



RENEWABLE ENERGY-ENVIRONMENT SYSTEMS
INNOVATION TECHNOLOGY-TRANSPORT

**Progetto Impianto fotovoltaico da 21,6 MWp
“Castrovillari”
nel Comune di Castrovillari (CS)
in località “Conca del Re”**

**RELAZIONE IMPATTO ELETTROMAGNETICO
E CONTENIMENTO DEL RISCHIO DI ELETTROCUZIONE
(ai sensi del D.lgs. n. 152/2006)**

PROGETTISTI:

ING. UGO V. ROCCA

ING. NICOLALESSANDRO ROCCA



Rev. 13/09/2022

Identificatore	Descrizione
RMAG	Relazione Impatto Elettromagnetico

Sommario

1. GENERALITÀ.....	3
2. NORME DI RIFERIMENTO.....	3
3. RICHIAMI DI ELETTROMAGNETISMO	3
4. VERIFICA DEL RISCHIO ELETTROMAGNETICO	6
5. EMISSIONI NELLA CABINA DI TRASFORMAZIONE BT/MT.....	7
6. EMISSIONI NELLA LINEA DI COLLEGAMENTO ALLA RTN.....	7
7. PROTEZIONE DAI RISCHI DI ELETTROCUZIONE.....	9

1. GENERALITÀ

La presente relazione tecnica riguarda la valutazione del rischio legato a eventuali radiazioni elettromagnetiche emesse dall'impianto fotovoltaico da 21,6 MWp (18,0 MVA in corrente alternata), suddiviso in n.3 sezioni da 6,0 MW in corrente alternata ciascuna e dalle linee di collegamento in Media Tensione a 20 kV di suddette sezioni con la Rete di Trasmissione Nazionale dell'energia elettrica tramite collegamento in "antenna" in uno stallo MT in cabina primaria (soluzioni di allaccio Rif. Goal. 18796, 18797, 18786).

Di seguito si richiameranno brevemente i concetti legati all'elettromagnetismo per poi passare alla valutazione dei campi elettromagnetici emessi in funzione della potenza nominale dell'impianto fotovoltaico.

2. NORME DI RIFERIMENTO

- Legge 36/2001 e DPCM 8.7.2003
- Norma CEI 211-4 – Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati dalle linee elettriche
- Norma CEI 211-6 – Guida per la misura e la valutazione dei campi elettrici e magnetici nell'intervallo di frequenze 0 Hz. – 10 kHz con riferimento all'esposizione umana

3. RICHIAMI DI ELETTROMAGNETISMO

Il campo elettrico e magnetico lentamente variabili

Il campo elettrico E è una regione dello spazio in cui una carica elettrica (o una distribuzione di carica elettrica) determina una perturbazione dell'ambiente circostante cosicché altre cariche vengono attratte o respinte. E può essere valutato come una forza per unità di carica: $E=F/Q$.

L'unità di misura è il **volt/metro (V/m)**.

Il campo magnetico H è una regione dello spazio in cui una corrente elettrica (o una distribuzione di correnti elettriche) e/o dipoli magnetici determinano una perturbazione dell'ambiente circostante cosicché una carica elettrica in movimento subisce una forza proporzionale alla propria carica e alla propria velocità istantanea, forza che è diretta perpendicolarmente alla velocità.

L'unità di misura è l'**ampere/metro (A/m)**.

Il campo di induzione magnetica B è, nella maggior parte dei materiali, direttamente ricavabile dal campo magnetico H (e viceversa) tramite la relazione $B=\mu_0 H$, con $\mu_0=4\pi 10^{-7}$ H/m.

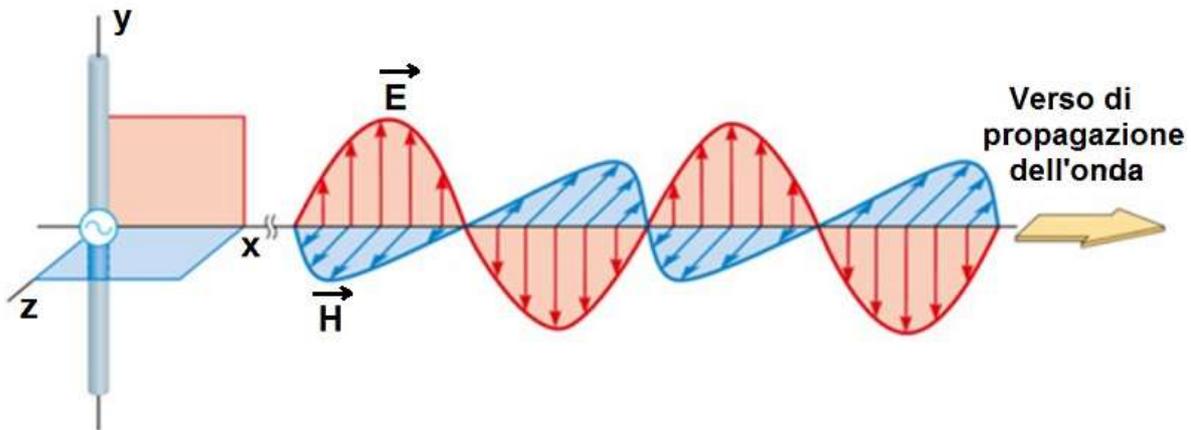
L'unità di misura di B è il **Tesla (T)**; talvolta B viene misurato in gauss (G). Nel vuoto o nell'aria 1A/m corrisponde all'incirca ad 1 mT.

Un conduttore infinito percorso da una corrente di 1A produce un campo di induzione magnetica di intensità pari ad 1 μ T e 0.2 μ T, rispettivamente, a 20 cm ed 1 m di distanza dal conduttore.

Il campo magnetico terrestre varia al livello del mare tra 24 e 68 μ T. In Italia è pari a circa 50 μ T=0.5G.

Un campo elettrico che varia nel tempo genera un campo magnetico altrettanto variabile; questo, a sua volta, determina un nuovo campo elettrico variabile e così via. Tali campi concatenati producono nello spazio la propagazione di un campo e.m. la cui variazione spaziale e temporale può essere rappresentata mediante due onde, una magnetica (H) ed una elettrica (E). Queste onde sono in fase tra loro, cioè le rispettive ampiezze aumentano e diminuiscono simultaneamente ed oscillano perpendicolarmente tra loro.

Un campo elettromagnetico è caratterizzato dalla presenza contemporanea di un campo elettrico E e di un campo magnetico H variabili e mutuamente dipendenti.



Propagandosi, il campo e.m. propaga **energia e.m.** e si ha trasporto di energia nella direzione di avanzamento dei fronti d'onda.

L'energia per unità di tempo e per unità di superficie trasportata dall'onda viene detta **densità di potenza S** ed è data da $S = E \times H$.

La sua unità di misura è il Watt/metroquadro (W/m^2).

Dato che E ed H sono legate da Z_0 (impedenza d'onda), si ha anche: $S = Z_0 H^2 = E^2 / Z_0$.

Quindi, l'intensità di un campo e.m. può essere specificata indifferentemente fornendo il valore di S in W/m^2 oppure il valore efficace del campo E in V/m o il valore efficace del campo H in A/m .

Allontanandosi dalla sorgente i campi e.m. si distribuiscono su superfici sferiche sempre più ampie. La conservazione dell'energia implica che, al crescere della distanza r , la densità di potenza S deve decrescere come $1/r^2$, mentre E ed H decrescono come $1/r$. Questa diminuzione dell'intensità dei campi con la distanza viene chiamata comunemente **attenuazione di spazio libero**.

Zona di campo lontano e zona di campo vicino (Vicino e lontano rispetto alla sorgente)

Sia d la distanza di un punto dello spazio dalla sorgente del campo e.m.

Per $d \gg \lambda$ si è in zona di **campo lontano** ed i campi sono **radiativi**: l'energia e.m. lascia definitivamente la sorgente allontanandosene a velocità c_0 (velocità della luce nel vuoto).

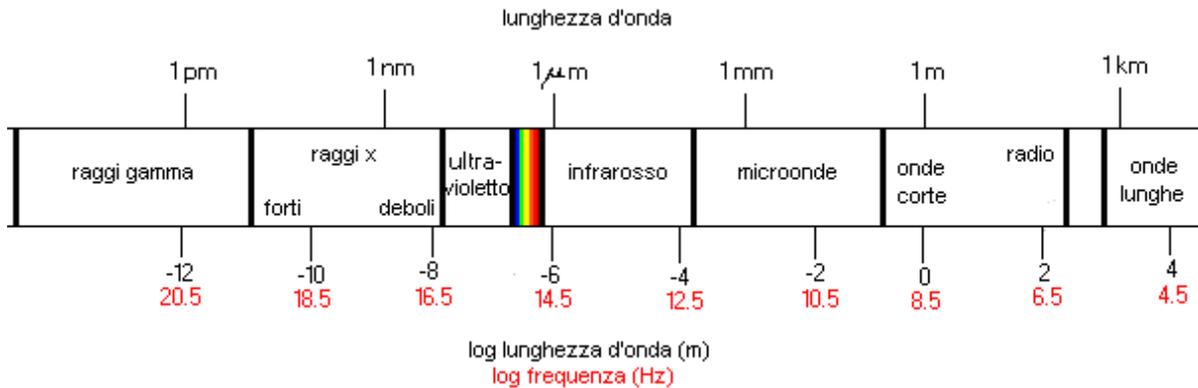
Per $d \ll \lambda$ si è in zona di **campo vicino** ed i campi sono **reattivi**, cioè non c'è trasporto di energia e.m. in

quanto l'energia dei campi resta localizzata attorno alla sorgente. L'aspetto reattivo diviene predominante per distanze dell'ordine di $l/10$. I campi reattivi per la loro stretta similitudine con i campi statici, da cui differiscono perché la loro intensità varia nel tempo, sono detti **quasi statici**.

Lo spettro elettromagnetico

Le radiazioni e.m. hanno uno spettro molto ampio suddiviso in una serie di intervalli classificati secondo la frequenza f o la lunghezza d'onda: ($\lambda f = c$):

Energia del fotone: $E = h \cdot f$ con $h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ costante di Planck.



Le radiazioni e.m. ionizzanti e non ionizzanti

Vengono definite **radiazioni e.m. non ionizzanti** (o anche **NIR** da *Non Ionizing Radiation*), quelle radiazioni la cui energia non è sufficiente ad estrarre elettroni da un atomo o da una molecola o anche da sistemi biologici più complessi quali una proteina, una cellula, un tessuto, un organo o un essere vivente.

Esse sono così denominate per distinguerle dalle **radiazioni e.m. ionizzanti** (raggi X e g), la cui pericolosità è da tempo accertata in termini di effetti cancerogeni.

Convenzionalmente la radiazione e.m. corrispondente alla lunghezza d'onda di **100 nm** (pari ad una energia fotonica di 12 eV) è considerata come linea di demarcazione tra radiazione ionizzante e non ionizzante.

Radiazione non-ionizzante(NIR), se $\lambda > 100 \text{ nm}$ oppure $E < 12 \text{ eV}$;

Radiazione ionizzante(IR), se $\lambda < 100 \text{ nm}$ oppure $E > 12 \text{ eV}$.

Denominazione	Sigla	Frequenza	Lunghezza d'onda
Campi statici		0	
Freq. estrem. basse (extremely low frequency)	ELF	0-3 KHz	-100 Km
Frequenze molto basse (very low frequency)	VLF	3-30 kHz	100-10 km
Basse frequenze, onde lunghe (low frequency)	LF	30-300 kHz	10-1 km
Frequenze e onde medie (medium frequency)	MF	300 kHz-3 MHz	1 km-100 m
Alte frequenze, onde corte (high frequency)	HF	3 - 30 MHz	100-10 m
Onde metriche (very high frequency)	VHF	30-300 MHz	10-1 m
Onde decimetriche (ultra high frequency)	UHF	300 MHz-3 GHz	1 m-10 cm
Onde centimetriche (super high frequency)	SHF	3-30 GHz	10-1 cm
Onde millimetriche (extremely high frequency)	EHF	30-300 GHz	1 cm-1 mm
Infrarossi (infrared)	IR	300 GHz-300 THz	1 mm-1 µm
Radiazione visibile			700 nm-300 nm
Radiazione ultravioletta (ultraviolet)	UV		300 nm-12 nm

Classificazione delle NIR

Nel caso di impianti fotovoltaici i campi EM generati sono:

- Campi statici nella sezione in c.c. dell'impianto
- Campi ELF nella cabina di trasformazione BT/MT e lungo i cavidotti di collegamento alla RTN.

Per la protezione della popolazione le linee elettriche aeree esterne, le cabine di trasformazione e le sottostazioni elettriche devono rispettare le seguenti **distanze minime di rispetto da fabbricati** adibiti ad abitazioni o attività lavorative o altro che comporti lunghi tempi di permanenza.

Per linee a: 132 kV >10m, 220 kV >18 m, 380 kV >28 m;

Per le cabine si adottano gli stessi criteri con riferimento alla massima tensione presente in cabina.

4. VERIFICA DEL RISCHIO ELETTROMAGNETICO

Emissioni nella sezione in corrente continua dell'impianto fotovoltaico

Nella sezione in corrente continua dell'impianto si è esclusivamente in presenza di campi elettrici e magnetici stazionari di debolissima intensità.

L'induzione magnetica può essere calcolata mediante la legge di Biot – Savart:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi R}$$

Mediante tale formula il campo alla distanza di 1 m da un conduttore percorso da una corrente di 10 A (corrente massima dei moduli fotovoltaici) è di 2µT (circa 25 volte inferiore al campo magnetico terrestre), tale campo inoltre non può propagare energia né indurre correnti nei corpi conduttori e quindi

non ha alcun effetto ai fini del rischio elettromagnetico.

Il campo elettrico inoltre dati la sostanziale equipotenzialità delle strutture di supporto dei moduli e del terreno è praticamente nullo in tutta la sezione in corrente continua del campo fotovoltaico.

5. EMISSIONI NELLA CABINA DI TRASFORMAZIONE BT/MT

Per quanto riguarda il campo elettrico e magnetico al suolo nella zona dei locali di trasformazione BT/MT, bisogna considerare che lo spazio è di norma chiuso ed interdetto ai non addetti ai lavori, e che anche questi operano sotto la linea normalmente con i sezionatori aperti per motivi di sicurezza, cioè con corrente elettrica nulla e dunque in assenza di emissioni dovute a campi elettromagnetici.

Occorre inoltre considerare che per la sezione in corrente continua della cabina valgono le considerazioni dianzi riportate per il campo elettrico e magnetico sul terreno, mentre per la sezione in corrente alternata occorre tener presente che si tratta quasi sempre di correnti alternate trifase bilanciate i cui effetti magnetici si compensano sino ad annullarsi.

La presenza degli schermi sui cavi e la messa a terra delle strutture metalliche degli armadi elettrici contribuiscono a rendere trascurabili gli effetti dei campi elettrici.

All'interno dell'edificio di controllo il valore del campo elettrico e del campo magnetico saranno tenuti al di sotto dei valori di soglia come previsto dalle norme in vigore (DPCM 23/04/1992).

La massima tensione presente nelle cabine di trasformazione è solitamente di 20 kV per cui è sufficiente una distanza di rispetto minima di 2 metri.

L'estensione dell'impianto fotovoltaico, solitamente diversi ettari, garantisce che questa distanza di sicurezza sia ampiamente rispettata.

6. EMISSIONI NELLA LINEA DI COLLEGAMENTO ALLA RTN

La linea di connessione genera, con andamento radiale rispetto ai cavi, dei campi elettromagnetici dovuti al passaggio della corrente e ad essa proporzionali. In aria, l'andamento di tale campo in funzione dalla distanza dal cavo è proporzionale all'inverso del quadrato della distanza, ossia esso diminuisce fortemente la sua intensità con l'allontanarsi dalla sorgente. La presenza di rivestimenti di isolamento e schermature metalliche ne limitano ulteriormente l'intensità. Il campo elettrico è prodotto da un sistema polifase risulta associato alle cariche in gioco, e quindi alle tensioni, ed è quindi presente non appena la linea sia posta in tensione, indipendentemente dal fatto che essa trasporti o meno potenza.

Il campo magnetico B è invece associato alla corrente (e quindi alla potenza) trasportata dalla linea: esso scompare quando la linea è solo "in tensione" ma non trasporta energia.

Le grandezze che determinano l'intensità e la distribuzione del campo magnetico nello spazio circostante una linea interrata sono fondamentalmente:

- intensità delle correnti di linea;
- distanza dai conduttori;
- isolanti, schermature e profondità di interrimento del cavo;
- disposizione e distanza tra conduttori

Per mitigare il campo magnetico generato da una linea elettrica è necessario agire su una o più delle grandezze sopra elencate, dal momento che la schermatura mediante materiali ad alta permeabilità e/o conducibilità non è strada praticabile. L'influenza dei vari fattori si evince immediatamente dalla legge di Biot-Savart: il campo magnetico è direttamente proporzionale all'intensità di corrente e inversamente

proporzionale alla distanza dalla sorgente.

Un quarto fattore, entra in gioco per il fatto che il sistema di trasmissione è trifase, cioè composto da una terna di correnti di uguale intensità ma sfasate nel tempo. Poiché il campo magnetico in ogni punto dello spazio circostante è dato dalla composizione vettoriale dei contributi delle singole correnti alternate, ne deriva un effetto di mutua compensazione di tali contributi tanto maggiore quanto più vicine tra loro sono le sorgenti, fino ad avere una compensazione totale se le tre correnti fossero concentriche.

Per le linee aeree, la distanza minima tra i conduttori è limitata alla necessaria distanza tra le fasi e dipende dalla tensione di esercizio, mentre per le linee in cavo avvolte a trifoglio tale distanza può essere dell'ordine di 7 - 10 cm con un abbattimento sostanziale del campo magnetico già a poca distanza. Come avviene ormai sempre più di frequente, le linee di Media Tensione non vengono più costruite mediante linea aerea, ma interrate consentendo di ridurre drasticamente l'effetto dovuto ai campi elettromagnetici attenuati dal terreno che agisce da "schermatura naturale", abbassando l'intensità di tali emissioni a valori addirittura inferiori ai più comuni elettrodomestici di uso quotidiano.

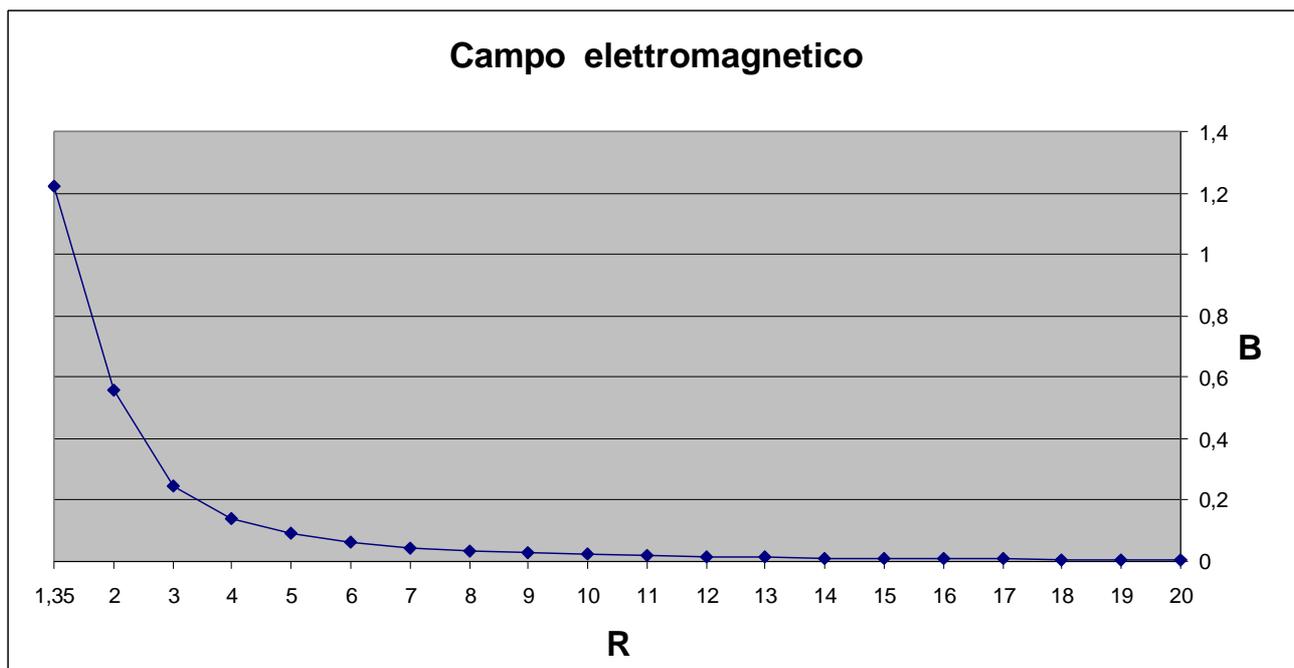
Un calcolo approssimato è stato effettuato per una linea in cavo interrato posato a trifoglio mediante la formula:

$$B = (P \cdot I / R^2) \cdot 0,1 \cdot 6^{1/2}$$

Dove P è la distanza tra i conduttori posti al vertice di un triangolo (0,07m), I (A) è la corrente simmetrica ed equilibrata che attraversa i conduttori, R(m) è la distanza dal baricentro dei conduttori alla quale calcolare l'induzione magnetica B in μT .

I calcoli sono stati condotti per una corrente di 129,90 Ampere corrispondente alla corrente nominale di un campo fotovoltaico di 6 MW (potenza massima di ogni soluzione di allaccio).

P	I	R	B
0,07	129,90	20	0,005567
0,07	129,90	19	0,006169
0,07	129,90	18	0,006873
0,07	129,90	17	0,007706
0,07	129,90	16	0,008699
0,07	129,90	15	0,009898
0,07	129,90	14	0,011362
0,07	129,90	13	0,013177
0,07	129,90	12	0,015465
0,07	129,90	11	0,018404
0,07	129,90	10	0,022269
0,07	129,90	9	0,027493
0,07	129,90	8	0,034796
0,07	129,90	7	0,045448
0,07	129,90	6	0,061859
0,07	129,90	5	0,089078
0,07	129,90	4	0,139184
0,07	129,90	3	0,247438
0,07	129,90	2	0,556735
0,07	129,90	1,35	1,221916



Come si vede solo sulla verticale del cavo l'induzione magnetica B raggiunge il valore di $1,22 \mu\text{T}$. L'obiettivo di qualità per i nuovi luoghi per l'infanzia, abitazioni e luoghi con permanenze di almeno 4 ore giornaliere, relativamente al solo campo magnetico è di $3 \mu\text{T}$, come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio, quindi più di 2 volte superiore al valore massimo stimato sulla verticale del cavo MT posato su strada, valore che, nel corso dell'esercizio dell'impianto verrà raramente raggiunto e solo per breve tempo nel corso dell'anno.

7. PROTEZIONE DAI RISCHI DI ELETTROCUZIONE

Protezione da corti circuiti e fulminazioni dirette sul lato c.c. dell'impianto

Gli impianti FV sono realizzati attraverso il collegamento in serie/parallelo di un determinato numero moduli FV, a loro volta realizzati attraverso il collegamento in serie/parallelo di celle FV inglobate e sigillate in un unico pannello d'insieme.

Negli impianti fotovoltaici la corrente di corto circuito dell'impianto non può superare la somma delle correnti di corto circuito delle singole stringhe.

Essendo le stringhe composte da una serie di generatori di corrente (i moduli fotovoltaici) la loro corrente di corto è di poco superiore alla corrente nel punto di massima potenza. L'utilizzo di interruttori magnetotermici e/o fusibili risulta quindi di scarsa efficacia nella sezione in corrente continua dell'impianto, in quanto la prossimità dei valori della corrente di corto circuito e della corrente nominale d'impianto rende impossibile discriminare tra le due correnti.

Protezione da contatti accidentali lato c.c.

Le tensioni continue sono particolarmente pericolose per la vita. Il contatto accidentale con una tensione di oltre 1.000 V. c.c. , che è la tensione tipica delle stringhe, può avere conseguenze letali.

Il rischio di fulminazioni dirette può essere grandemente diminuito realizzando l'impianto come

sistema IT, cioè isolato rispetto a terra, in tal caso infatti il contatto diretto con una delle polarità (positiva o negativa) dell'impianto non provoca alcun effetto nocivo, essendo necessario per avere effetti dannosi, il contatto contemporaneo con entrambe le polarità (positiva e negativa). In tal caso la probabilità di elettrocuzione diviene la probabilità composta di contatto accidentale con entrambe le polarità del campo e quindi grandemente minore rispetto alla probabilità di contatto con una sola delle polarità d'impianto.

Secondo la normativa vigente (CEI 64-8) i dispositivi IT devono essere dotati di un sistema di rivelazione dei guasti verso terra (salvavita), tale sistema è collocato in ingresso a ciascun inverter e, in caso di attivazione ne provoca l'arresto e l'emissione di un segnale d'allarme.

I moduli fotovoltaici sono inoltre classificati in classe 2 di isolamento così come i cavi di collegamento dei moduli agli inverter. Tuttavia, poiché il contatto metallico tra cornici dei moduli e strutture di sostegno potrebbe essere causa di fulminazioni indirette si provvederà a collegare elettricamente le cornici dei moduli alle strutture ed alla terra di impianto, in modo che sia impossibile una situazione di rischio per perdite verso massa.

Tutti i quadri di parallelo delle stringhe saranno dotati di chiusura di sicurezza e di connettori rapidi o pressacavi che rendano impossibile il contatto accidentale con parti in tensione da parte di persone non qualificate.

Protezione dalle sovratensioni atmosferiche

Un campo fotovoltaico correttamente collegato a massa non altera in alcun modo l'indice ceraunico della località di montaggio, e quindi la probabilità di essere colpito da un fulmine.

I moduli fotovoltaici sono in alto grado insensibili alle sovratensioni atmosferiche, che invece possono risultare pericolose per le apparecchiature elettroniche di condizionamento della potenza.

Per ridurre i danni dovuti ad eventuali sovratensioni i quadri di parallelo sottocampi sono muniti di varistori su entrambe le polarità dei cavi d'uscita. I varistori, per prevenire eventuali incendi, saranno segregati in appositi scomparti antideflagranti.

In caso di sovratensioni i varistori collegano una od entrambe le polarità dei cavi a massa e provocano l'immediato spegnimento degli inverter e l'emissione di un segnale d'allarme.

Sicurezze sul lato c.a. dell'impianto

La limitazione delle correnti del campo fotovoltaico comporta analoga limitazione anche nelle correnti in uscita dagli inverter.

Cortocircuiti sul lato alternata dell'impianto sono tuttavia pericolosi perché possono provocare ritorni da rete di intensità non limitata.

Pertanto l'interruttore MT in SF6 è equipaggiato con una protezione generale di massima corrente e una protezione contro i guasti a terra secondo quanto prescritto dalla normativa CEI 0-16.

Il trasformatore BT/MT è realizzato anch'esso come sistema IT ed è munito di apposito dispositivo di rivelazione dei guasti verso terra

Impianto di messa a terra

Le cabine elettriche sono dotate di una rete di messa a terra realizzata secondo la vigente normativa.

Le strutture di sostegno dei moduli sono collegate alla rete di terra mediante anello di terra e spandenti dedicato collegati con la rete elettrica delle cabine.

Alla rete di terra dell'impianto verrà anche collegata la recinzione metallica dell'impianto stesso.