) perché il cavo non è armato.
- **λ_2**: rapporto tra le perdite di armatura e le perdite totali in tutti i conduttori del cavo. Si considera pari a zero (0) perché il cavo non è armato.

La configurazione trifoglio è considerata per i circuiti MT direttamente interrati e distanziati di 400 mm per tutta la loro lunghezza, in conformità alla norma IEC 60502-2 (sezione B.5.2.a.):

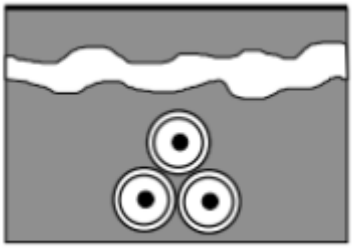


Figura 3 - Sezione trifoglio

Ai fini della presente relazione di calcolo, sono state valutate le condizioni di installazione standard secondo la norma IEC 60502-2: temperatura del terreno di 20°C, profondità di interramento di 800 mm e resistività termica di 1,5 K-m/W; al fine di verificare i risultati di amperaggio/ampacity dei misuratori da 630 mm^2 rispetto alla tabella riportata dalla stessa norma. Va chiarito che l'amperaggio/ampacity del calibro da 630 mm^2 non è incluso nelle tabelle della norma.

Le caratteristiche dei cavi MT da implementare sono presentate di seguito:

SPECIFICHE TECNICHE DEI CAVI MT	
Descrizione	XLPE
Sezione trasversale (mm²)	630
Tensione (kV)	20/35 (42)
Temp. Conduttore	Fino al 90°
Conduttore	Conduttore circolare compatto in alluminio (Classe 2)

Schermo metallico	Nastro in foglio di alluminio
Isolante	XLPE
Altro	Resistente ai raggi UV, resistente all'umidità

Ogni termine dell'equazione viene quindi calcolato separatamente:

- **Δθ** Si calcola come la differenza tra la temperatura massima del conduttore in condizioni operative normali (90°C secondo la tabella 4, IEC 60502-2) e la temperatura di terra:

$$\Delta\theta=\theta_c - \theta = 90°C - 20°C = 70°C$$

  Dove:

  - **θ:** Temperatura del suolo in condizioni di funzionamento normali (°C).
  - **θc:** Temperatura del conduttore (°C).

- **T_1**: Viene calcolato tramite l'equazione riportata nella norma IEC 60287-2-1 (sezione 4.1.2.1), per i cavi unipolari:

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi}\ln\left[1+\frac{2t_1}{d_c}\right]$$

  Dove:

  - **ρ_T'**: Resistività termica dell'isolante (m.K/W).
  - **t_1**: Spessore dell'isolante (mm).
  - **d_1**: Diametro del conduttore (mm).

- **ρ_T** Si ricava dalla norma IEC 60287-2-1 e risulta pari a 3,5 K-m/W per l'isolante XLPE:

Material	Thermal resistivity (ρ_T) K·m/W
Insulating materials[a]	
Paper insulation in solid type cables	6,0
Paper insulation in oil-filled cables	5,0
Paper insulation in cables with external gas pressure	5,5
Paper insulation in cables with internal gas pressure:	
a) pre-impregnated	5,5
b) mass-impregnated	6,0
PE	3,5
XLPE	3,5
PPL	5,5
Polyvinyl chloride:	
up to and including 3 kV cables	5,0
greater than 3 kV cables	6,0
EPR:	
up to and including 3 kV cables	3,5
greater than 3 kV cables	5,0
Butyl rubber	5,0
Rubber	5,0
Protective coverings	
Compounded jute and fibrous materials	6,0
Rubber sandwich protection	6,0
Polychloroprene	5,5
PVC:	
up to and including 35 kV cables	5,0
greater than 35 kV cables	6,0
PVC/bitumen on corrugated aluminium sheaths	6,0
PE	3,5
Materials for duct installations	
Concrete	1,0
Fibre	4,8
Asbestos	2,0
Earthenware	1,2
PVC	6,0
PE	3,5

[a] For the purposes of current rating calculations, the semiconducting screening materials are assumed to have the same thermal properties as the adjacent dielectric materials.

Where plastic or elastomeric materials are used for protective coverings, the thermal resistivities shall be taken to be the same as those for the insulating grades of the materials given in this table.

Tabella 3 - Resistenza termica dei materiali

- **t_1** si ricava dalla norma IEC 60502-2 e risulta pari a 8,0 mm per le sezioni oggetto alla presente relazione di calcolo:

Nominal cross-sectional area of conductor mm²	Nominal thickness of insulation at rated voltage U_0/U (U_m)				
	3,6/6 (7,2) kV mm	6/10 (12) kV mm	8,7/15 (17,5) kV mm	12/20 (24) kV mm	18/30 (36) kV mm
10	2,5	–	–	–	–
16	2,5	3,4	–	–	–
25	2,5	3,4	4,5	–	–
35	2,5	3,4	4,5	5,5	–
50 to 185	2,5	3,4	4,5	5,5	8,0
240	2,6	3,4	4,5	5,5	8,0
300	2,8	3,4	4,5	5,5	8,0
400	3,0	3,4	4,5	5,5	8,0
500 to 1 600	3,2	3,4	4,5	5,5	8,0

NOTE 1 Any smaller conductor cross-section than those given in this table is not recommended. However, if a smaller cross-section is needed, either the diameter of the conductor may be increased by a conductor screen (see 7.1), or the insulation thickness may be increased in order to limit, at the values calculated with the smallest conductor size given in this table, the maximum electrical stresses applied to the insulation under test voltage.

NOTE 2 For conductor cross-sections larger than 1 000 mm², the insulation thickness may be increased to avoid any mechanical damage during installation and service.

Tabella 4 - Spessore nominale dell'isolante in polietilene reticolato

- Infine, la $\mathbf{d_c}$ è ricavata dalla norma IEC 60228, risultando pari a 29,3 mm per il calibro 630 mm²

1	2	3	4	5
Cross-sectional area (mm²)	Solid conductors (Class 1)		Stranded compacted conductors (Class 2)	
	Minimum diameter (mm)	Maximum diameter (mm)	Minimum diameter (mm)	Maximum diameter (mm)
16	4.1	4.6	4.6	5.2
25	5.2	5.7	5.6	6.5
35	6.1	6.7	6.6	7.5
50	7.2	7.8	7.7	8.6
70	8.7	9.4	9.3	10.2
95	10.3	11.0	11.0	12.0
120	11.6	12.4	12.5	13.5
150	12.9	13.8	13.9	15.0
185	14.5	15.4	15.5	16.8
240	16.7	17.6	17.8	19.2
300	18.8	19.8	20.0	21.6
400	—	—	22.9	24.6
500	—	—	25.7	27.6
630	—	—	29.3	32.5

Tabella 5 - Diametri minimi e massimi dei conduttori circolari in alluminio

Di conseguenza, la resistività termica T_1 risulta:

$$T_{1(630mm^2)} = \frac{\rho_T}{2\pi}\ln\left[1+\frac{2t_1}{d_c}\right] = \frac{3.5}{2\pi}\ln\left[1+\frac{2\cdot 8.0}{29.3}\right] = 0.243\ Km/W$$

- **T_2**: Si considera zero (0) tenendo conto del fatto che i cavi MT non sono armati, come indicato nella sezione 4.1.3.1 della IEC 60287-2-1.
- **T_3**: Calcolato in base alla norma IEC 60287-2-1 (sezione 4.1.4.1) per il caso generale:

$$T_3 = \frac{1}{2\pi}\rho_T \ln\left[1+\frac{2t_3}{D'_a}\right]$$

Dove

- **ρ_T'**: Resistività termica del rivestimento (m.K/W).
- **t_3:** Spessore rivestimento (mm).
- **D'a**: Diametro del sotto il rivestimento (mm).

- **ρ_T** è ottenuto da IEC 60287-2-1 (tabella 7), risultando in 3,5 K·m/W per un rivestimento in polietilene (PE):

Material	Thermal resistivity (ρ_T) K·m/W
Insulating materials[a]	
Paper insulation in solid type cables	6,0
Paper insulation in oil-filled cables	5,0
Paper insulation in cables with external gas pressure	5,5
Paper insulation in cables with internal gas pressure:	
a) pre-impregnated	5,5
b) mass-impregnated	6,0
PE	3,5
XLPE	3,5
PPL	5,5
Polyvinyl chloride:	
up to and including 3 kV cables	5,0
greater than 3 kV cables	6,0
EPR:	
up to and including 3 kV cables	3,5
greater than 3 kV cables	5,0
Butyl rubber	5,0
Rubber	5,0
Protective coverings	
Compounded jute and fibrous materials	6,0
Rubber sandwich protection	6,0
Polychloroprene	5,5
PVC:	
up to and including 35 kV cables	5,0
greater than 35 kV cables	6,0
PVC/bitumen on corrugated aluminium sheaths	6,0
PE	3,5
Materials for duct installations	
Concrete	1,0
Fibre	4,8
Asbestos	2,0
Earthenware	1,2
PVC	6,0
PE	3,5

[a] For the purposes of current rating calculations, the semiconducting screening materials are assumed to have the same thermal properties as the adjacent dielectric materials.
Where plastic or elastomeric materials are used for protective coverings, the thermal resistivities shall be taken to be the same as those for the insulating grades of the materials given in this table.

Tabella 6 - Resistività termica dei materiali

- **t_3** è ottenuto dalla norma IEC 60502-2 (sezione 14.3), che indica la seguente equazione per calcolare lo spessore del rivestimento:

$$t_3 = 0.035D + 1.0$$

D è il diametro fittizio immediatamente sotto il rivestimento, in millimetri (specificato nell'allegato A della stessa norma), rispettivamente di 17,5 mm e 28,3 mm:

Nominal cross-section of conductor mm²	d_L mm	Nominal cross-section of conductor mm²	d_L mm
10	3,6	240	17,5
16	4,5	300	19,5
25	5,6	400	22,6
35	6,7	500	25,2
50	8,0	630	28,3
70	9,4	800	31,9
95	11,0	1 000	35,7
120	12,4	1 200	39,1
150	13,8	1 400	42,2
185	15,3	1 600	45,1

Tabella 7- Diametro fittizio del conduttore

In questo modo gli spessori dei rivestimenti per i calibri valutati sono:

$$t_{3(630mm^2)} = 0.035D + 1.0 = 0.035 \cdot 28.3 + 1.0 = 1.99\ mm$$

- Infine, D'_a si ricava dai dati del cavo precedentemente calcolati in T_1 (d_c+2·t_1), risultando 45.3mm per il calibro 630 mm^2.

  Pertanto, la resistività termica T_3 è pari a:

$$T_{3(630mm^2)} = \frac{1}{2\pi}\rho_T \ln\left[1 + \frac{2t_3}{D'_a}\right] = \frac{1}{2\pi}3.5 \cdot \ln\left[1 + \frac{2 \cdot 1.9}{45.3}\right] = 0.047\ Km/W$$

- **T_4**: È calcolato dalla norma IEC 60287-2-1 (sezione 4.2.4.3.2), rispetto a una terna di cavi unipolari in configurazione a trifoglio:

$$T_4 = \frac{1.5}{\pi}\rho_T[\ln(2u) - 0.630]$$

  Dove,

$$u = \frac{2L}{D_e}$$

  - **ρ_T**: Resistività termica del suolo (m.K/W).
  - **L**: Distanza tra la superficie del terreno e l'asse del cavo (mm).
  - **D_e**: Diametro esterno del cavo (mm).

- **ρ_T** è considerato pari a 1,5 Km/W, secondo le condizioni di installazione indicate nella norma IEC 60502-2.
- **L** è considerato 800 mm in base alle condizioni di installazione della norma IEC 60502-2.
- **D_e** si ricava dai dati del cavo precedentemente calcolati in T_1 e T_3 ($d_+ + 2 \cdot t_1 + 2 \cdot t_3$), risultando pari a 49.3mm per il calibro 630 mm^2.

Pertanto, la resistività termica T_4 è:

$$u_{(630mm^2)} = \frac{2L}{D_e} = \frac{2 \cdot 800}{49.3} = 32.5$$

$$T_{4_{(630mm^2)}} = \frac{1.5}{\pi} \rho_T [\ln(2u) - 0.630] = \frac{1.5}{\pi} 1.5 \cdot [\ln(2 \cdot 32.5) - 0.630] = 2.538\ Km/W$$

- **R**: È calcolato dalla norma IEC 60287-1-1 (sezione 2.1):

$$R = R' (1 + \gamma_s + \gamma_p)$$

Dove

- **R':** Resistenza CD del conduttore a 20°C (ohm/m).
- γ_s: Fattore effetto pelle.
- γ_p: Fattore di effetto di prossimità.

- **R'** È calcolato dalla norma IEC 60287-1-1 (sezione 2.1.1):

$$R' = R_0 [1 + \alpha_{20} (\theta - 20)]$$

Dove

- R_0: Resistenza CD del conduttore a 20°C (ohm/km).
- α_{20}: Coefficiente di temperatura di massa costante a 20°C
- θ: Temperatura massima di esercizio (°C).

- **R_0** è ricavato dalla IEC 60228 essendo pari a 0,0469 Ω/km per il calibro 630 mm^2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nominal Cross-Section Area	The least number of wires in the conductor						Max. conductor resistance value of 20°C		
	Circular		Compacted Circular		Formatted		Annealed copper conductor		Aluminum and aluminum alloy conductors
	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Bare	Coated Metal	
mm²							Ω/km	Ω/km	Ω/km
0,5	7	-	-	-	-	-	36,0	36,7	-
0,75	7	-	-	-	-	-	24,5	24,8	-
1,0	7	-	-	-	-	-	18,1	18,2	-
1,5	7	-	6	-	-	-	12,1	12,2	-
2,5	7	-	6	-	-	-	7,41	7,56	-
4	7	-	6	-	-	-	4,61	4,70	-
6	7	-	6	-	-	-	3,08	3,11	-
10	7	7	6	6	-	-	1,83	1,84	3,08
16	7	7	6	6	-	-	1,15	1,16	1,91
25	7	7	6	6	6	6	0,727	0,754	1,20
35	7	7	6	6	6	6	0,524	0,529	0,868
50	19	19	6	6	6	6	0,387	0,391	0,641
70	19	19	12	12	12	12	0,268	0,270	0,443
95	19	19	15	15	15	15	0,193	0,195	0,320
120	37	37	18	15	18	15	0,153	0,154	0,253
150	37	37	18	15	18	15	0,124	0,126	0,206
185	37	37	30	30	30	30	0,0991	0,100	0,164
240	37	37	34	30	34	30	0,0754	0,0762	0,125
300	61	61	34	30	34	30	0,0601	0,0607	0,100
400	61	61	53	53	53	53	0,0470	0,0475	0,0778
500	61	61	53	53	53	53	0,0366	0,0369	0,0605
630	91	91	53	53	53	53	0,0283	0,0286	0,0469
800	91	91	53	53	-	-	0,0221	0,0224	0,0367
1000	91	91	53	53	-	-	0,0176	0,0177	0,0291
1200							0,0151	0,0151	0,0247
1400 *							0,0129	0,0129	0,0212
1600							0,0113	0,0113	0,0186
1800 *							0,0101	0,0101	0,0165
2000							0,0090	0,0090	0,0149
2500							0,0072	0,0072	0,0127

Tabella 8 - Conduttori a trifoglio per cavi unipolari e multipolari

- α_{20} si ricava dalla norma IEC 60287-1-1, essendo pari a 4,03x10-3 per i conduttori in alluminio.

Material	Resistivity (ρ) ohm · m at 20 °C	Temperature coefficient (α_{20}) per K at 20 °C
a) *Conductors*		
Copper	1,7241 10^{-8}	3,93 10^{-3}
Aluminium	2,8264 10^{-8}	4,03 10^{-3}
b) *Sheaths and armour*		
Lead or lead alloy	21,4 10^{-8}	4,0 10^{-3}
Steel	13,8 10^{-8}	4,5 10^{-3}
Bronze	3,5 10^{-8}	3,0 10^{-3}
Stainless steel	70 10^{-8}	Negligible
Aluminium	2,84 10^{-8}	4,03 10^{-3}
NOTE Values for copper conductors are taken from IEC 60028. Value for aluminium conductors are taken from IEC 60889.		

Tabella 9 - Resistività elettriche e coefficienti di temperatura dei metalli utilizzati

- **θ** è stata precedentemente indicata come la massima temperatura di esercizio del conduttore, in accordo con il suo isolante (XLPE), che è di 90°C.

In questo modo si ottengono i valori di R' per i calibri in analisi:

$$R'_{630mm^2} = R_0[1 + \alpha_{20}(\theta - 20)] = 0.047 \cdot [1 + 4.03 \times 10^{-3}(90 - 20)] = 0.060 \times 10^{-3}\ \Omega/\mathrm{km}$$

- Tenendo conto della stessa norma IEC 60287-1-1, si ottiene γ_s (sezione 2.1.2):

$$\gamma_s = \frac{x_s^4}{192 + 0.8x_s^4}$$

Dove,

$$x_s^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_s$$

f: frequenza elettrica (Hz).

E i valori di *ks* sono riportati nella tabella 10.

- D'altra parte, γ_p è ottenuto dalla norma IEC 60287-1-1 (sezione 2.1.4):

$$\gamma_p = \frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4}\left(\frac{d_c}{s}\right)\left[0.312\left(\frac{d_c}{s}\right)^2 + \frac{1.18}{\frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} + 0.27}\right]$$

Dove

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-7} k_p$$

- **d_c**: Diametro del conduttore (mm)
- **s**: Distanza da centro a centro del conduttore (mm), considerata come il diametro di un singolo cavo tenendo conto della configurazione a tre fili.

I valori di k_p sono riportati nella tabella 10:

Type of conductor	Whether dried and impregnated or not	k_s	k_p
Copper			
Round, stranded	Yes	1	0,8
Round, stranded	No	1	1
Round, segmental [a]		0,435	0,37
Hollow, helical stranded	Yes	[b]	0,8
Sector-shaped	Yes	1	0,8
Sector-shaped	No	1	1
Aluminium			[d]
Round, stranded	Either	1	
Round, 4 segment	Either	0,28	
Round, 5 segment	Either	0,19	
Round, 6 segment	Either	0,12	
Segmental with peripheral strands	Either	[c]	

[a] The values given apply to conductors having four segments (with or without central duct) and sectional areas less than 1 600 mm². These values apply to conductors in which all the layers of wire have the same direction of lay. The values are provisional and the subject is under consideration.

[b] The following formula should be used for k_s:

$$k_s = \left(\frac{d'_c - d_i}{d'_c + d_i}\right)\left(\frac{d'_c + 2d_i}{d'_c + d_i}\right)^2$$

Tabella 10 - Valori sperimentali per i coefficienti kp e ks

Quindi si ottengono i seguenti valori di R: 0.0601×10^{-3} Ω/m per 630 mm². Infine, viene calcolato W_d da IEC 60287-1-1 (sezione 2.29).

$$W_d = \omega\, C\, U_0^2\, \tan\delta$$

Dove:

- **ω**: $2\pi f$.
- **C**: Capacità per unità di lunghezza (F/m).
- **U_0**: Tensione di terra (V).

I valori di Resistenza vengono riportati nella tabella seguente.

La Capacità per conduttori circolari viene data dalla seguente espressione:

$$C = \frac{\varepsilon}{18 \ln\left(\frac{D_i}{d_c}\right)} 10^{-9}$$

Dove,

- **ε**: Permittività relativa dell'isolante.
- **D_i**: Diametro esterno dell'isolante (escluso rivestimento) (mm).
- **d_c**: Diametro del conduttore, compreso l'eventuale rivestimento (mm).

I valori di tanδ, ε e U_0 sono riportati nella Tabella seguente (IEC 60287-1-1):

1	2	3
Type of cable	ε	tan δ*
Cables insulated with impregnated paper		
Solid type, fully-impregnated, pre-impregnated or mass-impregnated non-draining	4	0,01
Oil-filled, self-contained[1] up to U_o = 36 kV	3,6	0,0035
up to U_o = 87 kV	3,6	0,0033
up to U_o = 160 kV	3,5	0,0030
up to U_o = 220 kV	3,5	0,0028
Oil-pressure, pipe-type[2]	3,7	0,0045
External gas-pressure[3]	3,6	0,0040
Internal gas-pressure[4]	3,4	0,0045
Cable with other kinds of insulation[5]		
Butyl rubber	4	0,050
EPR		
up to and including 18/30 (36) kV cables	3	0,020
greater than 18/30 (36) kV cables	3	0,005
PVC	8	0,1
PE (HD and LD)	2,3	0,001
XLPE		
up to and including 18/30 (36) kV cables (unfilled)	2,5	0,004
greater than 18/30 (36) kV cables (unfilled)	2,5	0,001
greater than 18/30 (36) kV cables (filled)	3,0	0,005
PPL		
equal to, or greater than 63/110 kV cables	2,8	0,0014

* Safe values at maximum permissible temperature, applicable to the highest voltages normally specified for each type of cable.

[1] See la IEC 60141-1.
[2] See la IEC 60141-4.
[3] See la IEC 60141-3.
[4] See la IEC 60141-2.
[5] See la IEC 60502.

NOTE The dielectric loss should be taken into account for values of U_o equal to or greater than the following:

Type of cable	U_o kV
Cables insulated with impregnated paper	
Solid-type	38
Oil-filled and gas-pressure	63,5
Cables with other types of insulation	
Butyl rubber	18
EPR	63,5
PVC	6
PE (HD and LD)	127
XLPE (unfilled)	127
XLPE (filled)	63,5

Tabella 11 - Valori di permittività relativa e fattori di perdita per l'isolamento di cavi ad alta e media tensione alla frequenza di alimentazione

Pertanto, la capacità risulta:

$$C_{630mm^2} = \frac{\varepsilon}{18\ln\left(\frac{D_i}{d_c}\right)}10^{-9} = \frac{2.5}{18\ln\left(\frac{45.3}{29.3}\right)}10^{-9} = 3.18 \times 10^{-10}$$

E la W_d:

$$W_{d(630mm^2)} = \omega\, C\, U_0^2\, \tan\delta = 2\pi f \cdot 3.187 \times 10^{-10} \cdot 17{,}320^2 \cdot 0.001 = 0.03605$$

Infine, sostituendo ogni termine dell'equazione principale, si ottiene l'amperaggio per le dimensioni target della presente relazione di calcolo, nelle condizioni di installazione indicate nella norma IEC 60205-2 (cavi unipolari direttamente interrati in configurazione trifoglio), che sono state considerate come una verifica degli amperaggi indicati nella norma:

$$\mathrm{I} = \left[\frac{\Delta\theta - W_d[0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1+\lambda_1)T_2 + nR(1+\lambda_1+\lambda_2)(T_3+T_4)}\right]^{0.5}$$

$$\Rightarrow \mathrm{I}_{630mm^2} = \left[\frac{70 - 0.036 \cdot [0.5 \cdot 0.243 + (0 + 0.047 + 2.537)]}{0.064 \times 10^{-3}(0.243 + 0 + (0.047 + 2.537)}\right]^{0.5} = 641.21\ A$$

Si considera una resistività termica di 1,5 k·m/W e una temperatura di terra di 30°C.

7.4 Fattore di correzione

Il passo successivo consiste nel correggere l'amperaggio dei conduttori in funzione delle condizioni di installazione e dei relativi fattori di temperatura del terreno (**k1**), circuiti raggruppati nella stessa trincea (**k2**), profondità di interramento (**k3**) e resistività termica del terreno (**k4**).

Fattore di correzione della temperatura K_1

Il fattore di correzione per la temperatura dell'aria ambiente è ricavato dalla tabella B.10 della norma IEC 60502-2.

Per questo caso, il valore di 31,37°C, preso dal database della NASA, è considerato un parametro conservativo.

Maximum conductor temperature °C	Ambient ground temperature °C							
	10	15	25	30	35	40	45	50
90	1,07	1,04	0,96	0,93	0,89	0,85	0,80	0,76

Tabella 12 - Fattori correttivi per temperature ambiente al suolo diverse da 20°

Fattore di correzione per il raggruppamento dei circuiti K_2

Nel caso del fattore per raggruppamento di circuiti si prende la tabella B.19 della norma IEC 60502-2, prendendo opportunamente distanze di 40 cm:

Number of cables in group	Spacing between group centres mm				
	Touching	200	400	600	800
2	0,73	0,83	0,88	0,90	0,92
3	0,60	0,73	0,79	0,83	0,86
4	0,54	0,68	0,75	0,80	0,84
5	0,49	0,63	0,72	0,78	0,82
6	0,46	0,61	0,70	0,76	0,81
7	0,43	0,58	0,68	0,75	0,80
8	0,41	0,57	0,67	0,74	-
9	0,39	0,55	0,66	0,73	-
10	0,37	0,54	0,65	-	-
11	0,36	0,53	0,64	-	-
12	0,35	0,52	0,64	-	-

Tabella 13 - Fattori di correzione per gruppi di circuiti trifase unipolari posati direttamente nel terreno

Fattore di correzione della profondità di sepoltura K_3

Nel caso del fattore di correzione da applicare a cavi interrati a profondità diversa da 0,8 m, si tiene conto della norma IEC 60502-2 nella tabella B.12, che presenta quanto segue:

Depth of laying m	Single-core cables Nominal conductor size mm²		Three-core cables
	≤185 mm²	>185 mm²	
0,5	1,04	1,06	1,04
0,6	1,02	1,04	1,03
1	0,98	0,97	0,98
1,25	0,96	0,95	0,96
1,5	0,95	0,93	0,95
1,75	0,94	0,91	0,94
2	0,93	0,90	0,93
2,5	0,91	0,88	0,91
3	0,90	0,86	0,90

Tabella 14 - Fattori correttivi per profondità di posa diverse da 0,8 m per cavi interrati diretti

Fattore di correzione per resistività termica K_4

Nel caso del fattore correttivo da applicare quando la resistività termica del terreno è diversa da 1,5 k·m/W, esso è ricavato dalla tabella B.14 della norma IEC 60502-2.

Nominal area of conductor mm²	Values of soil thermal resistivity K·m/W						
	0,7	0,8	0,9	1	2	2,5	3
16	1,29	1,24	1,19	1,15	0,89	0,82	0,75
25	1,30	1,25	1,20	1,16	0,89	0,81	0,75
35	1,30	1,25	1,21	1,16	0,89	0,81	0,75
50	1,32	1,26	1,21	1,16	0,89	0,81	0,74
70	1,33	1,27	1,22	1,17	0,89	0,81	0,74
95	1,34	1,28	1,22	1,18	0,89	0,80	0,74
120	1,34	1,28	1,22	1,18	0,88	0,80	0,74
150	1,35	1,28	1,23	1,18	0,88	0,80	0,74
185	1,35	1,29	1,23	1,18	0,88	0,80	0,74
240	1,36	1,29	1,23	1,18	0,88	0,80	0,73
300	1,36	1,30	1,24	1,19	0,88	0,80	0,73
400	1,37	1,30	1,24	1,19	0,88	0,79	0,73

Tabella 15 - Fattori correttivi per le resistività termiche del suolo diverse da quelle dei cavi unipolari interrati

Applicando i fattori k_1, k_2, k_3 e k_4 si ottiene l'amperaggio corretto per ciascuna sezione del circuito:

Circuito	Tratto	Resistività Termica equivalente [K m/W]	Iz [A]	k1	k2	k3	k4	Iz'
Dorsale 1	MTR1 NORD - SSE	1,54	1244	0,93	0,79	0,97	1,00	886,55
Dorsale 2	MTR2 SUD - SSE	1,54	622	0,93	0,79	0,97	1,00	443,27

Figura 4 - Valori di portata effettiva per ogni circuito

7.5 Convalida per corrente di generazione

Affinché i cavi MT abbiano la capacità di esportare la massima potenza generata, è necessario che la capacità di corrente di ciascuna sezione MT sia maggiore della corrente massima generata dall'insieme di ITS che collegano:

Circuito	Tratto	Iz>In	Ib Trasformatore [A]	Capacità di carico [%]
Dorsale 1	MTR1 NORD - SSE	Verificato	620	49,84
Dorsale 2	MTR2 SUD - SSE	Verificato	240	38,59

Figura 5 - Verifica capacità di esportazione della massima potenza

Dove

- **I_n**: Amperaggio del trasformatore ITS (A).
- **I_z:** Amperaggio sezione MT (A).
- **Iz'**: Amperaggio sezione corretta MT (A).

7.6 Dimensionamento delle perdite in Corrente Alternata (AC)

Successivamente, si valutano le perdite di potenza per il sistema di collettori MT.

A questo proposito, si utilizza la seguente equazione per calcolare le perdite di potenza:

$$P_{Losses} = \frac{\sum_{Tramo\ MT} 3 \cdot I_n^{\ 2} \cdot (R \cdot cos\varphi\ +\ X \cdot sin\varphi)\ LF}{P_T} \times 100$$

Dove:

- **I_n** : Amperaggio del trasformatore ITS (A).
- **R**: Resistenza totale della sezione MT.
- **L_F**: Fattore di carico, si considera il 100%.
- **P_T**: Potenza massima generata in CA (kW).

I risultati sono riportati nella tabella seguente:

CAVIDOTTO	SEZIONE CAVO [mmq]	Ib [A]	Resistenza per unità di lunghezza[90°] [Ω/km]	Lunghezza Elettrodotto [km]	Potenza persa [kW]	Perdita Potenza[%]	T riferimento : [°C]
DORSALE 1: MTR	3X2X630	620	0,0315	14,5	526,7241	1,386116053	90
DORSALE 2:MTR	3X1X630	250	0,063	14,1	166,55625	0,438305921	90
Perdita% D1+D2						1,82	

Figura 6 - Valori di perdita di potenza del sistema

7.7 Dimensionamento del cortocircuito

Inoltre, il cablaggio MT viene calcolato in base alla massima corrente di cortocircuito da sopportare, tenendo conto della durata del guasto di 1s, e che il cavo deve essere progettato per raggiungere una temperatura massima di 250°C durante questa condizione.

L'analisi viene effettuata prendendo come riferimento una corrente di 20 kA.

Pertanto, la sezione minima del cavo deve rispettare la seguente relazione:

$$S = \frac{\sqrt{I^2 * t}}{k}$$

Dove:

- **S**: Sezione conduttore (mm^2).
- **I**: Valore efficace della corrente di guasto che può attraversare il dispositivo di protezione per un'impedenza di guasto trascurabile.
- **t**: Tempo di risoluzione del guasto.
- **k**: Fattore il cui valore dipende dalla natura del metallo del conduttore di protezione, dall'isolante e dalle altre parti, e dalle temperature iniziale e finale.

Il fattore **k** si ottiene dalla seguente equazione:

$$k = \sqrt{\frac{Q_c(B+20)}{Q_{20}} \ln\left(1 + \frac{\theta_f - \theta_i}{B + \theta_i}\right)}$$

Dove,

- **Q_c**: Capacità termica volumetrica del materiale conduttore (J/°C mm^3).
- **B**: Inverso del coefficiente di temperatura della resistività a 0°C per il conduttore (°C).
- **Q_{20}**: Resistività elettrica del materiale conduttivo a 20°C (Ω mm).
- **θi**: Temperatura iniziale del conduttore (°C), considerata pari a 90°C.
- **θf**: Temperatura finale del conduttore (°C), considerata come 250°C per isolante XLPE secondo IEC 60502-2.

Material	B (°C)*	Q_c (J/°C mm³)**	ϱ_{20} (Ω mm)*	$\sqrt{\frac{Q_c (B+20)}{\varrho_{20}}}$
Copper	234,5	3.45×10^{-3}	17.241×10^{-6}	226
Aluminium	228	2.5×10^{-3}	28.264×10^{-6}	148
Lead	230	1.45×10^{-3}	214×10^{-6}	42
Steel	202	3.8×10^{-3}	138×10^{-6}	78

Tabella 16 - Valori di B, Q_e, Q_{20} dei materiali

Quindi:

$$k = \sqrt{\frac{2.5 \times 10^{-3}(228+20)}{28.264 \times 10^{-6}} \cdot \ln\left(1 + \frac{250-90}{228+\theta_i}\right)} = 94.55$$

La sezione minima del conduttore per una corrente di cortocircuito di 20kA e un tempo di sgancio di 1s è pari a:

$$S = \frac{\sqrt{I^2 * t}}{k} = \frac{\sqrt{20^2 * 4.0}}{94.55} = 211{,}52\ mm^2$$

7.8 Dimensionamento della caduta di tensione

Infine, si effettua la verifica della caduta di tensione, considerando che non deve superare l'1,5%.

La caduta di tensione in ogni sezione viene calcolata applicando la seguente equazione:

$$\Delta V\% = k_{cdt} \times I \times \frac{L_c}{1000} \times (R \times \cos(\varphi) + X \times sen(\varphi)) \times \frac{100}{V_n}$$

Dove:

- **Kcdt**: è $\sqrt{3}$ per i sistemi trifase;
- $\boldsymbol{I}$: corrente di esercizio che attraversa il conduttore;
- **L**: Distanza del cavo in metri;
- **X**: Reattanza per unità di lunghezza (Ohm/m);
- **R**: Resistenza per unità di lunghezza (Ohm/m);
- $\mathbf{V_n}$: Tensione nominale di esercizio;
- **ϕ**: Angolo tra tensione e corrente;

Applicando l'equazione precedente, si ottengono le cadute di tensione per ogni sezione e per ogni circuito MT:

CAVIDOTTO	SEZIONE CAVO [mmq]	Ib [A]	Resistenza per unità di lunghezza[90°] [Ω/km]	Reattanza per unità di lunghezza [Ω/km]	Lunghezza Elettrodotto [km]	Caduta di tensione [%]	Vn [V]	Cosϕ	Senϕ
MTR 1-2-SSE UT. CT	2x630	620	0,0315	0,084	14,5	2,90	30000	0,95	0,31
MTR 1-2-SSE UT. CT	1x630	240	0,063	0,096	14,1	1,75	30000	0,95	0,31

Figura 7 - Valori di cadute di tensione

Si ottiene una caduta di tensione massima del 2,9%. Pertanto, il requisito tecnico è soddisfatto.

7.9 Schema a blocchi

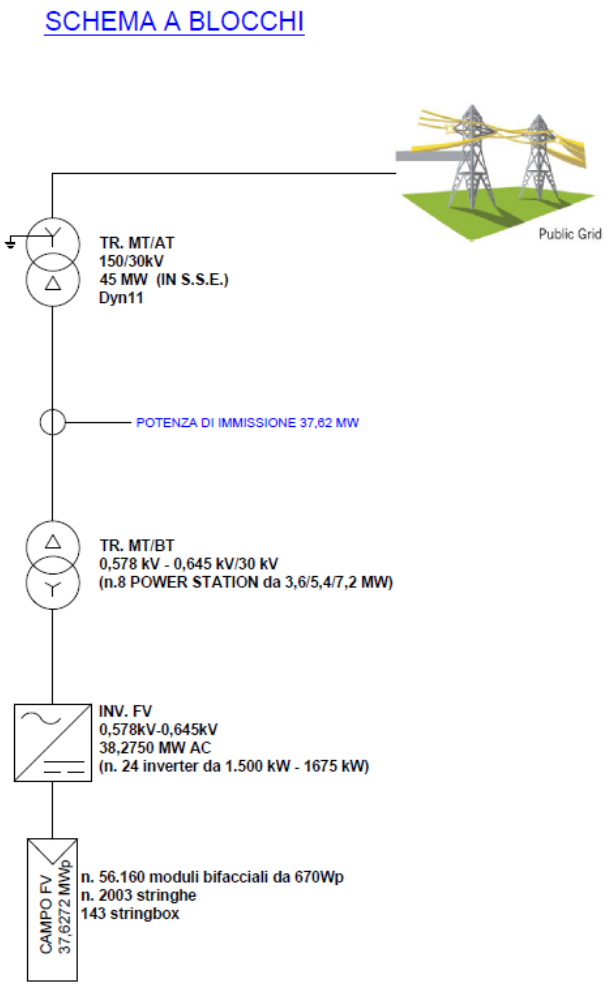


Figura 8 Schema a blocchi

8 RISULTATI

Dall'analisi eseguite si evincono i seguenti valori:

CAVIDOTTO	COMPOSIZIONE TERNA CAVO [mmq]	Lunghezza condotto: [km]	Ib [A]	Tensione nominale [kV]	Potenza trasformatore: [MVA]
DORSALE 1: MTR NORD-SSE	3X2X630	14,5	620	30	30,6
DORSALE 2:MTR SUD-SSE	3X1X630	14,1	240	30	12,6

Si ha quindi un totale di 3 terne in alluminio da 630 mm^2 per tutta la lunghezza del cavidotto, che si separano in prossimità degli ingressi ai sottocampi, in quanto una terna composta da 3x1x630mm² sarà a servizio della MTR SUD, mentre la terna 3x2x630mm² sarà a servizio della MTR NORD.

9 CONCLUSIONE

Le sezioni di cablaggio MT valutate in questa relazione di calcolo (630 mm^2) sono state verificate per le condizioni di installazione considerate, le perdite di potenza, i cortocircuiti e i requisiti tecnici dovuti alla caduta di tensione, in conformità con gli standard internazionali, integrati dalle normative locali.

Pertanto, il dimensionamento del cablaggio MT è conforme ai requisiti tecnici del Progetto.

Palermo 29/11/2023 Dott. Ing. Girolamo Gorgone