

COMUNE DI PORTO MANTOVANO

PROVINCIA DI MANTOVA
REGIONE LOMBARDIA

PROGETTAZIONE DEFINITIVA

PER L'AMPLIAMENTO DELLA SEDE DI PORTO EMERGENZA

PROPONENTE

COMUNE DI PORTO MANTOVANO

Strada Statale Cisa, n°112 – 46047 Porto Mantovano (MN)

PROGETTISTA INCARICATO

ARCHITETTO VITTORIO DI TURI

Casale Setteventi, n° 95
15060 - Silvano d'Orba (AL)

PROGETTISTA SPECIALISTA

PER. IND. ANTONIO DANESI

STAIN Engineering S.r.l.
Viale Verona, n° 190/14
38123 - Trento (TN)

DATA

Marzo 2019

N. PROT.

REV.

OGGETTO

**RELAZIONE DI CALCOLO
IMPIANTI ELETTRICI E SPECIALI**

QbII.01

DOC. N.

**BOOK
3C.2**

INDICE

1. OGGETTO	2
2. SCOPO	2
3. PRINCIPALI NORME DI RIFERIMENTO	2
4. CRITERI GENERALI DI DIMENSIONAMENTO	6
4.1 CALCOLO DELLA CORRENTE D'IMPIEGO	7
4.2 DIMENSIONAMENTO DELLA PORTATA DEI CAVI DI DISTRIBUZIONE	8
4.3 VERIFICA DELLA CADUTA DI TENSIONE	9
4.4 CALCOLO DEL LIVELLO DI CORTOCIRCUITO SUI QUADRI	10
4.5 IPOTESI DI CALCOLO	11
4.6 IMPEDENZE DI SEQUENZA DEI PRINCIPALI COMPONENTI ELETTRICI	12
4.6.1.1 Impedenza di guasto equivalente della rete di alimentazione	12
4.6.1.2 Impedenza di guasto equivalente per i trasformatori di potenza	13
4.6.1.3 Impedenza di guasto equivalente delle linee in cavo	15
4.6.1.4 Cortocircuito Trifase	16
4.6.1.5 Cortocircuito Fase-Terra	16
4.6.1.6 Cortocircuito Bifase isolato	16
4.6.1.7 Cortocircuito Bifase a terra	16
4.7 VALORE DI PICCO DELLE CORRENTI DI CORTOCIRCUITO	17
4.8 COORDINAMENTO CAVO-INTERRUTTORE	17
4.8.1.1 Protezioni dai sovraccarichi	18
4.8.1.2 Protezioni dai cortocircuiti	18
5. DIMENSIONAMENTO DEI CONDUTTORI DI NEUTRO E DI PROTEZIONE	22
6. PROTEZIONE SELETTIVA DEGLI IMPIANTI	22

1. OGGETTO

Costituisce l'oggetto del presente documento le modalità di calcolo e i dimensionamenti degli impianti elettrici facenti parte degli interventi di realizzazione di Porto Emergenza nel comune di Porto Mantovano.

2. SCOPO

Il presente documento tecnico ha lo scopo di individuare i procedimenti di calcolo per il dimensionamento e la progettazione degli impianti elettrici in oggetto, atte a definire le taglie e le dimensioni dei principali componenti e apparecchiature facenti parte del sistema elettrico, che saranno la base portante per la stesura della documentazione di progetto esecutivo e da perseguire in fase realizzativa delle opere impiantistiche, in aderenza alle più moderne concezioni e in ossequio delle vigenti norme sugli impianti e della migliore tecnica dell'arte.

3. PRINCIPALI NORME DI RIFERIMENTO

Le principali normative tecniche di riferimento per il calcolo e il dimensionamento degli impianti sono di seguito riportate:

RIFERIMENTO	DESCRIZIONE
Legge 109/94	La nuova legge quadro in materia di lavori pubblici - Legge 11 febbraio 1994, n° 109, e successive modifiche ed integrazioni.
D.P.R. 412 30/08/00	Regolamento recante disposizioni integrative del decreto del Presidente della Repubblica 21 dicembre 1999, n° 554, concernente il regolamento di attuazione della legge quadro sui lavori pubblici.
D.M. 145 19/04/00	Regolamento recante il capitolato generale d'appalto dei lavori pubblici, ai sensi dell'articolo 3, comma 5, della legge 11 febbraio 1994, n° 109, e successive modificazioni.
Raccolta "R" Edizione 2009	Specificazioni tecniche applicative del Decreto Ministeriale 1 dicembre 1975.
CEI 0-16 2012- F.9404 Ed. II	Regola tecnica di riferimento per la connessione di Utenti attivi e passivi alle reti AT ed MT delle imprese distributrici di energia elettrica
CEI 64-8/1 2012 - Ed. VII	Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e a 1500 V in corrente continua Parte 1: Oggetto, scopo e principi fondamentali

CODICE ELABORATO

Codice commessa	Fase	Autore	Tipo doc.	WBS	Progr. doc.	Rev.
4 6 8 9	D	A D	R S		0 0 2	0

Pagina 3 di 23

RIFERIMENTO	DESCRIZIONE
CEI 64-8/2 2012 - Ed. VII	Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e a 1500 V in corrente continua Parte 2: Definizioni
CEI 64-8/3 2012 - Ed. VII	Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e a 1500 V in corrente continua Parte 3: Caratteristiche generali
CEI 64-8/4 2012 - Ed. VII	Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e a 1500 V in corrente continua Parte 4: Prescrizioni per la sicurezza
CEI 64-8/5 2012 - Ed. VII	Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e a 1500 V in corrente continua Parte 5: Scelta ed installazione dei componenti elettrici
CEI 64-8/6 2012 - Ed. VII	Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e a 1500 V in corrente continua Parte 6: Verifiche
CEI 64-8/7 2012 - Ed. VII	Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e a 1500 V in corrente continua. Parte 7: Ambienti ed applicazioni particolari
CEI 64-12 2009 Seconda Edizione	Guida per l'esecuzione dell'impianto di terra negli edifici per uso residenziale e terziario.
CEI 64-14 2007 Seconda Edizione	Guida alle verifiche degli impianti elettrici utilizzatori.
CEI 64-50 Anno 2007	Edilizia ad uso residenziale e terziario. Guida per l'integrazione degli impianti elettrici utilizzatori e per la predisposizione di impianti ausiliari, telefonici e di trasmissione dati.
CEI EN 61936-1 2011	Impianti elettrici con tensione superiore a 1 kV in c.a. Parte 1: Prescrizioni comuni.
CEI EN 50522 2011	Messa a terra degli impianti elettrici a tensione superiore a 1 kV in c.a..
CEI 11-17 2006 terza edizione	Impianti di produzione, trasmissione e distribuzione di energia elettrica. Linee in cavo.

RIFERIMENTO	DESCRIZIONE
CEI 11-35 Anno 2004	Guida per l'esecuzione di cabine elettriche MT/BT del cliente/utente finale.
CEI EN 61439-1 (CEI 17-113) Gennaio 2010	Apparecchiature assiemate di protezione e di manovra per bassa tensione (quadri BT). Parte1: Regole Generali
CEI EN 61439-2 (CEI 17-114) Gennaio 2010	Apparecchiature assiemate di protezione e di manovra per bassa tensione (quadri BT). Parte2: Quadri di Potenza
CEI 17-13/3 Anno 1997	Apparecchiature assiemate di protezione e di manovra per bassa tensione (quadri BT). Parte3: Prescrizioni particolari per apparecchiature assiemate di protezione e di manovra destinate ad essere installate in luoghi dove personale non addestrato ha accesso al loro uso - Quadri di distribuzione (ASD)
CEI 17-13/3;V1 Anno 2001	Apparecchiature assiemate di protezione e di manovra per bassa tensione (quadri BT). Parte3: : Prescrizioni particolari per apparecchiature assiemate di protezione e di manovra destinate ad essere installate in luoghi dove personale non addestrato ha accesso al loro uso - Quadri di distribuzione (ASD)
CEI 17-13/4 Anno 2005	Apparecchiature assiemate di protezione e di manovra per bassa tensione (quadri BT). Parte4 : Prescrizioni per apparecchiature assiemate per cantiere (ASC)
CEI 81-10/1 2013	Protezione delle strutture contro i fulmini. Parte 1: Principi Generali
CEI 81-10/2 2013	Protezione delle strutture contro i fulmini. Parte 2: Valutazione del rischio
CEI 81-10/3 2013	Protezione delle strutture contro i fulmini. Parte 3: Danno materiale alle strutture e pericolo per le persone
CEI 81-10/4 2013	Protezione delle strutture contro i fulmini. Parte 4: Impianti elettrici ed elettronici nelle strutture
CEI 81-3 2013	Valori medi del numero dei fulmini a terra per anno e per chilometro quadrato dei Comuni d'Italia, in ordine alfabetico
UNI EN 12464-1 Giugno 2011	Illuminazione dei posti di lavoro. Parte1 : Posti di lavoro in interni

RIFERIMENTO	DESCRIZIONE
UNI EN 9795 Gennaio 2010	Sistemi fissi automatici di rivelazione, di segnalazione manuale e di allarme incendio.
D.Lgs. n.81 del 09.04.08	Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro.
D.M. n.37 del 22.01.08	Riordino delle disposizioni in materia di attività di installazione degli impianti all'interno degli edifici
CEI 11-20 2000 IVa Ed	Impianti di produzione di energia elettrica e gruppi di continuità collegati a reti I e II categoria
CEI 11-25 2001 IIa Ed. (EC 909)	Correnti di cortocircuito nei sistemi trifasi in corrente alternata. Parte 0: Calcolo delle correnti
CEI 11-28 1998 la Ed. (IEC 781)	Guida d'applicazione per il calcolo delle correnti di cortocircuito nelle reti radiali e bassa tensione
CEI 17-5 VIIIa Ed. 2007	Apparecchiature a bassa tensione. Parte 2: Interruttori automatici
CEI 23-3/1 Anno 2004	Interruttori automatici per la protezione dalle sovracorrenti per impianti domestici e similari Parte1
CEI 23-3/1;V1 Anno 2006	Interruttori automatici per la protezione dalle sovracorrenti per impianti domestici e similari Parte1
CEI 23-3/2 Anno 2007	Interruttori automatici per la protezione dalle sovracorrenti per impianti domestici e similari Parte2
CEI 23-3/1;V2 Anno 2008	Interruttori automatici per la protezione dalle sovracorrenti per impianti domestici e similari Parte2
CEI 79-3 Anno 2012	Sistemi di allarme Prescrizioni particolari per gli impianti di allarme intrusione
IEC 364-5-523	Wiring system. Current-carring capacities
D.M. 19 Agosto 1996	Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio dei locali di intrattenimento e di pubblico spettacolo

RIFERIMENTO	DESCRIZIONE
L.R. n.17 27 Marzo 2000	Misure urgenti in tema di risparmio energetico ad uso di illuminazione esterna e di lotta all'inquinamento luminoso
D.G.R. n.7/6112 20 Settembre 2001	Criteri di applicazione della Lr 27 marzo 2000, n. 17 "Misure urgenti in tema di risparmio energetico ad uso di illuminazione esterna e di lotta all'inquinamento luminoso"

- normative e raccomandazioni dell'ISPESL e ULSS;
- norme e tabelle UNI e UNEL;
- raccomandazioni IEC, se applicabili;
- prescrizioni e raccomandazioni dell'ente distributore dell'energia elettrica;
- prescrizioni e raccomandazioni dell'ente fornitore del servizio telefonico;
- ogni altra prescrizione, normativa, regolamentazione e raccomandazione emanata da eventuali Enti ed applicabili agli impianti in oggetto.

Il rispetto delle norme sopra indicate è inteso nel senso più restrittivo, pertanto non solo la realizzazione delle opere relative ad attrezzature, apprestamenti e procedure esecutive sarà rispondente alle norme, ma anche i singoli materiali e manufatti dovranno essere uniformati alle norme stesse.

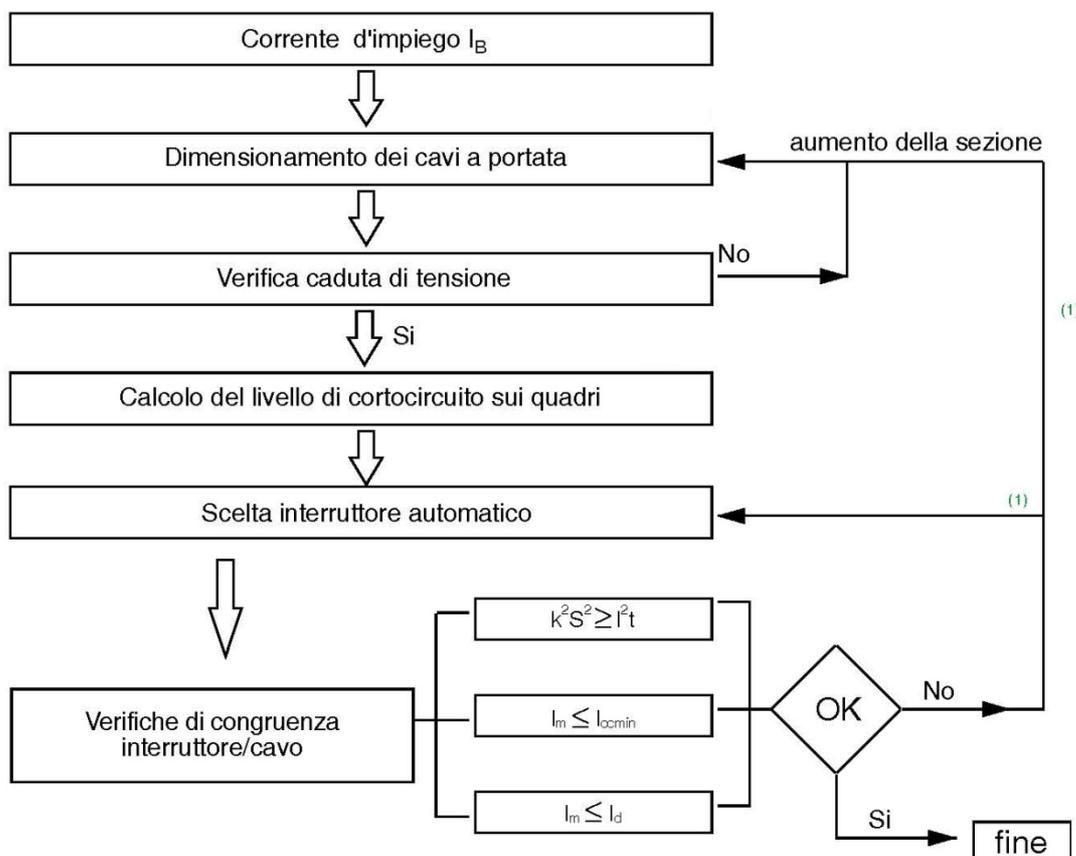
4. CRITERI GENERALI DI DIMENSIONAMENTO

La progettazione è stata realizzata considerando l'esigenza di continuità dell'esercizio e l'affidabilità degli impianti alimentati.
Le caratteristiche base cui risponde l'impostazione progettuale sono, in ordine di importanza:

- Sicurezza per le persone e per le installazioni;
- Disponibilità ed affidabilità impiantistiche;
- Semplicità di esercizio e facilità di manutenzione.

In questo paragrafo verrà esposto il metodo di calcolo utilizzato per il dimensionamento dei circuiti di distribuzione, procedure confacenti ad impianti elettrici utilizzatori con tensioni non superiori a 1000 V .

Lo sviluppo operativo di tali procedure è riportato graficamente di seguito:



(1) In caso di verifica negativa è generalmente possibile intervenire in alternativa sulla sezione del cavo oppure sul tipo di interruttore automatico.

Le verifiche dimensionali in funzione delle prescrizioni CEI 64-8 sono riportate in allegato schede calcoli elettrici.

4.1 Calcolo della corrente d'impiego

Il calcolo delle correnti d'impiego (I_B) verrà eseguito utilizzando la seguente formula:

$$I_B = \frac{P}{K \times V \cos \phi}$$

nella quale:

- $K = 1$ (sistema monofase); 1.73 (sistema trifase)
- $P =$ Potenza attiva assorbita
- $V =$ Tensione nominale dell'impianto al livello considerato
- $\cos \phi =$ Fattore di potenza

Per determinare il valore della potenza assorbita dal singolo circuito occorrerà svolgere un'analisi della potenza complessivamente installata, opportunamente declassata in base ai coefficienti di utilizzazione delle apparecchiature alimentate dal medesimo circuito e ad eventuali coefficienti di contemporaneità nel caso si trattasse di circuiti primari o secondari.

4.2 Dimensionamento della portata dei cavi di distribuzione

Il primo passo iterativo da svolgere per l'individuazione della sezione dei conduttori attivi dei circuiti di distribuzione, consiste nella verifica termica, cioè nello stabilire per il conduttore che lo realizza, una sezione adeguata a trasportare la corrente di impiego (IB), in regime permanente, in modo che la temperatura raggiungibile dall'isolante del cavo sia inferiore alla temperatura massima ammissibile.

Questa verifica scaturisce essenzialmente dal controllo del surriscaldamento, per effetto Joule, dei conduttori e dunque degli isolamenti.

A tal proposito le Norme CEI 64-8, stabiliscono, in base alla durata minima che si vuole garantire al cavo (fissata a 20 anni), le temperature limiti per i vari isolamenti (dedotte dalle curve sperimentali di Arrhenius):

Tipo di isolante	<u>Temperatura massima di servizio(°C)</u>
VC	7 0
EPR	9 0
Minerale(con guaina in PVC oppure nudo e accessibile)	7 0
Minerale(nudo e non accessibile e non in contatto con materiali combustibili)	10 5

In base alla temperatura massima di esercizio del cavo, si determina la massima corrente che può fluire in esso, definita come Portata. Il suo valore dipende da diversi fattori che contribuiscono alla dissipazione del calore, generato dal conduttore per effetto Joule verso l'ambiente esterno e dunque alla temperatura di regime assunta dall'isolamento.

Il valore della corrente massima ammissibile per ogni cavo (I_o) in condizioni di funzionamento normali dell'impianto è ricavabile sperimentalmente dalla relazione:

$$I_o = a S^b$$

Dove :

S : sezione del conduttore

a : coefficiente riportato nella tabella UNEL 35024-70

b : coefficiente che fino alla sezione di 240 mm², può essere assunto pari a 0.625

I valori della Portata dei cavi, in funzione del tipo di posa, si possono ricavare dalle tabelle CEI UNEL 35024 (posa in aria) e CEI UNEL 35026 (posa Interrata).

Le varie tipologie di posa applicabili nelle varie condizioni di esercizio sono indicate nella Norma CEI 64-8/5.

La portata determinata tramite calcolo o a mezzo delle tabelle va declassata in funzione di un coefficiente correttivo K_{tot} definito come prodotto dei coefficienti K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , ricavabili dalle stesse Norme CEI UNEL 35024 e 35026, inerenti:

- K_1 : Coefficiente correttivo per temperature di esercizio diverse da quelle standard d'installazione (30°C per la posa in aria e 20°C per la posa interrata);
- K_2 : Coefficiente correttivo per installazione di più circuiti affiancati e/o in più strati;
- K_3 : Coefficiente correttivo per profondità di posa differente da quella standard d'installazione (0.8m);
- K_4 : Coefficiente correttivo per Resistività del Terreno differenti da quelle standard d'installazione (1,5 K*m/W)

L'effettiva portata del cavo è deducibile dalla seguente relazione:

$$I_z = K_{tot} I_o$$

Chiaramente, affinché la verifica dia esito positivo deve essere riscontrata la condizione:

$$I_z \geq I_b$$

4.3 Verifica della caduta di tensione

Definite le condizioni di regime dell'impianto in relazione alla potenza assorbita dal singolo circuito ed alle condizioni ambientali, la determinazione della sezione utile dei cavi di distribuzione è funzione della massima caduta di tensione ammissibile sul tratto di linea che si sta dimensionando.

Le Norme CEI 64-8 raccomanda una caduta di tensione tra l'origine dell'impianto elettrico e qualunque utilizzatore non superiore al 4% della tensione nominale.

Il valore della caduta di tensione può essere determinato mediante la seguente formula:

$$\Delta V = K I_b L (R \cos \phi + X \sin \phi)$$

dove :

- I_b : Corrente d'impiego del cavo
- K : fattore di tensione pari a 2 nel sistema monofase e bifase e $\sqrt{3}$ nei sistemi trifase
- L : lunghezza della linea
- R : resistenza per unità di lunghezza del cavo alla temperatura di regime
- X : reattanza per unità di lunghezza del cavo alla frequenza di 50 Hz
- V : tensione nominale dell'impianto
- $\cos \phi$: fattore di potenza del carico

I valori di resistenza unitaria a 20°C e della reattanza dei cavi, per le diverse sezioni sono

ricavabili dalle tabelle CEI UNEL 35023-70.

La caduta di tensione sarà calcolata alla effettiva temperatura di funzionamento del cavo, ricavabile a mezzo della relazione:

$$\theta_0 = \frac{B(\theta_z - \theta_a) \times \left(\frac{IB}{I_z}\right)^2 + \theta_a \times (\theta_z + B)}{\theta_z + B - (\theta_z - \theta_a) \times \left(\frac{IB}{I_z}\right)^2}$$

dove:

- θ_0 : Temperatura effettiva di funzionamento
- θ_z : Temperatura massima di funzionamento
- θ_a : Temperatura ambiente
- IB: Corrente d'Impiego
- I_z : Portata del cavo

Il parametro B si determina dalla tabella sottostante:

Materiali Conduttori	$B=1/\alpha$ [°C]
Rame	234,5
Alluminio	228
Piombo	230
Acciaio	202
Bronzo	333,4
Acciaio inossidabile	202

Il calcolo viene eseguito ripartendo la caduta di tensione massima percentuale (pari a quella proposta dalle norme se non diversamente specificata), per i circuiti di distribuzione e i circuiti terminali. Il criterio di ripartizione tiene conto in genere di come la serie commerciale delle sezioni si infittisce nei valori minori e si allarga nei valori maggiori. La ripartizione va dunque effettuata assegnando una maggiore percentuale ai circuiti terminali (75-60%) e minore (25-40%) ai montanti.

Se la verifica ha esito negativo bisogna considerare la sezione commerciale successiva e ripetere il calcolo.

4.4 Calcolo del livello di cortocircuito sui quadri

Determinata la sezione in funzione della portata e caduta di tensione, si dovranno calcolare i livelli di cortocircuito nell'impianto elettrico.

La determinazione di questo parametro è fondamentale per i seguenti motivi:

- determinare il potere di interruzione dei dispositivi di protezione;
- individuare il giusto coordinamento interruttore-cavo;
- cablaggio dei quadri idonei a sopportare gli sforzi elettrodinamici causati dalle elevate correnti di guasto.

Per i motivi sopra elencati è buona regola fornire i livelli di cortocircuito sulle sbarre dei quadri di distribuzione dell'impianto.

4.5 Ipotesi di calcolo

Il calcolo delle sovracorrenti di cortocircuito verrà effettuato secondo alcune ipotesi di base, quali:

- Cortocircuito Franco (impedenza di guasto nulla);
- Passaggio per lo zero della tensione nell'istante di inizio del transitorio di cortocircuito;
- Si ritiene la rete lineare, cioè composta di elementi passivi (resistenze, induttanze, mutue induttanze) indipendenti dalle correnti e tensioni.
- Si trascurano le impedenze trasversali (Capacità e ammettenze)

Il parametro può assumere diversi valori in relazione alle condizioni di esercizio della rete e più precisamente:

- Si deve considerare che di fatto, durante il transitorio di c.to, la tensione di alimentazione varia rispetto al valore nominale di esercizio a causa delle inevitabili cadute di tensione sulle impedenze dell'impianto; questa condizione viene tenuta in conto tramite il fattore di tensione "c";
- L'impedenza Z_{cc} dell'anello di guasto è influenzata dalla temperatura;
- L'assetto dell'impianto può variare durante l'esercizio.

Appare evidente come in ogni punto dell'impianto si possano prevedere nella generalità dei casi un valore massimo ed un valore minimo per la corrente di cortocircuito.

Nel calcolo delle correnti minime di guasto, si deve tener conto delle condizioni seguenti:

- Il fattore di tensione "c" pari a 0.95.
- Bisogna scegliere la configurazione della rete e in alcuni casi, il contributo minimo delle sorgenti e delle linee di alimentazione della rete, che conducono al valore minimo della corrente di cortocircuito nel punto di guasto.
- Il contributo dei motori al cortocircuito deve essere trascurato
- Le resistenze vanno calcolate alla temperatura più elevata (Temperatura finale di C.to).

Viceversa per il contributo maggiore della corrente di cortocircuito, si valuterà:

- Il fattore di tensione "c" pari a 1.05
- Bisogna scegliere la configurazione della rete che conducono al valore massimo della corrente di cortocircuito nel punto di guasto.
- I motori non devono essere trascurati
- Le resistenze vanno calcolate alla temperatura di 20°C.

Per ricavare i valori di resistenza a temperature θ diverse da 20°C , si può sfruttare il principio di linearità della resistività in funzione della temperatura:

$$R(\theta) = \frac{\theta + B}{20 + B} \times R'_{(20)} [\Omega/\text{m}]$$

dove:

Materiali Conduttori	$B=1/\alpha$ [$^{\circ}\text{C}$]
Rame	234,5
Alluminio	228
Piombo	230
Acciaio	202
Bronzo	333,4
Acciaio inossidabile	202

Il calcolo delle correnti di cortocircuito simmetriche e non simmetriche sarà effettuato con il metodo delle componenti simmetriche, definendo per ogni componente elettrico facente parte della catena interessata dalle correnti di guasto, l'impedenze di sequenza diretta, inversa e omopolare.

4.6 Impedenze di sequenza dei principali componenti elettrici

4.6.1.1 Impedenza di guasto equivalente della rete di alimentazione

L'ente di Distribuzione fornisce generalmente alcuni parametri della rete di alimentazione quali la potenza iniziale simmetrica di cortocircuito (A_{cc}) o il valore della corrente iniziale di cortocircuito trifase (I_{cc}).

In base a tali valori possiamo ricavare l'impedenza equivalente di sequenza diretta e inversa della rete, pari in sostanza ad una reattanza e deducibile attraverso la seguente relazione:

$$Z_{dR} = Z_{iR} = \frac{c \times V_n^2}{A_{cc}} [\Omega]$$

$$Z_{dR} = Z_{iR} = \frac{c \times V_n}{\sqrt{3} I_{cc}} [\Omega]$$

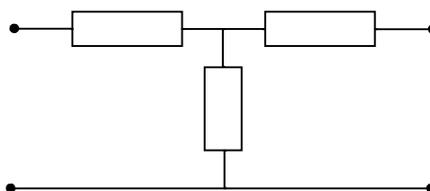
dove:

- Z_{dR} : Impedenza di sequenza diretta equivalente della rete [Ω]
- Z_{iR} : Impedenza di sequenza inversa equivalente della rete [Ω]
- A_{cc} : Potenza apparente di cortocircuito della rete nel punto di allaccio [VA]
- I_{cc} : Corrente iniziale di cortocircuito nel punto di allaccio [A]
- V_n : Tensione nominale (fase-fase) della rete [V]

4.6.1.2 Impedenza di guasto equivalente per i trasformatori di potenza

Il circuito di sequenza diretta e inversa di un trasformatore è riportata in figura:

SCHEMA EQUIVALENTE SEQUENZA DIRETTA - INVERSA



In gran parte dei casi notevoli di cortocircuito, l'impedenza di magnetizzazione del trasformatore (Z_{od}) è sempre trascurabile, e dunque l'impedenza diretta e inversa è pari all'impedenza di cortocircuito del trasformatore ($Z_1 + Z_2$), calcolabile secondo le seguenti relazioni:

$$Z_{dT} = Z_{iT} = \frac{V_{cc} \% \times V_{n2}}{100 \times A_n} [\Omega]$$

Dove:

- Z_{dT} : Impedenza di sequenza diretta equivalente del trasformatore [Ω]
- Z_{iT} : Impedenza di sequenza inversa equivalente del trasformatore [Ω]
- $V_{cc}\%$: Tensione di cortocircuito percentuale del trasformatore
- A_n : Potenza apparente del trasformatore [VA]
- V_n : Tensione Nominale primaria o secondaria del trasformatori [V]

Tramite le caratteristiche di targa del trasformatore si può determinare la resistenza di sequenza diretta e inversa totale degli avvolgimenti, pari a:

$$R_{dT} = R_{iT} = \frac{P_{RT}}{3 \times I_{nT}}$$

Dove:

- R_{dT} : Resistenza di sequenza diretta equivalente del trasformatore [Ω]
- R_{iT} : Resistenza di sequenza inversa equivalente del trasformatore [Ω]
- P_{RT} : Perdite totali degli avvolgimenti del trasformatore alla corrente nominale [W]
- I_{nT} : Corrente Nominale primaria o secondaria del trasformatore [A]

Le perdite massime e minime totali dei trasformatori sono dei valori di targa del macchinario e forniti dal Costruttore.

La reattanza di sequenza diretta e inversa è deducibile in relazione ai due parametri individuati precedentemente:

$$X_{dT} = X_{iT} = \sqrt{(Z_{dT}^2 - R_{dT}^2)} [\Omega]$$

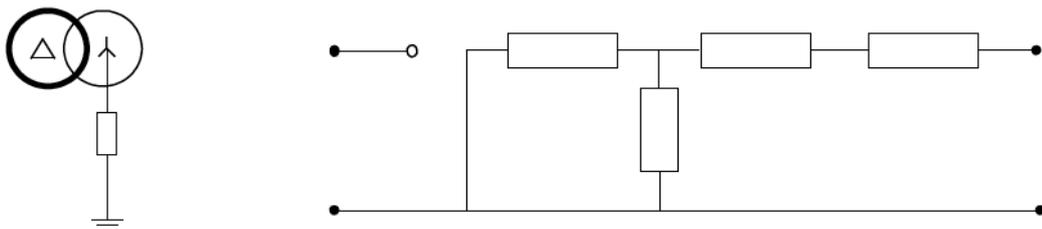
Dove:

- X_{dT} : Reattanza di sequenza diretta equivalente del trasformatore [Ω]
- X_{iT} : Reattanza di sequenza inversa equivalente del trasformatore [Ω]

L'impedenza di sequenza omopolare di un trasformatore di distribuzione MT/BT, è funzione del collegamento degli avvolgimenti primari e secondari. Negli impianti BT i trasformatori sono eserciti in configurazione Dyn **Trasformatore Dyn**

Per questo tipo di macchine il circuito di sequenza da considerare è il seguente:

TRASFORMATORE



Dove:

- Z_1 - Z_2 : Impedenza primaria e secondaria di cortocircuito del trasformatore i cui valori sono riportati al livello di tensione desiderato (lato MT o BT)
- Z_0 : Impedenza di magnetizzazione
- $3Z$: Impedenza di collegamento a terra (pari a zero per collegamento franco a terra)

Con buona approssimazione, essendo $Z_0 \gg Z_1$, l'impedenza omopolare a valle del trasformatore è pari a:

$$Z_{0T} = Z_1 + Z_2 + 3Z =$$

$$Z_{dT} + 3Z$$

Da cui:

$$R_{oT} = R_{dT} + 3R$$

$$X_{oT} = X_{dT} + 3X$$

Dove:

- R: Resistenza di connessione a terra del neutro
- X: Reattanza di connessione a terra del neutro

4.6.1.3 Impedenza di guasto equivalente delle linee in cavo

Il circuito equivalente di sequenza diretta, inversa e omopolare per una linea in cavo è riportato nella figura sottostante:



Nelle Linee in bassa Tensione le capacità verso terra posso essere tranquillamente trascurate, da cui:

$$R_{d(max)} = R_{i(max)}$$

$$= R_{(\theta_{cc})} \quad R_{d(min)} =$$

$$R_{i(min)} = R_{(20\text{ °C})}$$

$$X_d = X_i = X_{(50\text{ Hz})}$$

Le resistenze unitarie a 20°C ($R_{(20\text{ °C})}$) e le reattanze dei cavi ($X_{(50\text{ Hz})}$) possono essere determinate a mezzo delle tabelle CEI UNEL 35023-70.

Per il calcolo dei parametro omopolari, l'impedenza è funzione del circuito di guasto, o meglio nel cavo di richiusura delle correnti di guasto (cioè si dovrà distinguere tra richiusura sul cavo di neutro o sul cavo di protezione):

Richiusura delle correnti di guasto sul Neutro (C.to Fase-Neutro):

$$R_{0(max)} = R_{(\theta_{cc})} +$$

$$3R_{(\text{Neutro} - \theta_{cc})} \quad R_{0(min)} =$$

$$R_{(20\text{ °C})} + 3R_{(\text{Neutro } 20\text{ °C})}$$

$$X_0 = 3X_{(50\text{ Hz})}$$

Richiusura delle correnti di guasto sul Conduttore di Protezione (C.to Fase-PE):

$$R_{0(max)} = R_{(\theta_{cc})} +$$

$$3R_{(\text{PE} - \theta_{cc})}$$

$$R_{0(\min)} = R_{(20^{\circ}\text{C})} + 3R_{(\text{PE} - 20^{\circ}\text{C})}$$

$$X_0 = 3X_{(50\text{ Hz})}$$

Ricaviamo le espressioni di calcolo da utilizzare per determinare le sovracorrenti dovute ai casi più interessanti di cortocircuito, correnti queste chiaramente presunte e in valore efficace.

4.6.1.4 Cortocircuito Trifase

Il valore della corrente simmetrica trifase di cortocircuito è data da:

$$I_{cc(F3)} = \frac{cV_n}{\sqrt{3} \times Z_d}$$

dove:

- Z_d : impedenza di sequenza diretta complessiva vista nel punto di guasto

4.6.1.5 Cortocircuito Fase-Terra

La formula di calcolo della corrente di cortocircuito monofase a terra è la seguente:

$$I_{cc} = \frac{3 \times V_n^2}{\sqrt{(R_d + R_i + R_o) + (X_d + X_i + X_o)}}$$

dove:

- R_d : Resistenza di sequenza Diretta complessiva vista nel punto di guasto;
- R_i : Resistenza di sequenza Inversa complessiva vista nel punto di guasto;
- R_o : Resistenza di sequenza Omopolare complessiva vista nel punto di guasto;

4.6.1.6 Cortocircuito Bifase isolato

Il valore della corrente di cortocircuito bifase isolato può essere ricavata in relazione al valore della corrente di cortocircuito trifase secondo la seguente relazione:

$$I_{cc(F2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{cc(F3)}$$

4.6.1.7 Cortocircuito Bifase a terra

La corrente di cortocircuito che circola a terra o nei conduttori di terra si calcola, con la seguente formula:

$$I_{cc(F2)_{tot}} = \frac{cV_n \sqrt{3}}{|Z_d + 2Z_o|}$$

4.7 Valore di picco delle correnti di cortocircuito

L'andamento della corrente di cortocircuito nel tempo deriva dalla somma istantanea di una componente simmetrica sinusoidale e di una componente transitoria aperiodica smorzata che si sviluppa all'inizio del transitorio.

Nella pratica di esercizio, per il dimensionamento degli apparati dell'impianto, è interessante conoscere il valore efficace della componente simmetrica in corrente alternata e il valore di cresta al manifestarsi del cortocircuito.

L'andamento transitorio delle correnti di cortocircuito è conseguenza del circuito equivalente L-R di cortocircuito che si viene a generare nell'istante di avvenuto guasto; considerando una tensione di alimentazione concatenata sinusoidale con l'espressione classica

$$v(t) = \sqrt{2}V_n \sin(\omega t)$$

si ricava l'espressione analitica istantanea della corrente di guasto:

$$i_{cc}(t) = \sqrt{2}I_{cc} \left[\sin(\omega t - \varphi_{cc}) + e^{-\frac{t}{T_{cc}}} \sin(\varphi_{cc}) \right]$$

dove:

- I_{cc} : Valore efficace della componente simmetrica di cortocircuito

$$\varphi_{cc} = \arctg \left[\frac{X_{cc}}{R_{cc}} \right]$$

- φ_{cc} : Angolo di fase cortocircuito

$$T_{cc} = \frac{L_{cc}}{R_{cc}}$$

- T_{cc} : Costante di tempo del transitorio di cortocircuito;
- X_{cc} : Reattanza vista dal punto di guasto
- L_{cc} : Induttanza vista dal punto di guasto
- R_{cc} : Resistenza vista dal punto di guasto

Con semplici passaggi analitici si può ricavare l'istante in cui si determina il picco di corrente, pari a:

$$t_p = \frac{1}{\omega} \left(\frac{\pi}{2} + \varphi_{cc} \right)$$

In conclusione la corrente di picco I_p , espressa in relazione alla componente simmetrica I_{cc} , è pari a:

$$h = \frac{I_p}{I_{cc}} = \sqrt{2} \left[1 + e^{-\omega T_{cc} \sin(\frac{\pi}{2} + \varphi_{cc})} \sin(\varphi_{cc}) \right] \cong 1,02 + 0,56 e^{-\frac{R_{cc}}{X_{cc}}}$$

4.8 Coordinamento cavo-interruttore

Una volta definita la sezione dei cavi e le sovracorrenti presumibili in un circuito di distribuzione, occorre predisporre per la sua protezione un idoneo dispositivo.

4.8.1.1 Protezioni dai sovraccarichi

Per definire i criteri di coordinamento tra il dispositivo di protezione a monte e il cavo di distribuzione per la protezione dai sovraccarichi, si dovrà considerare per ogni circuito:

- Corrente d'impiego I_b
- La sua Portata I_z del cavo
- Corrente nominale I_n dell'interruttore
- Corrente convenzionale di funzionamento (o fusione) I_f

La condizione base per assicurare la protezione contro i sovraccarichi è quella di installare sul circuito un dispositivo di protezione di corrente nominale inferiore alla portata del cavo. Per evitare scatti intempestivi è poi necessario che la corrente nominale della protezione sia uguale o superiore alla corrente d'impiego. Si può quindi scrivere :

$$I_b \leq I_n \leq I_z$$

4.8.1.2 Protezioni dai cortocircuiti

Analogamente a quanto fatto per i sovraccarichi, per definire i criteri di coordinamento tra protezione e condutture in caso di funzionamento anomalo dell'impianto in regime di cortocircuiti, si dovranno considerare i seguenti parametri:

- Corrente di Cortocircuito massimo inizio line ($I_{cc(max)}$)
- Corrente di Cortocircuito minimo fondo line ($I_{cc(min)}$)
- Energia specifica passante (K^2S^2) relativa al cavo di sezione S
- Corrente d'intervento del dispositivo di protezione, pari all'intervento magnetico per interruttori magnetotermico (I_m), e alla seconda soglia d'intervento per relè di protezione elettronica ($I_{>>}$).
- Potere d'interruzione I_{pi}

La corretta scelta per la protezione globale del circuito in presenza di sovracorrenti di cortocircuito consiste essenzialmente nell'adozione di un dispositivo di protezione che presenti un potere di interruzione superiore alla corrente massima di cortocircuito presunta nel punto di installazione e che non lasci passare una energia specifica superiore al valore K^2S^2 tollerato dal cavo.

Il tutto si riassume nelle due condizioni sotto riportate:

1. $I_{pi} > I_{cc(max)}$

2. $I_{cc}^2 t_i \leq K^2S^2$

Nei sistemi di distribuzione di tipo TN-S, la protezione dai contatti indiretti è spesso affidata all'intervento istantaneo della protezione magnetotermica (si può evitare l'utilizzo di interruttori differenziali). La corrente di guasto a terra deve essere

interrotta in un tempo che sia inferiore ai limiti indicati dalla Norma CEI 64-8/4, di seguito riportati:

Tensione nominale , efficace tra Fase-Terra (Uo) | Tempo d'interruzione (s)

Tensione nominale , efficace tra Fase-Terra (Uo)	Tempo d'interruzione (s)
120	0,8
230	0,4
400	0,2
>400	0,1

L'intervento magnetico istantaneo assicura la protezione nei tempi previsti; si possono sempre utilizzare protezioni con soglie ritardate e/o termiche inverse, verificando che i tempi di interruzione non siano comunque superiori a 0.4s per gli impianti trifase.

Nel caso in cui la corrente di guasto sia interrotta dalla protezione termica (in accordo alla Norma CEI 64-8/4 art. 435.1), oltre a verificare il corretto coordinamento per la protezione dai contatti indiretti, si dovrà verificare comunque la condizione 2 per la protezione dei cavi.

L'ultima relazione è da considerarsi accettabile per il coordinamento Cavo - dispositivo di protezione, se il regime transitorio di cortocircuito non superi più di 5 secondi (tale da valutare la dissipazione come fenomeno adiabatico).

Il valore del fattore K è funzione sia del tipo di isolante che del materiale costituente il conduttore del cavo e può essere calcolato secondo la relazione:

$$K = \sqrt{\frac{Q_c (E + 2I)}{I_{20}} \ln \left(1 + \frac{I_f - I_0}{E + I_0} \right)}$$

dove:

- Qc: calore specifico medio del materiale conduttore riferito all'unità di volume, espresso in [J/(°C mm³)];
- B: l'inverso del coefficiente di temperatura della resistività a 0°C del conduttore espresso in °C;
- f: Temperatura finale del conduttore in cortocircuito;
- o: Temperatura iniziale del conduttore in cortocircuito p20: Resistività del materiale a 20 °C

Materiali	α [°C]	Q_c [J/(°C mm ³)]	$B=1/\alpha$ [°C]	ρ_0 [Ωmm]	z_0 [Ωmm]
Rame	4.25 10 ⁻³	3.45 10 ⁻³	235	15.89 10 ⁻⁶	17.241 10 ⁻⁶
Alluminio	4.38 10 ⁻³	2.50 10 ⁻³	228	25.98 10 ⁻⁶	28.264 10 ⁻⁶
Piombo	4.34 10 ⁻³	1.45 10 ⁻³	230	196.88 10 ⁻⁶	214 10 ⁻⁶
Acciaio	4.95 10 ⁻³	3.80 10 ⁻³	202	125.56 10 ⁻⁶	138 10 ⁻⁶

I valori dei parametri sopra riportati possono essere assunti pari a quelli suggeriti dalle Norme CEI 64-8 riportati nella tabella a seguire:

Per la determinazione della tenuta di cortocircuito vengono assunti per la temperatura iniziale e finale

del conduttore i seguenti valori:

Isolamenti	θ_0 [°C]	θ_f [°C]
PVC	70	160
Gomma naturale	60	200
Gomma butilica	85	220
EPR	85	250

Per isolamenti classici dei conduttori si possono in definitiva assumere i valori proposti dalle Norme CEI 64-8 riassunti nella tabella sottostante:

K	UNIPOLARI			MULTIPOLARI			ARMATI			CONDUTTORI NUDI		
	PVC	EPR	G2	PVC	EPR	G2	PVC	EPR	G2	PVC	EPR	G2
RAME	143 166		176	115 135		143	122 140		149	228	159	138
ALLUMINIO	95 110		116	76 89		94	79 90		96	125	105	91
FERRO										82	58	50
PIOMBO	52		64				22 19		19			

L'energia specifica passante (Icc2 ti) è facilmente calcolabile se il tempo d'interruzione è superiore a 0.1s, in quanto per Icc si può considerare la corrente di cortocircuito a regime. Nelle applicazioni reali i tempi d'intervento sono molto inferiori agli 0.1s e ciò complica notevolmente la valutazione dell'energia specifica passante.

Gli interruttori in BT automatici magnetotermici si possono classificare in rapporto al tempo di prearco in tre categorie:

- Interruttori lenti;
- Interruttori rapidi;
- Interruttori limitatori;

Il tempo di prearco è quello che intercorre dall'istante di inizio della sovracorrente al distacco dei contatti, mentre il tempo d'arco (t_a) è quello che intercorre da quell'istante fino all'estinzione; la loro somma dà il tempo di intervento: $t_i = t_p + t_a$.



Valori tipici del tempo di prearco per le tre tipologie d'interruttori sono riportate nella tabella a seguire:

TIPO DI INTERRUPTORE TEMPO DI PREARCO MASSIMI [ms]

LENTI	100
RAPIDI	3
LIMITATORI	1

Gli interruttori, specialmente quelli "rapidi" e "limitatori", interrompono la corrente di guasto prima che questa raggiunga il valore di cresta presunto, cioè limitano la corrente di cortocircuito dal 20 al 40% il valore effettivo.

L'energia specifica passante può essere ricavata solo con le curve fornite dal costruttore. In fase esecutiva la verifica dimensionale del perfetto cordinamento Cavo-interruttore dovrà essere rielaborata utilizzando le curve di limitazioni reali degli interruttori effettivamente utilizzati ed installati nell'impianto.

5. DIMENSIONAMENTO DEI CONDUTTORI DI NEUTRO E DI PROTEZIONE

La norma CEI 64-8 prevede che la sezione del conduttore di neutro, nel caso di circuiti polifasi, possa essere 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 25mm² se il conduttore è in alluminio.

Nel caso in cui si abbiano circuiti monofasi o polifasi e questi ultimi con sezioni del conduttore di fase minori di 16 mm² se conduttore in rame e 25 mm² se conduttore in alluminio, il conduttore di neutro deve avere la stessa sezione del conduttore di fase.

Le Norme CEI 64-8 impongono dunque dei vincoli alla scelta della sezione del conduttore di neutro, come riportato di seguito:

$$S_f < 16 \text{ mm}^2 \Rightarrow S_n = S_f$$

$$16 \leq S_f \leq 35 \text{ mm}^2 \Rightarrow S_n = 16 \text{ mm}^2$$

$$S_f > 35 \text{ mm}^2 \Rightarrow S_n = S_f / 2$$

per il conduttore di protezione le Norme CEI 64-8 prevedono due metodi di dimensionamento:

1. determinazione in relazione alla sezione di fase;
2. determinazione mediante calcolo e verifica dell'energia specifica passante

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

$$S_f < 16 \text{ mm}^2 \Rightarrow S_n = S_f$$

$$16 \leq S_f \leq 35 \text{ mm}^2 \Rightarrow S_n = 16 \text{ mm}^2$$

$$S_f > 35 \text{ mm}^2 \Rightarrow S_n = S_f / 2$$

Il secondo determina tale valore con l'integrale di Joule, cioè verifica la condizione:

$$I_g^2 t_i \leq K^2 S^2$$

dove con I_g si è indicato la corrente di guasto a terra.

6. PROTEZIONE SELETTIVA DEGLI IMPIANTI

In considerazione del fatto che ogni circuito primario o secondario, in genere, deve essere singolarmente protetto che d'altra parte si richiede sempre più la massima continuità d'esercizio agli impianti, diventa necessario curare la selettività d'intervento dei vari dispositivi di protezione che in ogni distributore radiale vengono a trovarsi in cascata sull'anello di guasto.

La selettività è realizzata se tutti i guasti che si verificano in un punto qualunque

Codice commessa	Fase	Autore	Tipo doc.	WBS	Progr. doc.	Rev.
4 6 8 9	D	A D	R S		0 0 2	0

dell'impianto sono eliminati dall'interruttore posto immediatamente a monte del guasto e da lui solo. La selettività è totale se la condizione detta è soddisfatta per tutti i valori di sovracorrente inferiori o uguali al massimo valore della corrente di cortocircuito nel punto considerato. In caso contrario si tratta di selettività parziale o limitata.

La scelta dei dispositivi adatti a costituire una protezione selettiva deve essere attuata in base ai seguenti criteri fondamentali:

- Devono avere caratteristiche d'intervento documentate e costanti nel tempo.

Si deve ricorrere, di preferenza, a dispositivi di un solo costruttore in modo che eventuali particolari di funzionamento si manifestino per tutta la fornitura nello stesso senso.

La selettività scalare o cronometrica è la selettività per eccellenza. In questo specifico caso la protezione selettiva si ottiene per mezzo dell'apertura ritardata dei suoi interruttori secondo una successione scalare dei tempi d'intervento.