




Impianto Agrivoltaico Avanzato 24.092,64 kWp Comune di Bondeno (FE)


RELAZIONI DI CALCOLO IMPIANTI ELETTRICI

| | | | | | |
|---|------|-----------------------|---|------------|---------------------|
| | | | | | |
| | | | | | |
| 28/02/2025 | 00 | Emissione finale | SGS srl | G. D'Amico | F. Boni Castagnetti |
| Data | Rev. | Descrizione Emissione | Preparato | Verificato | Approvato |
| Logo Committente e Denominazione Commerciale  | | | ID Documento Committente H_054_FV_00016_BER | | |
| Logo Appaltatore e Denominazione Commerciale  | | | ID Documento Appaltatore | | |


| | | |
|---|---|---------------------|
|  | ID Documento Committente H_054_FV_00016_BER | Pagina 2 / 35 |
| | | Numero Revisione |
| | | 00 |

Sommario

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | PREMESSA..... | 4 |
| 2 | PROGETTAZIONE ELETTRICA | 5 |
| 2.1 | Livelli di tensione..... | 5 |
| 2.2 | Requisiti per le apparecchiature | 5 |
| 2.2.1 | Vita delle apparecchiature elettriche | 5 |
| 2.2.2 | Temperature di progetto delle apparecchiature elettriche | 5 |
| 2.2.3 | Classe di isolamento e di sovratemperatura | 5 |
| 2.2.4 | Condizioni operative | 6 |
| 2.2.5 | Dimensionamento delle apparecchiature | 6 |
| 3 | STUDIO CADUTE DI TENSIONE NEI RAMI DISTRIBUTIVI DELL'IMPIANTO | 7 |
| 3.1 | Ramo distributivo in Media Tensione..... | 7 |
| 3.2 | Ramo distributivo in Bassa Tensione AC | 7 |
| 3.3 | Ramo distributivo in Bassa Tensione DC | 8 |
| 4 | CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DEI CAVI..... | 9 |
| 4.1 | Linee di Media Tensione..... | 9 |
| 4.1.1 | Esempio di verifica di portata dei cavi di Media Tensione..... | 10 |
| 4.2 | Linee di Bassa Tensione AC | 10 |
| 4.2.1 | Esempio di verifica di portata dei cavi di Bassa Tensione AC (Alimentazione Inverter) 11 | |
| 4.3 | Linee di Bassa Tensione DC | 11 |
| 4.3.1 | Esempio di verifica di portata dei cavi di Bassa Tensione DC (Stringhe)..... | 12 |
| 5 | SISTEMA ELETTRICO..... | 13 |
| 5.1 | Sistema elettrico generale | 13 |
| 5.2 | Sistema elettrico di sicurezza | 13 |
| 6 | STUDI DI RETE..... | 14 |
| 7 | CALCOLI ELETTRICI | 15 |
| 7.1 | Calcolo delle correnti di impiego | 15 |
| 7.2 | Dimensionamento dei cavi..... | 16 |
| 7.3 | Integrale di Joule | 17 |
| 7.4 | Dimensionamento del conduttore di neutro | 18 |
| 7.5 | Dimensionamento dei conduttori di protezione | 19 |
| 7.6 | Calcolo della temperatura dei cavi..... | 20 |

| | | |
|---|---|---------------------|
|  | ID Documento Committente H_054_FV_00016_BER | Pagina 3 / 35 |
| | | Numero Revisione |
| | | 00 |

| | | |
|------|---|----|
| 7.7 | Cadute di tensione..... | 20 |
| 7.8 | Fornitura della rete | 21 |
| 7.9 | Media Tensione..... | 22 |
| 7.10 | Trasformatori | 23 |
| 7.11 | Calcolo dei guasti..... | 24 |
| 7.12 | Guasti monofasi a terra linee MT | 29 |
| 7.13 | Scelta delle protezioni | 31 |
| 7.14 | Verifica della protezione a cortocircuito delle condutture..... | 32 |
| 7.15 | Verifica di selettività..... | 32 |
| 7.16 | Protezione contro i contatti indiretti..... | 33 |

| | | |
|--|---|---------------------|
|  | ID Documento Committente H_054_FV_00016_BER | Pagina 4 / 35 |
| | | Numero Revisione |
| | | 00 |

1 PREMESSA

Il presente documento fornisce le principali informazioni tecniche relative ai calcoli elettrici dell'impianto agrivoltaico avanzato di potenza complessiva pari a 24.092,64 kW_p, che verrà installato su trackers in un'area situata all'interno del Comune di Bondeno (FE).

Per maggiori dettagli relativi all'impianto, si rimanda all'elaborato ***H_054_FV_00002_BGR*** ***“Relazione Tecnica”***.

Le marche e i modelli richiamati all'interno del documento sono a titolo esemplificativo.

2 PROGETTAZIONE ELETTRICA

2.1 Livelli di tensione

I livelli di tensione presenti nell'impianto durante le normali condizioni operative saranno i seguenti:

| Parametro | Valore |
|--------------------------------------|---|
| Massima tensione CC | 1.500 V _{cc} |
| Distribuzione in Alta Tensione | 30 kV \pm 5%, 50 Hz-3 ph |
| Distribuzione in Bassa Tensione | 800 V _{ac} \pm 5%, 50 Hz-3 ph |
| Circuiti luce e forza elettromotrice | 400/230 V _{ac} , 50 Hz-3 ph+N/1 ph+N |
| Sistema AC UPS | 400/230 V _{ac} \pm 1% 50 Hz |

Tabella 1: Livelli di tensione

Le tolleranze sui livelli di tensione sopra indicati, sono da riferirsi alla sbarra dei quadri citati.

In normali condizioni d'esercizio, le variazioni di tensione e frequenza del sistema non devono eccedere rispettivamente il $\pm 5\%$ e il $\pm 2\%$. Tuttavia, tutte le apparecchiature elettriche devono essere dimensionate per resistere a una variazione della tensione del $\pm 10\%$ e una variazione della frequenza del sistema del $\pm 5\%$.

2.2 Requisiti per le apparecchiature

2.2.1 Vita delle apparecchiature elettriche

Tutte le apparecchiature elettriche e i loro accessori andranno progettati e forniti per garantire una vita utile almeno pari alla vita utile di impianto, che è di 20 anni. I materiali dovranno essere progettati per garantire massima la massima affidabilità e disponibilità di impianto in accordo alle prescrizioni contrattuali.


2.2.2 Temperature di progetto delle apparecchiature elettriche

La temperatura di design secondo cui verranno dimensionate le apparecchiature elettriche sarà di 40 °C e, pertanto, non dovranno subire derating.

2.2.3 Classe di isolamento e di sovratemperatura

In tabella sono riportati i requisiti minimi per le apparecchiature in termini di sovratemperatura e classe di isolamento.

| Apparecchiatura | Classe di isolamento (CEI-EN 60085) | Classe di sovratemperatura (CEI-EN 60034-1) |
|--|---|---|
| Motori asincroni e macchine sincrone: Fino a 1 kV Maggiori di 1 kV | F F | F (105K) B (80K) |

| | | |
|---|---|---------------------|
|  | ID Documento Committente H_054_FV_00016_BER | Pagina 6 / 35 |
| | | Numero Revisione |
| | | 00 |

| | | |
|--------------------------|---|----------|
| Trasformatori in resina: | | |
| Avvolgimenti AT | F | B (80K) |
| Avvolgimenti BT | F | F (100K) |

Tabella 2: Classe di isolamento e di sovratemperatura per le diverse apparecchiature

2.2.4 Condizioni operative

I materiali e i componenti elettrici dovranno essere scelti per operare in tutte le condizioni di progetto specificate.

2.2.5 Dimensionamento delle apparecchiature


Le apparecchiature elettriche saranno dimensionate sulla base della richiesta di carico.

Per le condizioni di dimensionamento delle apparecchiature elettriche si terrà conto di un sovradimensionamento rispetto alla potenza nominale come indicato in tabella.

| Livelli massimi di sovradimensionamento | Valore |
|--|--------|
| Livello di sovradimensionamento apparecchiature (eccetto componenti sottoelencati) | +10% |
| Livello di sovradimensionamento quadri elettrici | +20% |
| Livello di sovradimensionamento trasformatori | +20% |
| Livello di sovradimensionamento inverter | < 25% |
| Livello di sovradimensionamento gruppi elettrogeni (se presenti) | +0% |

Tabella 3: Livelli massimi di sovradimensionamento

Tutti i componenti, quali sbarre, interruttori, contattori e cavi dovranno essere dimensionati almeno per la corrente di guasto relativa al punto di installazione. In particolare, la corrente di funzionamento dovrà essere inferiore alla portata nominale della corrente di sbarra ed il valore della corrente di cortocircuito calcolato alla sbarra dovrà essere inferiore alle correnti di cortocircuito della sbarra stessa.

| | | |
|---|---|---------------------|
|  | ID Documento Committente H_054_FV_00016_BER | Pagina 7 / 35 |
| | | Numero Revisione |
| | | 00 |

3 STUDIO CADUTE DI TENSIONE NEI RAMI DISTRIBUTIVI DELL'IMPIANTO

Di seguito si riportano, in forma tabellare, i valori di caduta di tensione percentuale estrapolati dal software di calcolo.

3.1 Ramo distributivo in Media Tensione

Si riporta qui sotto il valore di caduta di tensione % nel tratto MT tra la Sottostazione Elettrica SSE e la Cabina di Raccolta FV interna all'impianto:

| Da | A | Cdt % |
|-----|--------------------|-------|
| SSE | Cabina di Raccolta | 1,855 |


Di seguito invece i valori percentuali relativi alle linee dalla cabina di raccolta alle Conversion Unit 1-4-7:

| Da | A | Cdt % |
|--------------------|-------------------|-------|
| Cabina di Raccolta | Conversion Unit 1 | 0,049 |
| Cabina di Raccolta | Conversion Unit 4 | 0,122 |
| Cabina di Raccolta | Conversion Unit 7 | 0,195 |

3.2 Ramo distributivo in Bassa Tensione AC

Si riporta qui sotto il valore di caduta di tensione percentuale medio nei tratti BT tra le Conversion Unit e gli inverter ad essa collegati:

| Da | A | Cdt % Media |
|-------------------|--------------|-------------|
| Conversion Unit 1 | Inverter 1.x | 0,658 |
| Conversion Unit 2 | Inverter 2.x | 0,485 |
| Conversion Unit 3 | Inverter 3.x | 0,453 |
| Conversion Unit 4 | Inverter 4.x | 0,513 |
| Conversion Unit 5 | Inverter 5.x | 0,473 |
| Conversion Unit 6 | Inverter 6.x | 0,732 |
| Conversion Unit 7 | Inverter 7.x | 0,376 |
| Conversion Unit 8 | Inverter 8.x | 0,343 |
| Conversion Unit 9 | Inverter 9.x | 0,32 |

| | | |
|---|---|---------------------|
|  | ID Documento Committente H_054_FV_00016_BER | Pagina 8 / 35 |
| | | Numero Revisione |
| | | 00 |

3.3 Ramo distributivo in Bassa Tensione DC

Si riporta qui sotto il valore di caduta di tensione percentuale medio nei tratti BT tra le Conversion Unit e le stringhe ad essa collegate:

| Da | A | Cdt % Media |
|-------------------|-------------------|----------------|
| Conversion Unit 1 | Stringhe DC - CU1 | 0,824 |
| Conversion Unit 2 | Stringhe DC - CU2 | 0,987 |
| Conversion Unit 3 | Stringhe DC - CU3 | 0,998 |
| Conversion Unit 4 | Stringhe DC - CU4 | 0,962 |
| Conversion Unit 5 | Stringhe DC - CU5 | 0,996 |
| Conversion Unit 6 | Stringhe DC - CU6 | 0,876 |
| Conversion Unit 7 | Stringhe DC - CU7 | 0,845 |
| Conversion Unit 8 | Stringhe DC - CU8 | 0,877 |
| Conversion Unit 9 | Stringhe DC - CU9 | 0,936 |

4 CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DEI CAVI

4.1 Linee di Media Tensione

Per quanto riguarda il dimensionamento delle linee di media tensione la normativa di riferimento utilizzata è la IEC 60502-2.

Il coefficiente di declassamento totale applicato alle portate dei cavi è 0.755; tale coefficiente è derivato dalla moltiplicazione dei fattori di 0.77 e 0.98.

Il coefficiente di 0.77 riguarda il declassamento per prossimità e corrisponde alla posa di 3 circuiti nella stessa tratta. Di seguito la tabella B.18 della norma:


Table B.18 – Correction factors for groups of three-core cables in horizontal formation laid direct in the ground

| Number of cables in group | Spacing between cable centres mm | | | | |
|---------------------------|-------------------------------------|------|------|------|------|
| | Touching | 200 | 400 | 600 | 800 |
| 2 | 0,80 | 0,86 | 0,90 | 0,92 | 0,94 |
| 3 | 0,69 | 0,77 | 0,82 | 0,86 | 0,89 |
| 4 | 0,62 | 0,72 | 0,79 | 0,83 | 0,87 |
| 5 | 0,57 | 0,68 | 0,76 | 0,81 | 0,85 |
| 6 | 0,54 | 0,65 | 0,74 | 0,80 | 0,84 |
| 7 | 0,51 | 0,63 | 0,72 | 0,78 | 0,83 |
| 8 | 0,49 | 0,61 | 0,71 | 0,78 | |
| 9 | 0,47 | 0,60 | 0,70 | 0,77 | – |
| 10 | 0,46 | 0,59 | 0,69 | – | – |
| 11 | 0,45 | 0,57 | 0,69 | – | – |
| 12 | 0,43 | 0,56 | 0,68 | – | – |

Il coefficiente di 0.98 riguarda il declassamento per profondità di posa e corrisponde alla posa dei circuiti alla profondità di 1 metro. Di seguito la tabella B.12 della norma:

Table B.12 – Correction factors for depths of laying other than 0,8 m for direct buried cables

| Depth of laying m | Single-core cables | | Three-core cables |
|----------------------|---|----------------------|----------------------|
| | Nominal conductor size mm ² | | |
| | ≤185 mm ² | >185 mm ² | |
| 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 |

| | | |
|---|---|---------------------|
|  | ID Documento Committente H_054_FV_00016_BER | Pagina 10 / 35 |
| | | Numero Revisione |
| | | 00 |

4.1.1 Esempio di verifica di portata dei cavi di Media Tensione

Il cavo è correttamente dimensionato se le capacità di corrente (I_z) sono maggiori della corrente di esercizio (I_b). Pertanto:

$$I_z > I_b$$

La corrente di esercizio I_b che transita nella linea 1 (Conversion Unit 1-2-3) da 30 kV è pari a 160,50 A.

La portata nominale, come da tabella B.9 della normativa IEC 60502-2, di un cavo avente formazione ARG7H1RNRX 18/30kV - 3x185mm² è di circa 289A.

La portata di un cavo multipolare da 185 mm², n. 1 cavo in parallelo per ogni fase, è quindi:

$$I_z = n. \text{ conduttori in parallelo} * I_0 * K_{tot} = 1 * 289 * 0,755 = \approx 218 \text{ A}$$

Il cavo è correttamente dimensionato perché le condizioni di cui sopra sono sicuramente soddisfatte ($I_z > I_b$).

La formazione della linea del cavo di alimentazione è ARG7H1RNRX 18/30kV - 3x185mm²

4.2 Linee di Bassa Tensione AC

Per quanto riguarda il dimensionamento delle linee di bassa tensione AC (Alimentazione Inverter) la normativa di riferimento utilizzata è la IEC 60364-5-52 Ed.3.

Il coefficiente di declassamento totale applicato alle portate dei cavi è 0.896; tale coefficiente è derivato dalla moltiplicazione dei fattori di 0.7 e 1.28.

Il coefficiente di 0.7 riguarda il declassamento per prossimità e corrisponde alla posa di 5 circuiti nella stessa tratta alla distanza di 25cm (distanza tra esterno cavo). Di seguito la tabella B.52.18 della norma:

Table B.52.18 – Reduction factors for more than one circuit, cables laid directly in the ground – Installation method D2 in Tables B.52.2 to B.52.5 – Single-core or multi-core cables

| Number of circuits | Cable to cable clearance ^a | | | | |
|--------------------|---------------------------------------|--------------------|---------|--------|-------|
| | Nil (cables touching) | One cable diameter | 0,125 m | 0,25 m | 0,5 m |
| 2 | 0,75 | 0,80 | 0,85 | 0,90 | 0,90 |
| 3 | 0,65 | 0,70 | 0,75 | 0,80 | 0,85 |
| 4 | 0,60 | 0,60 | 0,70 | 0,75 | 0,80 |
| 5 | 0,55 | 0,55 | 0,65 | 0,70 | 0,80 |
| 6 | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,70 | 0,80 |
| 7 | 0,45 | 0,51 | 0,59 | 0,67 | 0,76 |
| 8 | 0,43 | 0,48 | 0,57 | 0,65 | 0,75 |
| 9 | 0,41 | 0,46 | 0,55 | 0,63 | 0,74 |
| 12 | 0,36 | 0,42 | 0,51 | 0,59 | 0,71 |
| 16 | 0,32 | 0,38 | 0,47 | 0,56 | 0,38 |
| 20 | 0,29 | 0,35 | 0,44 | 0,53 | 0,66 |

Il coefficiente di 1.28 riguarda il declassamento per resistività termica del terreno e corrisponde alla posa dei circuiti avendo una resistività termica del terreno di 1.5 K*m/W. Di seguito la tabella B.52.16 della norma:

Table B.52.16 – Correction factors for cables buried direct in the ground or in buried ducts for soil thermal resistivities other than 2,5 K · m/W to be applied to the current-carrying capacities for reference method D

| Thermal resistivity, K · m/W | 0,5 | 0,7 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 |
|--|------|------|------|------|------|-----|------|
| Correction factor for cables in buried ducts | 1,28 | 1,20 | 1,18 | 1,1 | 1,05 | 1 | 0,96 |
| Correction factor for direct buried cables | 1,88 | 1,62 | 1,5 | 1,28 | 1,12 | 1 | 0,90 |

4.2.1 Esempio di verifica di portata dei cavi di Bassa Tensione AC (Alimentazione Inverter)

Il cavo è correttamente dimensionato se le capacità di corrente (I_z) sono maggiori della corrente di esercizio (I_b). Pertanto:

$$I_z > I_b$$

La corrente di esercizio I_b che transita nella linea di alimentazione dell'inverter INV1.1 è pari a 216,50 A.

La portata nominale, come da datasheet, di un cavo avente formazione TOPSOLAR PV SWA AL 1,8/3kV - 3x(1x300)mm² è di circa 386A.

La portata di un cavo unipolare da 300 mm², n. 1 cavo in parallelo per ogni fase, è quindi:

$$I_z = n. \text{ conduttori in parallelo} * I_0 * K_{tot} = 1 * 386 * 0,896 = \approx 345 \text{ A}$$

Il cavo è correttamente dimensionato perché le condizioni di cui sopra sono sicuramente soddisfatte ($I_z > I_b$).

La formazione della linea del cavo di alimentazione è TOPSOLAR PV SWA AL 1,8/3kV - 3x(1x300)mm²

4.3 Linee di Bassa Tensione DC

Per quanto riguarda il dimensionamento delle linee di bassa tensione DC (Stringhe) la normativa di riferimento utilizzata è la CEI UNEL 35026.

Il coefficiente di declassamento totale applicato alle portate dei cavi è 0.5.

Tale coefficiente riguarda il declassamento per prossimità e corrisponde alla posa di 9 circuiti nella stessa tratta. Abbiamo assunto che ci siano due tubazioni in partenza dall'inverter che si dividono a sinistra e destra per raggiungere tutte le strutture e in media ci sono 18 stringhe per inverter.

La norma CEI UNEL 35026 non prende in considerazione la posa di un certo numero di circuiti nella stessa tratta e rimanda alla normativa IEC 60364-5-52 Ed.3; pertanto, considerando le condizioni di posa a progetto (9 circuiti), si riporta di seguito la tabella B.52.17 della norma in questione:

Table B.52.17 – Reduction factors for one circuit or one multi-core cable or for a group of more than one circuit, or more than one multi-core cable, to be used with current-carrying capacities of Tables B.52.2 to B.52.13

| Item | Arrangement (cables touching) | Number of circuits or multi-core cables | | | | | | | | | | | | To be used with current-carrying capacities, reference |
|------|--|---|------|------|------|------|------|------|------|------|---|------|------|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 12 | 16 | 20 | |
| 1 | Bunched in air, on a surface, embedded or enclosed | 1,00 | 0,80 | 0,70 | 0,65 | 0,60 | 0,57 | 0,54 | 0,52 | 0,50 | 0,45 | 0,41 | 0,38 | B.52.2 to B.52.13 Methods A to F |
| 2 | Single layer on wall, floor or unperforated cable tray systems | 1,00 | 0,85 | 0,79 | 0,75 | 0,73 | 0,72 | 0,72 | 0,71 | 0,70 | No further reduction factor for more than nine circuits or multicore cables | | | B.52.2 to B.52.7 Method C |
| 3 | Single layer fixed directly under a wooden ceiling | 0,95 | 0,81 | 0,72 | 0,68 | 0,66 | 0,64 | 0,63 | 0,62 | 0,61 | | | | B.52.8 to B.52.13 Methods E and F |
| 4 | Single layer on a perforated horizontal or vertical cable tray systems | 1,00 | 0,88 | 0,82 | 0,77 | 0,75 | 0,73 | 0,73 | 0,72 | 0,72 | | | | |
| 5 | Single layer on cable ladder systems or cleats etc., | 1,00 | 0,87 | 0,82 | 0,80 | 0,80 | 0,79 | 0,79 | 0,78 | 0,78 | | | | |

4.3.1 Esempio di verifica di portata dei cavi di Bassa Tensione DC (Stringhe)

Il cavo è correttamente dimensionato se le capacità di corrente (I_z) sono maggiori della corrente di esercizio (I_b). Pertanto:

$$I_z > I_b$$

La corrente di esercizio I_b che transita nella linea dedicata alla stringa 1 dell'inverter INV1.1 è pari a 16,2 A.


La portata nominale, come da tabella 1 della normativa CEI UNEL 35026, di un cavo avente formazione H1Z2Z2-K 1,5/1,5kV - 2x(1x6)mm² è di circa 45A.

La portata di un cavo unipolare da 6 mm², n. 1 cavo in parallelo per ogni fase, è quindi:

$$I_z = n. \text{ conduttori in parallelo} * I_0 * K_{tot} = 1 * 45 * 0,5 = 22.5 \text{ A}$$

Il cavo è correttamente dimensionato perché le condizioni di cui sopra sono sicuramente soddisfatte ($I_z > I_b$).

La formazione della linea del cavo di alimentazione è H1Z2Z2-K 1,5/1,5kV - 2x(1x6)mm²

| | | |
|---|---|---------------------|
|  | ID Documento Committente H_054_FV_00016_BER | Pagina 13 / 35 |
| | | Numero Revisione |
| | | 00 |

5 SISTEMA ELETTRICO

5.1 Sistema elettrico generale

Il sistema elettrico generale è costituito principalmente dal generatore fotovoltaico composto da moduli in silicio cristallino e da tutti le apparecchiature e gli elementi e i componenti necessari per l'immissione nella rete elettrica nazionale dell'energia prodotta.

Il generatore fotovoltaico sarà costituito dall'insieme dei raggruppamenti di moduli fotovoltaici collegati in serie e in parallelo (sottocampi fotovoltaici). Più precisamente i moduli verranno collegati elettricamente in serie a gruppi di moduli formando così una stringa. Le stringhe saranno collegate elettricamente agli ingressi in corrente continua degli inverter previsti in campo e opportunamente dimensionati.

Gli inverter (lato corrente alternata) saranno collegati al quadro BT di parallelo all'interno delle Conversion Unit BT/MT alimentate in MT e collegate alla Cabina di Raccolta.


Il sistema di generazione elettrica principale sarà progettato per produrre e immettere l'energia prodotta nella Rete Elettrica Nazionale.

Gli ausiliari del campo fotovoltaico dovranno essere capaci di alimentare tutti i carichi necessari all'impianto PV, inclusi i carichi ausiliari, illuminazione, sistema SCADA e telecomunicazione, eventuali cabine elettriche ausiliarie, ecc..

5.2 Sistema elettrico di sicurezza

Il sistema elettrico di sicurezza sarà composto da gruppi di continuità statici e dai relativi banchi di batterie.

Tali sistemi dovranno essere in grado di alimentare i carichi classificati come vitali/riserva per un tempo minimo specificato dalla legge o dalla normativa vigente o dai requisiti minimi richiesti nella documentazione di progetto.

| | | |
|--|---|---------------------|
|  | ID Documento Committente H_054_FV_00016_BER | Pagina 14 / 35 |
| | | Numero Revisione |
| | | 00 |

6 STUDI DI RETE

Durante la fase di progettazione esecutiva dovrà essere sviluppato uno studio elettrico di potenza che tenga conto delle caratteristiche dei componenti scelti per l'impianto fotovoltaico e delle interazioni con l'architettura della rete esistente. Dovranno essere prodotti i calcoli di load flow, il calcolo delle correnti di cortocircuito, l'analisi della stabilità transitoria e delle armoniche. Dovrà essere effettuato uno studio di selettività, coordinamento e verifica del corretto dimensionamento delle protezioni.

Lo studio dovrà dimostrare la conformità dell'impianto ai requisiti della norma CEI 0-16 e altresì dimostrare che l'impianto fotovoltaico non introdurrà disturbi sulla rete esistente o volta ad identificare le eventuali azioni correttive. Particolare attenzione verrà data al contributo armonico introdotto dagli inverter. Dovrà essere effettuato, inoltre, il calcolo della rete di terra presso le cabine MT e il campo fotovoltaico.

Il calcolo della corrente di cortocircuito dovrà essere condotto in accordo alle seguenti norme IEC 60909 per i sistemi in corrente alternata e IEC 61660 per i sistemi in corrente continua.

Saranno, inoltre, calcolate le correnti minime di cortocircuito, al fine di verificare il corretto intervento delle protezioni.

I calcoli dovranno includere:

- il guasto trifase simmetrico;
- il guasto fase-fase;
- il guasto monofase a terra.

Per ognuno dei guasti sopracitati dovranno essere calcolati:


- il valore delle correnti di picco massimo e minimo;
- il valore della corrente alle condizioni r.m.s massimo e minimo;
- la capacità di interruzione di tutti i circuiti;

Lo studio includerà il calcolo delle correnti di cortocircuito sulle stringhe DC dell'impianto fotovoltaico. Dovrà, inoltre, essere condotta un'analisi sulle armoniche volta a valutare la distorsione di tensione creata dagli inverter CC/CA, sulla intera rete elettrica, al fine di definire al meglio la scelta dei filtri più adatti.

Lo studio sulla stabilità transitori dovrà contenere i diagrammi che mostrano la capacità della rete di riacquistare i parametri nominali nei periodi di tempo prestabiliti in caso di perturbazioni.

Questo studio dovrà suggerire, inoltre, l'impostazione ottimale dei relè di frequenza e di tensione.

Inoltre, dovrà essere incluso anche lo studio del rifasamento dei carichi elettrici esistenti con la presenza del nuovo impianto fotovoltaico ed eventuali soluzioni e modifiche da apportare per garantire il corretto cosφ.

| | | |
|--|---|---------------------|
|  | ID Documento Committente H_054_FV_00016_BER | Pagina 15 / 35 |
| | | Numero Revisione |
| | | 00 |

7 CALCOLI ELETTRICI

7.1 Calcolo delle correnti di impiego

Il calcolo delle correnti d'impiego viene eseguito in base alla classica espressione:

$$I_b = \frac{P_d}{k_{ca} \cdot V_n \cdot \cos \varphi}$$

nella quale:

- $k_{ca} = 1$ sistema monofase o bifase, due conduttori attivi;
- $k_{ca} = 1.73$ sistema trifase, tre conduttori attivi.

Se la rete è in corrente continua il fattore di potenza $\cos \varphi$ è pari a 1.

Dal valore massimo (modulo) di I_b vengono calcolate le correnti di fase in notazione vettoriale (parte reale ed immaginaria) con le formule:

$$\begin{aligned}\dot{I}_1 &= I_b \cdot e^{-j\varphi} = I_b \cdot (\cos \varphi - j \sin \varphi) \\ \dot{I}_2 &= I_b \cdot e^{-j(\varphi - 2\pi/3)} = I_b \cdot \left(\cos \left(\varphi - \frac{2\pi}{3} \right) - j \sin \left(\varphi - \frac{2\pi}{3} \right) \right) \\ \dot{I}_3 &= I_b \cdot e^{-j(\varphi - 4\pi/3)} = I_b \cdot \left(\cos \left(\varphi - \frac{4\pi}{3} \right) - j \sin \left(\varphi - \frac{4\pi}{3} \right) \right)\end{aligned}$$

Il vettore della tensione V_n è supposto allineato con l'asse dei numeri reali:

$$\dot{V}_n = V_n + j0$$

La potenza di dimensionamento P_d è data dal prodotto:

$$P_d = P_n \cdot coeff$$

nella quale coeff è pari al fattore di utilizzo per utenze terminali oppure al fattore di contemporaneità per utenze di distribuzione.


Per le utenze terminali la potenza P_n è la potenza nominale del carico, mentre per le utenze di distribuzione P_n rappresenta la somma vettoriale delle P_d delle utenze a valle (SPd a valle).

La potenza reattiva delle utenze viene calcolata invece secondo la:

$$Q_n = P_n \cdot \tan \varphi$$

per le utenze terminali, mentre per le utenze di distribuzione viene calcolata come somma vettoriale delle potenze reattive nominali a valle (SQd a valle).

Il fattore di potenza per le utenze di distribuzione viene valutato, di conseguenza, con la:

| | | |
|---|---|---------------------|
|  | ID Documento Committente H_054_FV_00016_BER | Pagina 16 / 35 |
| | | Numero Revisione |
| | | 00 |

$$\cos \varphi = \cos \left(\arctan \left(\frac{Q_n}{P_n} \right) \right)$$

7.2 Dimensionamento dei cavi

Il criterio seguito per il dimensionamento dei cavi è tale da poter garantire la protezione dei conduttori alle correnti di sovraccarico.

In base alla norma CEI 64-8/4 (par. 433.2), infatti, il dispositivo di protezione deve essere coordinato con la conduttura in modo da verificare le condizioni:

$$\begin{aligned} a) \quad & I_b \leq I_n \leq I_z \\ b) \quad & I_f \leq 1.45 \cdot I_z \end{aligned}$$

Per la condizione a) è necessario dimensionare il cavo in base alla corrente nominale della protezione a monte. Dalla corrente I_b , pertanto, viene determinata la corrente nominale della protezione (seguendo i valori normalizzati) e con questa si procede alla determinazione della sezione.

Il dimensionamento dei cavi rispetta anche i seguenti casi:

- condutture senza protezione derivate da una conduttura principale protetta contro i sovraccarichi con dispositivo idoneo ed in grado di garantire la protezione anche delle condutture derivate;
- conduttura che alimenta diverse derivazioni singolarmente protette contro i sovraccarichi, quando la somma delle correnti nominali dei dispositivi di protezione delle derivazioni non supera la portata I_z della conduttura principale.

L'individuazione della sezione si effettua utilizzando le tabelle di posa assegnate ai cavi. Elenchiamo alcune tabelle, indicate per il mercato italiano:


- IEC 60364-5-52 (PVC/EPR);
- IEC 60364-5-52 (Mineral);
- CEI-UNEL 35024/1;
- CEI-UNEL 35024/2;
- CEI-UNEL 35026;
- CEI 20-91 (HEPR).

In media tensione, la gestione del calcolo si divide a seconda delle tabelle scelte:

- CEI 11-17;
- CEI UNEL 35027 (1-30kV).
- EC 60502-2 (6-30kV)
- IEC 61892-4 off-shore (fino a 30kV)

Il programma gestisce ulteriori tabelle, specifiche per alcuni paesi. L'elenco completo è disponibile nei Riferimenti normativi.

Esse oltre a riportare la corrente ammissibile I_z in funzione del tipo di isolamento del cavo, del tipo di posa e del numero di conduttori attivi, riportano anche la metodologia di valutazione dei coefficienti di declassamento.

| | | |
|---|---|---------------------|
|  | ID Documento Committente H_054_FV_00016_BER | Pagina 17 / 35 |
| | | Numero Revisione |
| | | 00 |

La portata minima del cavo viene calcolata come:

$$I_{z\min} = \frac{I_n}{k}$$

dove il coefficiente k ha lo scopo di declassare il cavo e tiene conto dei seguenti fattori:

- tipo di materiale conduttore;
- tipo di isolamento del cavo;
- numero di conduttori in prossimità compresi eventuali paralleli;
- eventuale declassamento deciso dall'utente.

La sezione viene scelta in modo che la sua portata (moltiplicata per il coefficiente k) sia superiore alla $I_{z\min}$. Gli eventuali paralleli vengono calcolati nell'ipotesi che abbiano tutti la stessa sezione, lunghezza e tipo di posa (vedi norma 64.8 par. 433.3), considerando la portata minima come risultante della somma delle singole portate (declassate per il numero di paralleli dal coefficiente di declassamento per prossimità).

La condizione b) non necessita di verifica in quanto gli interruttori che rispondono alla norma CEI 23.3 hanno un rapporto tra corrente convenzionale di funzionamento I_f e corrente nominale I_n minore di 1.45 ed è costante per tutte le tarature inferiori a 125 A. Per le apparecchiature industriali, invece, le norme CEI 17.5 e IEC 947 stabiliscono che tale rapporto può variare in base alla corrente nominale, ma deve comunque rimanere minore o uguale a 1.45.

Risulta pertanto che, in base a tali normative, la condizione b) sarà sempre verificata.

Le condutture dimensionate con questo criterio sono, pertanto, protette contro le sovracorrenti.

7.3 Integrale di Joule


Dalla sezione dei conduttori del cavo deriva il calcolo dell'integrale di Joule, ossia la massima energia specifica ammessa dagli stessi, tramite la:

$$I^2 \cdot t = K^2 \cdot S^2$$

La costante K viene data dalla norma CEI 64-8/4 (par. 434.3), per i conduttori di fase e neutro e, dal paragrafo 64-8/5 (par. 543.1), per i conduttori di protezione in funzione al materiale conduttore e al materiale isolante. Per i cavi ad isolamento minerale le norme attualmente sono allo studio, i paragrafi sopraccitati riportano però nella parte commento dei valori prudenziali.

I valori di K riportati dalla norma sono per i conduttori di fase (par. 434.3):

| | |
|--|-----------|
| Cavo in rame e isolato in PVC: | $K = 115$ |
| Cavo in rame e isolato in gomma G: | $K = 135$ |
| Cavo in rame e isolato in gomma etilenpropilenica G5-G7: | $K = 143$ |
| Cavo in rame serie L rivestito in materiale termoplastico: | $K = 115$ |
| Cavo in rame serie L nudo: | $K = 200$ |
| Cavo in rame serie H rivestito in materiale termoplastico: | $K = 115$ |
| Cavo in rame serie H nudo: | $K = 200$ |
| Cavo in alluminio e isolato in PVC: | $K = 74$ |

| | | |
|--|---|---------------------|
|  | ID Documento Committente H_054_FV_00016_BER | Pagina 18 / 35 |
| | | Numero Revisione |
| | | 00 |

Cavo in alluminio e isolato in G, G5-G7:

K = 92

I valori di K per i conduttori di protezione unipolari (par. 543.1) tab. 54B:

| | |
|--|---------|
| Cavo in rame e isolato in PVC: | K = 143 |
| Cavo in rame e isolato in gomma G: | K = 166 |
| Cavo in rame e isolato in gomma G5-G7: | K = 176 |
| Cavo in rame serie L rivestito in materiale termoplastico: | K = 143 |
| Cavo in rame serie L nudo: | K = 228 |
| Cavo in rame serie H rivestito in materiale termoplastico: | K = 143 |
| Cavo in rame serie H nudo: | K = 228 |
| Cavo in alluminio e isolato in PVC: | K = 95 |
| Cavo in alluminio e isolato in gomma G: | K = 110 |
| Cavo in alluminio e isolato in gomma G5-G7: | K = 116 |

I valori di K per i conduttori di protezione in cavi multipolari (par. 543.1) tab. 54C:


| | |
|--|---------|
| Cavo in rame e isolato in PVC: | K = 115 |
| Cavo in rame e isolato in gomma G: | K = 135 |
| Cavo in rame e isolato in gomma G5-G7: | K = 143 |
| Cavo in rame serie L rivestito in materiale termoplastico: | K = 115 |
| Cavo in rame serie L nudo: | K = 228 |
| Cavo in rame serie H rivestito in materiale termoplastico: | K = 115 |
| Cavo in rame serie H nudo: | K = 228 |
| Cavo in alluminio e isolato in PVC: | K = 76 |
| Cavo in alluminio e isolato in gomma G: | K = 89 |
| Cavo in alluminio e isolato in gomma G5-G7: | K = 94 |

7.4 Dimensionamento del conduttore di neutro

La norma CEI 64-8 par. 524.2 e par. 524.3, prevede che la sezione del conduttore di neutro, nel caso di circuiti polifasi, possa avere una sezione inferiore a quella dei conduttori di fase se sono soddisfatte le seguenti condizioni:

- il conduttore di fase abbia una sezione maggiore di 16 mm²;
- la massima corrente che può percorrere il conduttore di neutro non sia superiore alla portata dello stesso
- la sezione del conduttore di neutro sia almeno uguale a 16 mm² se il conduttore è in rame e a 25 mm² se il conduttore è in alluminio.

Nel caso in cui si abbiano circuiti monofasi o polifasi e questi ultimi con sezione del conduttore di fase minore di 16 mm² se conduttore in rame e 25 mm² se e conduttore in alluminio, il conduttore di

| | | |
|---|---|---------------------|
|  | ID Documento Committente H_054_FV_00016_BER | Pagina 19 / 35 |
| | | Numero Revisione |
| | | 00 |

neutro deve avere la stessa sezione del conduttore di fase. In base alle esigenze progettuali, sono gestiti fino a tre metodi di dimensionamento del conduttore di neutro, mediante:

- determinazione in relazione alla sezione di fase;
- determinazione tramite rapporto tra le portate dei conduttori;
- determinazione in relazione alla portata del neutro.

Il primo criterio consiste nel determinare la sezione del conduttore in questione secondo i seguenti vincoli dati dalla norma:

$$\begin{aligned}
S_f < 16\text{mm}^2: & \quad S_n = S_f \\
16 \leq S_f \leq 35\text{mm}^2: & \quad S_n = 16\text{mm}^2 \\
S_f > 35\text{mm}^2: & \quad S_n = S_f / 2
\end{aligned}$$

Il secondo criterio consiste nell'impostare il rapporto tra le portate del conduttore di fase e il conduttore di neutro, e il programma determinerà la sezione in base alla portata.

Il terzo criterio consiste nel dimensionare il conduttore tenendo conto della corrente di impiego circolante nel neutro come per un conduttore di fase.

Le sezioni dei neutri possono comunque assumere valori differenti rispetto ai metodi appena citati, comunque sempre calcolati a regola d'arte.

7.5 Dimensionamento dei conduttori di protezione

La norma CEI 64.8 par. 543.1 prevede due metodi di dimensionamento dei conduttori di protezione:

- determinazione in relazione alla sezione di fase;
- determinazione mediante calcolo.

Il primo criterio consiste nel determinare la sezione del conduttore di protezione seguendo vincoli analoghi a quelli introdotti per il conduttore di neutro:


$$\begin{aligned}
S_f < 16\text{mm}^2: & \quad S_{PE} = S_f \\
16 \leq S_f \leq 35\text{mm}^2: & \quad S_{PE} = 16\text{mm}^2 \\
S_f > 35\text{mm}^2: & \quad S_{PE} = S_f / 2
\end{aligned}$$

Il secondo criterio determina tale valore con l'integrale di Joule, ovvero la sezione del conduttore di protezione non deve essere inferiore al valore determinato con la seguente formula:

$$S_p = \frac{\sqrt{I^2 \cdot t}}{K}$$

dove:

1. S_p è la sezione del conduttore di protezione (mm^2);
2. I è il valore efficace della corrente di guasto che può percorrere il conduttore di protezione per un guasto di impedenza trascurabile (A);
3. t è il tempo di intervento del dispositivo di protezione (s);

| | | |
|---|---|---------------------|
|  | ID Documento Committente H_054_FV_00016_BER | Pagina 20 / 35 |
| | | Numero Revisione |
| | | 00 |

4. K è un fattore il cui valore dipende dal materiale del conduttore di protezione, dell'isolamento e di altre parti.

Se il risultato della formula non è una sezione unificata, viene presa una unificata immediatamente superiore.

In entrambi i casi si deve tener conto, per quanto riguarda la sezione minima, del paragrafo 543.1.3.

Esso afferma che la sezione di ogni conduttore di protezione che non faccia parte della conduttura di alimentazione non deve essere, in ogni caso, inferiore a:

- 2,5 mm² rame o 16 mm² alluminio se è prevista una protezione meccanica;
- 4 mm² o 16 mm² alluminio se non è prevista una protezione meccanica;

E' possibile, altresì, determinare la sezione mediante il rapporto tra le portate del conduttore di fase e del conduttore di protezione.

Nei sistemi TT, la sezione dei conduttori di protezione può essere limitata a:

- 25 mm², se in rame;
- 35 mm², se in alluminio;

7.6 Calcolo della temperatura dei cavi

La valutazione della temperatura dei cavi si esegue in base alla corrente di impiego e alla corrente nominale tramite le seguenti espressioni:

$$T_{cavo}(I_b) = T_{ambiente} + \left(\alpha_{cavo} \cdot \frac{I_b^2}{I_z^2} \right)$$

$$T_{cavo}(I_n) = T_{ambiente} + \left(\alpha_{cavo} \cdot \frac{I_n^2}{I_z^2} \right)$$

espresse in °C.

Esse derivano dalla considerazione che la sovratemperatura del cavo a regime è proporzionale alla potenza in esso dissipata.


Il coefficiente α_{cavo} è vincolato dal tipo di isolamento del cavo e dal tipo di tabella di posa che si sta usando.

7.7 Cadute di tensione

Le cadute di tensione sono calcolate vettorialmente. Per ogni utenza si calcola la caduta di tensione vettoriale lungo ogni fase e lungo il conduttore di neutro (se distribuito). Tra le fasi si considera la caduta di tensione maggiore che viene riportata in percentuale rispetto alla tensione nominale:

$$c.d.t(ib) = \max \left(\left| \sum_{i=1}^k \dot{Z}f_i \cdot \dot{I}f_i - \dot{Z}n_i \cdot \dot{I}n_i \right| \right)_{f=R,S,T}$$

con f che rappresenta le tre fasi R, S, T;

| | | |
|--|---|---------------------|
|  | ID Documento Committente H_054_FV_00016_BER | Pagina 21 / 35 |
| | | Numero Revisione |
| | | 00 |

con n che rappresenta il conduttore di neutro;

con i che rappresenta le k utenze coinvolte nel calcolo;

Il calcolo fornisce, quindi, il valore esatto della formula approssimata:

$$cdt(I_b) = k_{cdt} \cdot I_b \cdot \frac{L_c}{1000} \cdot (R_{cavo} \cdot \cos\varphi + X_{cavo} \cdot \sin\varphi) \cdot \frac{100}{V_n}$$

con:

- $k_{cdt} = 2$ per sistemi monofase;
- $k_{cdt} = 1.73$ per sistemi trifase.

I parametri R_{cavo} e X_{cavo} sono ricavati dalla tabella UNEL in funzione del tipo di cavo (unipolare/multipolare) ed alla sezione dei conduttori; di tali parametri il primo è riferito a 70° C per i cavi con isolamento PVC, a 90° C per i cavi con isolamento EPR; mentre il secondo è riferito a 50Hz, ferme restando le unità di misura in W/km.

Se la frequenza di esercizio è differente dai 50 Hz si imposta

$$X'_{cavo} = \frac{f}{50} \cdot X_{cavo}$$

La caduta di tensione da monte a valle (totale) di una utenza è determinata come somma delle cadute di tensione vettoriale, riferite ad un solo conduttore, dei rami a monte all'utenza in esame, da cui, viene successivamente determinata la caduta di tensione percentuale riferendola al sistema (trifase o monofase) e alla tensione nominale dell'utenza in esame.

Sono adeguatamente calcolate le cadute di tensione totali nel caso siano presenti trasformatori lungo la linea (per esempio trasformatori MT/BT o BT/BT). In tale circostanza, infatti, il calcolo della caduta di tensione totale tiene conto sia della caduta interna nei trasformatori, sia della presenza di spine di regolazione del rapporto spire dei trasformatori stessi.


Se al termine del calcolo delle cadute di tensione alcune utenze abbiano valori superiori a quelli definiti, si ricorre ad un procedimento di ottimizzazione per far rientrare la caduta di tensione entro limiti prestabiliti (limiti dati da CEI 64-8 par. 525). Le sezioni dei cavi vengono forzate a valori superiori cercando di seguire una crescita uniforme fino a portare tutte le cadute di tensione sotto i limiti.

7.8 Fornitura della rete

La conoscenza della fornitura della rete è necessaria per l'inizializzazione della stessa al fine di eseguire il calcolo dei guasti.

Le tipologie di fornitura possono essere:

- in bassa tensione
- in media tensione
- ad impedenza nota
- in corrente continua

| | | |
|--|---|---------------------|
|  | ID Documento Committente H_054_FV_00016_BER | Pagina 22 / 35 |
| | | Numero Revisione |
| | | 00 |

I parametri trovati in questa fase servono per inizializzare il calcolo dei guasti, ossia andranno sommati ai corrispondenti parametri di guasto dall'utenza a valle. Noti i parametri alle sequenze nel punto di fornitura, è possibile inizializzare la rete e calcolare le correnti di cortocircuito secondo le norme CEI EN 60909-0.

Tali correnti saranno utilizzate in fase di scelta delle protezioni per la verifica dei poteri di interruzione delle apparecchiature.

7.9 Media Tensione

Nel caso in cui la fornitura sia in media o alta tensione si considerano i seguenti dati di partenza:

- Tensione di fornitura V_{mt} (in kV);
- Corrente di corto circuito trifase massima, I_{kmax} (in kA);
- Corrente di corto circuito monofase a terra massima, $I_{k1ftmax}$ (in kA);

La corrente di cortocircuito trifase è la corrente che fluisce in ciascun conduttore di fase del circuito principale nel punto di cortocircuito; quella massima viene calcolata supponendo la tensione preesistente al guasto pari al 110% della tensione nominale, trascurando le correnti di carico e considerando nulla la resistenza di guasto.

Nel caso in cui la tensione nominale è pari a 15 kV, l'ente fornitore considera come $I_{cc3f_max} = 12,5 \text{ kA}$

La potenza di cortocircuito della rete sarà allora

$$P_{cc} = \sqrt{3} \cdot V_n \cdot I_{cc3f_max} = 324,759 \text{ MVA}$$

Se si conoscono si possono aggiungere anche le correnti:

- Corrente di corto circuito trifase minima, I_{kmin} (in kA);
- Corrente di corto circuito monofase a terra minima, $I_{k1ftmin}$ (in kA);

Dai dati si ricavano le impedenze equivalenti della rete di fornitura per determinare il generatore equivalente di tensione.


$$Z_{ccmt} = \frac{1,1 \cdot V_{mt}}{\sqrt{3} \cdot I_{kmax}} \cdot 1000$$

da cui si ricavano le componenti dirette:

$$\begin{aligned} \cos \varphi_{ccmt} &= \sqrt{1 - (0,995)^2} \\ X_{dl} &= 0,995 \cdot Z_{ccmt} \\ R_{dl} &= \cos \varphi_{ccmt} \cdot Z_{ccmt} \end{aligned}$$

e le componenti omopolari:

$$\begin{aligned} R_0 &= \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot V_{mt}}{I_{k1ftmax}} \cdot 1000 \cdot \cos \varphi_{ccmt} - (2 \cdot R_{dl}) \\ X_0 &= R_0 \cdot \sqrt{\frac{1}{(\cos \varphi_{ccmt})^2} - 1} \end{aligned}$$

| | | |
|--|---|---------------------|
|  | ID Documento Committente H_054_FV_00016_BER | Pagina 23 / 35 |
| | | Numero Revisione |
| | | 00 |

7.10 Trasformatori

Se nella rete sono presenti dei trasformatori a due avvolgimenti, i dati di targa richiesti sono:

- potenza nominale P_n (in kVA);
- perdite di cortocircuito P_{cc} (in W);
- tensione di cortocircuito v_{cc} (in %)
- rapporto tra la corrente di inserzione e la corrente nominale I_{ir}/I_{rt} ;
- rapporto tra la impedenza alla sequenza omopolare e quella di corto circuito;
- tipo di collegamento;
- tensione nominale del primario V_1 (in kV);
- tensione nominale del secondario V_{02} (in V).

Dai dati di targa si possono ricavare le caratteristiche elettriche dei trasformatori, ovvero:

- Impedenza di cortocircuito del trasformatore espressa in mW:

$$Z_{cct} = \frac{v_{cc}}{100} \cdot \frac{V_{02}^2}{P_n}$$

- Resistenza di cortocircuito del trasformatore espressa in mW:

$$R_{cct} = \frac{P_{cc}}{1000} \cdot \frac{V_{02}^2}{P_n^2}$$

- Reattanza di cortocircuito del trasformatore espressa in mW:

$$X_{cct} = \sqrt{Z_{cct}^2 - R_{cct}^2}$$

L'impedenza a vuoto omopolare del trasformatore viene ricavata dal rapporto con l'impedenza di cortocircuito dello stesso:


$$Z_{vot} = Z_{cct} \cdot \left(\frac{Z_{vot}}{Z_{cct}} \right)$$

dove il rapporto Z_{vot}/Z_{cct} vale usualmente 10-20.

In uscita al trasformatore si otterranno pertanto i parametri alla sequenza diretta, in mW:

$$Z_d = |\dot{Z}_{cct}| = \sqrt{R_d^2 + X_d^2}$$

nella quale:

| | | |
|---|---|---------------------|
|  | ID Documento Committente H_054_FV_00016_BER | Pagina 24 / 35 |
| | | Numero Revisione |
| | | 00 |

$$R_d = R_{cct}$$

$$X_d = X_{cct}$$

I parametri alla sequenza omopolare dipendono invece dal tipo di collegamento del trasformatore in quanto, in base ad esso, abbiamo un diverso circuito equivalente.

Pertanto, se il trasformatore è collegato triangolo/stella (Dy), si ha:

$$R_{ot} = R_{cct} \cdot \frac{\left(\frac{Z_{vot}}{Z_{cct}} \right)}{1 + \left(\frac{Z_{vot}}{Z_{cct}} \right)}$$

$$X_{ot} = X_{cct} \cdot \frac{\left(\frac{Z_{vot}}{Z_{cct}} \right)}{1 + \left(\frac{Z_{vot}}{Z_{cct}} \right)}$$

$$Z_{ot} = Z_{cct} \cdot \frac{\left(\frac{Z_{vot}}{Z_{cct}} \right)}{1 + \left(\frac{Z_{vot}}{Z_{cct}} \right)}$$

Diversamente, se il trasformatore è collegato stella/stella (Yy) avremmo:

$$R_{ot} = R_{cct} \cdot \left(\frac{Z_{vot}}{Z_{cct}} \right)$$


$$X_{ot} = X_{cct} \cdot \left(\frac{Z_{vot}}{Z_{cct}} \right)$$

$$Z_{ot} = Z_{cct} \cdot \left(\frac{Z_{vot}}{Z_{cct}} \right)$$

7.11 Calcolo dei guasti

Con il calcolo dei guasti vengono determinate le correnti di cortocircuito minime e massime immediatamente a valle della protezione dell'utenza (inizio linea) e a valle dell'utenza (fondo linea).

Le condizioni in cui vengono determinate sono:

| | | |
|--|---|---------------------|
|  | ID Documento Committente H_054_FV_00016_BER | Pagina 25 / 35 |
| | | Numero Revisione |
| | | 00 |

- guasto trifase (simmetrico);
- guasto bifase (disimmetrico);
- guasto bifase-neutro (disimmetrico);
- guasto bifase-terra (disimmetrico);
- guasto fase terra (disimmetrico);
- guasto fase neutro (disimmetrico).

I parametri alle sequenze di ogni utenza vengono inizializzati da quelli corrispondenti dall'utenza a monte che, a loro volta, inizializzano i parametri della linea a valle.

Calcolo delle correnti massime di cortocircuito

Il calcolo delle correnti di cortocircuito massime viene condotto come descritto nella norma CEI EN 60909-0. Sono previste le seguenti condizioni generali:

- guasti con contributo della fornitura e dei generatori in regime di guasto sub-transitorio. Eventuale gestione della attenuazione della corrente per il guasto trifase 'vicino' alla sorgente.
- tensione di alimentazione nominale valutata con fattore di tensione C_{max} ;
- impedenza di guasto minima della rete, calcolata alla temperatura di 20°C.

La resistenza diretta, del conduttore di fase e di quello di protezione, viene riportata a 20 °C, partendo dalla resistenza data dalle tabelle UNEL 35023-2012 che può essere riferita a 70 o 90 °C a seconda dell'isolante, per cui esprimendola in mW risulta:

$$R_{dc} = \frac{R_c}{1000} \cdot \frac{L_c}{1000} \cdot \left(\frac{1}{1 + (\alpha \cdot \Delta T)} \right)$$

dove ΔT è 50 o 70 °C e $\alpha = 0.004$ a 20 °C.

Nota poi dalle stesse tabelle la reattanza a 50 Hz, se f è la frequenza d'esercizio, risulta:

$$X_{dc} = \frac{X_c}{1000} \cdot \frac{L_c}{1000} \cdot \frac{f}{50}$$

possiamo sommare queste ai parametri diretti dall'utenza a monte ottenendo così la impedenza di guasto minima a fine utenza.

Per le utenze in condotto in sbarre, le componenti della sequenza diretta sono:

$$R_{db} = \frac{R_b}{1000} \cdot \frac{L_b}{1000}$$

La reattanza è invece:

$$X_{db} = \frac{X_b}{1000} \cdot \frac{L_b}{1000} \cdot \frac{f}{50}$$

Per le utenze con impedenza nota, le componenti della sequenza diretta sono i valori stessi di resistenza e reattanza dell'impedenza.

Per quanto riguarda i parametri alla sequenza omopolare, occorre distinguere tra conduttore di neutro e conduttore di protezione.

Per il conduttore di neutro si ottengono da quelli diretti tramite le:

$$\begin{aligned} R_{0cN} &= R_{dc} + 3 \cdot R_{dcN} \\ X_{0cN} &= 3 \cdot X_{dc} \end{aligned}$$

Per il conduttore di protezione, invece, si ottiene:

$$\begin{aligned} R_{0cPE} &= R_{dc} + 3 \cdot R_{dcPE} \\ X_{0cPE} &= 3 \cdot X_{dc} \end{aligned}$$

dove le resistenze R_{dcN} e R_{dcPE} vengono calcolate come la R_{dc} .

Per le utenze in condotto in sbarre, le componenti della sequenza omopolare sono distinte tra conduttore di neutro e conduttore di protezione.

Per il conduttore di neutro si ha:

$$\begin{aligned} R_{0bN} &= R_{db} + 3 \cdot R_{dbN} \\ X_{0bN} &= 3 \cdot X_{db} \end{aligned}$$

Per il conduttore di protezione viene utilizzato il parametro di reattanza dell'anello di guasto fornito dai costruttori:

$$\begin{aligned} R_{0bPE} &= R_{db} + 3 \cdot R_{dbPE} \\ X_{0bPE} &= X_{db} + 3 \cdot (X_{b-ring} - X_{db}) \end{aligned}$$

I parametri di ogni utenza vengono sommati con i parametri, alla stessa sequenza, dall'utenza a monte, espressi in mW:

$$\begin{aligned} R_d &= R_{dc} + R_{d-up} \\ X_d &= X_{dc} + X_{d-up} \\ R_{0N} &= R_{0cN} + R_{0N-up} \\ X_{0N} &= X_{0cN} + X_{0N-up} \\ R_{0PE} &= R_{0cPE} + R_{0PE-up} \\ X_{0PE} &= X_{0cPE} + X_{0PE-up} \end{aligned}$$

Per le utenze in condotto in sbarre basta sostituire *sbarra* a *cavo*.

Ai valori totali vengono sommate anche le impedenze della fornitura.

Noti questi parametri vengono calcolate le impedenze (in mW) di guasto trifase:


$$Z_{kmin} = \sqrt{R_d^2 + X_d^2}$$

Fase neutro (se il neutro è distribuito):

$$Z_{k1Nmin} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{(2 \cdot R_d + R_{0N})^2 + (2 \cdot X_d + X_{0N})^2}$$

Fase terra:

$$Z_{k1PEmin} = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{(2 \cdot R_d + R_{0PE})^2 + (2 \cdot X_d + X_{0PE})^2}$$

| | | |
|--|---|---------------------|
|  | ID Documento Committente H_054_FV_00016_BER | Pagina 27 / 35 |
| | | Numero Revisione |
| | | 00 |

Da queste si ricavano le correnti di cortocircuito trifase I_{kmax} , fase neutro I_{k1Nmax} , fase terra $I_{k1PEmax}$ e bifase I_{k2max} espresse in kA:

$$I_{kmax} = \frac{V_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{kmin}}$$

$$I_{k1Nmax} = \frac{V_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{k1Nmin}}$$

$$I_{k1PEmax} = \frac{V_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{k1PEmin}}$$

$$I_{k2max} = \frac{V_n}{2 \cdot Z_{kmin}}$$

Infine, dai valori delle correnti massime di guasto si ricavano i valori di cresta delle correnti:

$$I_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{kmax}$$

$$I_{p1N} = k \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k1Nmax}$$

$$I_{p1PE} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k1PEmax}$$

$$I_{p2} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k2max}$$

dove:

$$\kappa \approx 1.02 + 0.98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R_d}{X_d}}$$

Calcolo della corrente di cresta per guasto trifase secondo la norma IEC 61363-1: Electrical installations of ships. Se richiesto, I_p può essere calcolato applicando il metodo semplificato della norma riportato al paragrafo 6.2.5 Neglecting short-circuit current decay. Esso prevede l'utilizzo di un coefficiente $k = 1.8$ che tiene conto della massima asimmetria della corrente dopo il primo semiperiodo di guasto.

Calcolo delle correnti minime di cortocircuito

Il calcolo delle correnti di cortocircuito minime viene condotto come descritto nella norma CEI EN 60909-0 par 7.1.2 per quanto riguarda:

- guasti con contributo della fornitura e dei generatori. Il contributo dei generatori è in regime permanente per i guasti trifasi 'vicini', mentre per i guasti 'lontani' o asimmetrici si considera il contributo subtransitorio;
- la tensione nominale viene moltiplicata per il fattore di tensione C_{min} , che può essere 0.95 se $C_{max} = 1.05$, oppure 0.90 se $C_{max} = 1.10$ (Tab. 1 della norma CEI EN 60909-0); in media e alta tensione il fattore C_{min} è pari a 1;

Per la temperatura dei conduttori si può scegliere tra:

- il rapporto Cenelec R064-003, per cui vengono determinate le resistenze alla temperatura limite

dell'isolante in servizio ordinario del cavo;

- la norma CEI EN 60909-0, che indica le temperature alla fine del guasto.

Le temperature sono riportate in relazione al tipo di isolamento del cavo, precisamente:

| Isolante | Cenelec R064-003 [°C] | CEI EN 60909-0 [°C] |
|-------------------|-----------------------|---------------------|
| PVC | 70 | 160 |
| G | 85 | 200 |
| G5/G7/G10/EPR | 90 | 250 |
| HEPR | 120 | 250 |
| serie L rivestito | 70 | 160 |
| serie L nudo | 105 | 160 |
| serie H rivestito | 70 | 160 |
| serie H nudo | 105 | 160 |

Tabella 4: Temperature dei conduttori

Da queste è possibile calcolare le resistenze alla sequenza diretta e omopolare alla temperatura relativa all'isolamento del cavo:

$$R_{d \max} = R_d \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

$$R_{0N \max} = R_{0N} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

$$R_{0PE \max} = R_{0PE} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

Queste, sommate alle resistenze a monte, danno le resistenze massime.

Valutate le impedenze mediante le stesse espressioni delle impedenze di guasto massime, si possono calcolare le correnti di cortocircuito trifase $I_{k1 \min}$ e fase terra, espresse in kA:

$$I_{k \min} = \frac{0.95 \cdot V_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{k \max}}$$

$$I_{k1N \min} = \frac{0.95 \cdot V_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{k1N \max}}$$

$$I_{k1PE \min} = \frac{0.95 \cdot V_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{k1PE \max}}$$

$$I_{k2 \min} = \frac{0.95 \cdot V_n}{2 \cdot Z_{k \max}}$$

Calcolo guasti bifase-neutro e bifase-terra

Riportiamo le formule utilizzate per il calcolo dei guasti. Chiamiamo con Z_d la impedenza diretta della rete, con Z_i l'impedenza inversa, e con Z_0 l'impedenza omopolare.

Nelle formule riportate in seguito, Z_0 corrisponde all'impedenza omopolare fase-neutro o fase-terra.

$$I_{k2} = \left| -j \cdot V_n \cdot \frac{\dot{Z}_0 - \alpha \cdot \dot{Z}_i}{\dot{Z}_d \cdot \dot{Z}_i + \dot{Z}_d \cdot \dot{Z}_0 + \dot{Z}_i \cdot \dot{Z}_0} \right|$$

e la corrente di picco:

$$I_{p2} = k \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k2\max}$$

7.12 Guasti monofasi a terra linee MT

Calcolo correnti omopolari a seguito di guasto fase-terra in circuiti di media-alta tensione.

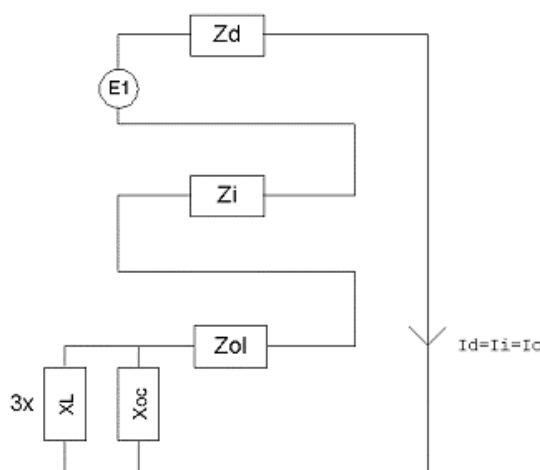
Il calcolo dei guasti a terra in reti di media e alta tensione coinvolge lo studio dell'effetto capacitivo della rete durante il regime di guasto.

Inoltre, le tecniche di determinazione delle linee guaste tramite relè varmetrici richiedono la conoscenza dei valori di corrente omopolare in funzione dei punti di guasto.

La nuova CEI 0-16 (e precedentemente la Enel DK5600), con l'introduzione del collegamento a terra del centro stella in media, richiede uno strumento per il dimensionamento della bobina di Petersen e il coordinamento delle protezioni degli utenti.

Per rispondere a tutte queste problematiche, Ampère Professional esegue il calcolo del regime di corrente omopolare a seguito di un guasto fase-terra.

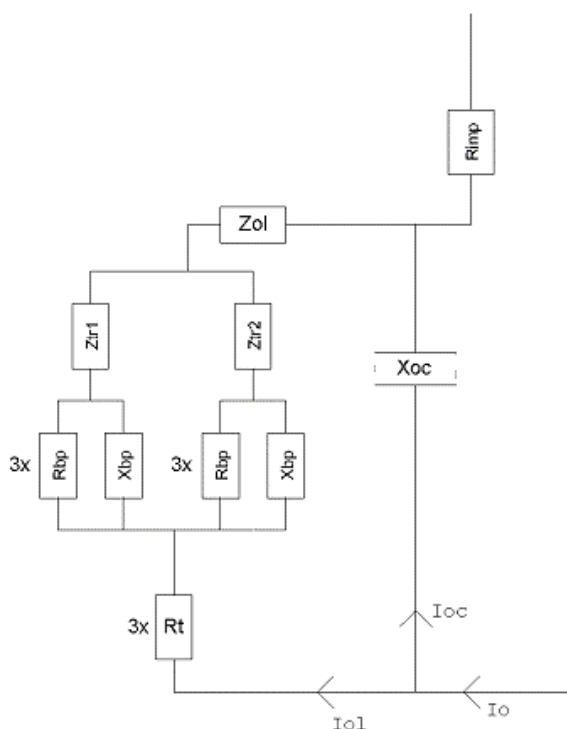
Il modello di calcolo delle correnti omopolari, seguendo la teoria delle sequenze dirette, inverse e omopolari, per un guasto fase-terra è il seguente:



Con Z_d e Z_i si intendono le impedenze alle sequenze diretta ed inversa.

Per il calcolo dell'impedenza omopolare occorre considerare più elementi (vedi figura in basso, esempio con due trasformatori in parallelo):

- Z_{ol} : impedenza omopolare del tratto di linea dal punto di guasto fino al trasformatore a monte;
- Z_{tr} : impedenza omopolare del trasformatore (vista a secondario);
- $Z_{bpet} = (R_{bp} + jX_{bp})$: impedenza bobina di Petersen, costituita da un resistore ed una induttanza in parallelo;
- R_t : resistenza di terra punto di collegamento a terra del centro stella del trasformatore;
- R_{imp} : resistenza per guasto a terra non franco;
- X_{oc} : reattanza capacitiva di tutta la rete appartenente alla stessa zona dell'utenza guasta e a valle dello stesso trasformatore.




Nota: il valore di X_{oc} è praticamente lo stesso per qualsiasi punto di guasto.

Riferimenti: Lezioni di Impianti elettrici di Antonio Paolucci (Dipartimento Energia Elettrica Università di Padova) e CEI 11-37.

Per calcolare con buona approssimazione la X_{oc} , si utilizzano le due formule:

$$I_g = \frac{3 \cdot E}{X_{oc}}$$

$$I_g = (0.003 \cdot L1 + 0.2 \cdot L2) \cdot V_{kV}$$

| | | |
|---|---|---------------------|
|  | ID Documento Committente H_054_FV_00016_BER | Pagina 31 / 35 |
| | | Numero Revisione |
| | | 00 |

dove I_g è la corrente di guasto a terra calcolata considerando la sola reattanza capacitiva nella prima formula, mentre nella seconda è riportato il suo valore se si è a conoscenza delle lunghezze (in km) di rete aerea $L1$ ed in cavo $L2$ della rete in media. V_{kv} è il valore di tensione nominale concatenata espressa in kV.

Uguagliando le due formule, ed esplicitando per X_{oc} si ottiene:

$$X_{oc} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^9}{(0.003 \cdot l1 + 0.2 \cdot l2)} \cdot \frac{f_0}{f}$$

con $l1$ e $l2$ espresse in metri, X_{oc} espressa in mohm, $f_0 = 50$ Hz e f la frequenza di lavoro.

Calcolata la corrente di guasto omopolare I_o , secondo lo schema riportato nella figura precedente, rispetto a tutti i punti di guasto (valle delle utenze), si deve calcolare come essa si ripartisce nella rete e quanta viene vista da ogni protezione omopolare 67N distribuita nella rete.

Per prima cosa la I_o va ripartita in due correnti: I_{oc} per la X_{oc} , l'altra (I_{ol}) per il centro stella del trasformatore attraverso la bobina di Petersen.

Poi, la I_{ol} viene suddivisa tra gli eventuali trasformatori in parallelo, proporzionalmente alla potenza. La I_{oc} , essendo la corrente capacitiva che si richiude attraverso le capacità della rete, va suddivisa tra le utenze in cavo o aeree in media proporzionalmente alla capacità di ognuna (condensatori in parallelo).


Per ora non si tiene conto dei fattori di riduzione relativi a funi di guardia delle linee elettriche aeree e degli schermi metallici dei cavi sotterranei.

Tali fattori determinerebbero una riduzione della corrente I_{oc} e I_{ol} in quanto esisterebbe una terza componente nella I_o che si richiude attraverso questi elementi.

7.13 Scelta delle protezioni

La scelta delle protezioni viene effettuata verificando le caratteristiche elettriche nominali delle condutture ed i valori di guasto; in particolare le grandezze che vengono verificate sono:

- corrente nominale, secondo cui si è dimensionata la conduttura;
- numero poli;
- tipo di protezione;
- tensione di impiego, pari alla tensione nominale dell'utenza;
- potere di interruzione, il cui valore dovrà essere superiore alla massima corrente di guasto a monte dell'utenza $I_{km\ max}$;
- taratura della corrente di sovracorrente, il cui valore deve provocare l'interruzione automatica del dispositivo di protezione, entro il tempo definito nella Tabella 41A della CEI 64-8 in funzione della tensione nominale U_o o entro i 5s per garantire la protezione contro i contatti indiretti.

| | | |
|---|---|---------------------|
|  | ID Documento Committente H_054_FV_00016_BER | Pagina 32 / 35 |
| | | Numero Revisione |
| | | 00 |

7.14 Verifica della protezione a cortocircuito delle condutture

Secondo la norma 64-8 par.434.3 "Caratteristiche dei dispositivi di protezione contro i cortocircuiti.", le caratteristiche delle apparecchiature di protezione contro i cortocircuiti devono soddisfare a due condizioni:

- il potere di interruzione non deve essere inferiore alla corrente di cortocircuito presunta nel punto di installazione (a meno di protezioni adeguate a monte);
- la caratteristica di intervento deve essere tale da impedire che la temperatura del cavo non oltrepassi, in condizioni di guasto in un punto qualsiasi, la massima consentita.

La prima condizione viene considerata in fase di scelta delle protezioni. La seconda invece può essere tradotta nella relazione:

$$I^2 \cdot t \leq K^2 S^2$$

ossia in caso di guasto l'energia specifica sopportabile dal cavo deve essere maggiore o uguale a quella lasciata passare dalla protezione.

La norma CEI al par. 533.3 "Scelta dei dispositivi di protezioni contro i cortocircuiti" prevede pertanto un confronto tra le correnti di guasto minima (a fondo linea) e massima (inizio linea) con i punti di intersezione tra le curve. Le condizioni sono pertanto:

- a) Le intersezioni sono due:
 - $I_{ccmin_inters_min}$ (quest'ultima riportata nella norma come I_a);
 - $I_{ccmax_inters_max}$ (quest'ultima riportata nella norma come I_b).
- b) L'intersezione è unica o la protezione è costituita da un fusibile:
 - $I_{ccmin_inters_min}$.
- c) L'intersezione è unica e la protezione comprende un magnetotermico:
 - $I_{cc\ max_inters_max}$.

Sono pertanto verificate le relazioni in corrispondenza del guasto, calcolato, minimo e massimo. Nel caso in cui le correnti di guasto escano dai limiti di esistenza della curva della protezione il controllo non viene eseguito.


Note:

- La rappresentazione della curva del cavo è una iperbole con asintoti $K^2 S^2$ e la I_z dello stesso.
- La verifica della protezione a cortocircuito eseguita dal programma consiste in una verifica qualitativa, in quanto le curve vengono inserite riprendendo i dati dai grafici di catalogo e non direttamente da dati di prova; la precisione con cui vengono rappresentate è relativa.

7.15 Verifica di selettività

E' verificata la selettività tra protezioni mediante la sovrapposizione delle curve di intervento. I dati forniti dalla sovrapposizione, oltre al grafico sono:

- Corrente I_a di intervento in corrispondenza ai massimi tempi di interruzione previsti dalla CEI 64-8: pertanto viene sempre data la corrente ai 5s (valido per le utenze di distribuzione o terminali fisse) e la corrente ad un tempo determinato tramite la tabella 41A della CEI 64.8 par 413.1.3. Fornendo una fascia di intervento delimitata da una caratteristica limite

| | | |
|---|---|---------------------|
|  | ID Documento Committente H_054_FV_00016_BER | Pagina 33 / 35 |
| | | Numero Revisione |
| | | 00 |

superiore e una caratteristica limite inferiore, il tempo di intervento viene dato in corrispondenza alla caratteristica limite inferiore. Tali dati sono forniti per la protezione a monte e per quella a valle;

- Tempo di intervento in corrispondenza della minima corrente di guasto alla fine dell'utenza a valle: minimo per la protezione a monte (determinato sulla caratteristica limite inferiore) e massimo per la protezione a valle (determinato sulla caratteristica limite superiore);
- Rapporto tra le correnti di intervento magnetico: delle protezioni;
- Corrente al limite di selettività: ossia il valore della corrente in corrispondenza all'intersezione tra la caratteristica limite superiore della protezione a valle e la caratteristica limite inferiore della protezione a monte (CEI 23.3 par 2.5.14).
- Selettività: viene indicato se la caratteristica della protezione a monte si colloca sopra alla caratteristica della protezione a valle (totale) o solo parzialmente (parziale a sovraccarico se l'intersezione tra le curve si ha nel tratto termico).
- Selettività cronometrica: con essa viene indicata la differenza tra i tempi di intervento delle protezioni in corrispondenza delle correnti di cortocircuito in cui è verificata.

Nelle valutazioni si deve tenere conto delle tolleranze sulle caratteristiche date dai costruttori.

Quando possibile, alla selettività grafica viene affiancata la selettività tabellare tramite i valori forniti dalle case costruttrici. I valori forniti corrispondono ai limiti di selettività in A relativi ad una coppia di protezioni poste una a monte dell'altra. La corrente di guasto minima a valle deve risultare inferiore a tale parametro per garantire la selettività.

7.16 Protezione contro i contatti indiretti

Secondo la norma 64-8 par. 413, un dispositivo di protezione deve interrompere automaticamente l'alimentazione per proteggere contro i contatti indiretti i circuiti e i componenti elettrici, in modo che, in caso di guasto, non possa persistere una tensione di contatto pericolosa per una persona.

E' definita la tensione di contatto limite convenzionale a 50 V in c.a. e 120 V in c.c. non ondulata, oltre la quale esiste pericolo. Tuttavia, in alcune circostanze, è possibile superare tale valore purché la protezione intervenga entro 5 secondi o tempi definiti dalla norma, a seconda del sistema elettrico adottato.


Sistemi TN-S

In questo sistema l'anello di guasto è costituito esclusivamente da elementi metallici, abbiamo un punto collegato direttamente a terra mentre le masse dell'impianto sono collegate a quel punto per mezzo del conduttore di protezione.

In questa tipologia di impianto elettrico, le funzioni di conduttore di protezione e di conduttore di neutro sono svolte da due conduttori distinti.

Come è noto dalle norme CEI 64/8 parte 4 l'impianto di terra ha lo scopo di proteggere le persone contro i contatti indiretti, ovvero contro i contatti con quelle masse metalliche normalmente non in tensione ma che, per un mal funzionamento dell'impianto, possono assumere un potenziale pericoloso.

Lo scopo principale dell'impianto di terra è quello di fare intervenire automaticamente le protezioni per interrompere l'alimentazione al circuito o al componente elettrico che lo stesso dispositivo protegge contro i contatti indiretti, in modo che, in caso di guasto, nel circuito o nel componente

| | | |
|---|---|---------------------|
|  | ID Documento Committente H_054_FV_00016_BER | Pagina 34 / 35 |
| | | Numero Revisione |
| | | 00 |

elettrico tra una parte attiva ed una massa o un conduttore di protezione, non possa persistere, per una durata sufficiente a causare un rischio di effetti fisiologici dannosi in una persona in contatto con parti simultaneamente accessibili, una tensione di contatto presunta superiore a 50 V_{c.a.} oppure a 120 V_{c.c.}. Si dovranno scegliere dei dispositivi di protezione che abbiano una corrente I_a tale da garantire il rispetto della seguente relazione:

$$Z_s * I_a \leq U_0$$

Dove:

- U₀ = tensione nominale in c.a. (valore efficace tra fase e terra);
- Z_s = impedenza dell'anello di guasto che comprende la sorgente, il conduttore attivo fino al punto di guasto ed il conduttore di protezione tra il punto di guasto e la sorgente;
- I_a = corrente che provoca l'interruzione automatica del dispositivo di protezione entro 0,4 secondi (Norma CEI 64-8/4 - Tabella 41A).

Si procede al calcolo delle sezioni minime che devono presentare i conduttori di terra, i conduttori di protezione e gli elementi costituenti i dispersori.

La sezione del dispersore deve essere calcolata in relazione all'entità e alla durata della corrente di guasto.

Le norme CEI definiscono inoltre le sezioni minime per presentare un'adeguata robustezza nei confronti della corrosione e delle sollecitazioni meccaniche.

Occorre quindi analizzare separatamente due casi:

- Dimensionamento del conduttore di terra per guasto lato BT;
- Dimensionamento del dispersore.

Sistemi IT


In questo sistema (per l'alimentazione bt dell'impianto fotovoltaico), la tensione di alimentazione non sia riferita a terra, mentre le masse sono collegate all'impianto di terra dell'utilizzatore. In caso di primo guasto a terra la corrente di guasto (I_g) si chiude attraverso le capacità verso terra dell'impianto, pertanto, la I_g verso terra risulterà essere di valore estremamente ridotto al punto da non determinare alcun intervento delle protezioni. Le tensioni di contatto originate assumeranno di conseguenza valori particolarmente bassi.

Ai fini della protezione dai contatti indiretti, secondo la norma CEI 64-8/4, non è necessaria l'interruzione automatica dell'impianto generatore, nella situazione di primo guasto a terra, purché venga verificata la relazione:

$$R_E * I_g \leq U_L$$

Dove:

- R_E = è la resistenza dell'impianto di terra al quale sono collegate le masse (in ohm)
- I_g = è la corrente di guasto (in Ampere) del primo guasto a terra di impedenza trascurabile tra un conduttore di linea e una massa; tale valore tiene conto delle correnti di dispersione e dell'impedenza totale verso terra dell'impianto elettrico ed è pari al limite inferiore della corrente d'intervento istantaneo dell'interruzione a protezione della linea;
- U_L = è la tensione limite sopportabile dal corpo umano per un tempo indefinito (50Vca).

| | | |
|---|---|---------------------|
|  | ID Documento Committente H_054_FV_00016_BER | Pagina 35 / 35 |
| | | Numero Revisione |
| | | 00 |

Va considerato infine che un primo guasto a terra non comporterà l'interruzione dell'impianto di generazione, ma la norma prescrive che esso venga prontamente segnalato tramite un dispositivo di controllo dell'isolamento che segnala la condizione anomala e dovrà essere conforme alla norma CEI EN 61557-8. Nel caso di secondo guasto a terra, quando le masse sono collettivamente interconnesse da un conduttore di protezione allo stesso sistema di terra, valgono condizioni analoghe a quelle relative al sistema TN e devono essere soddisfatte le seguenti condizioni se il conduttore di neutro non è distribuito nei sistemi a corrente alternata.

$$2 * I_a * Z_s \leq U$$

Dove:

- I_a = è la corrente, in Ampere, che provoca l'intervento automatico del dispositivo di protezione nei tempi indicati per i sistemi TN
- Z_s = è l'impedenza, in ohm, del circuito di guasto comprendente il conduttore di linea e il conduttore di protezione del circuito
- U = è la tensione, in c.a. oppure in c.c., in volt, tra conduttori di linea
- 2 = è il coefficiente che tiene conto della possibilità che, se due guasti si verificano contemporaneamente, possono esistere in circuiti diversi