

**UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA**

**DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI  
INDUSTRIALI (DTG)**

---

**TESI DI LAUREA TRIENNALE  
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCATRONICA**

**“VALUTAZIONE DELLA TENUTA AL CORTOCIRCUITO DI  
QUADRI ELETTRICI MEDIANTE CALCOLO”**

**Relatore: Prof. Diego Dainese**

**Laureando: Andrea Zanussi**

**ANNO ACCADEMICO 2022 – 2023**

**Data di laurea 24/03/2023**



# Indice

## Introduzione

1. Richiami teorici
  - 1.1. Campo magnetico prodotto da una corrente
    - 1.1.1. Legge di Ampère-Laplace
    - 1.1.2. Campo magnetico prodotto da un filo rettilineo percorso da corrente
    - 1.1.3. Legge di Ampère
  - 1.2. Forza magnetica
    - 1.2.1. Forza di Lorentz
    - 1.2.2. Seconda legge elementare di Laplace
    - 1.2.3. Forza su conduttori rettilinei filiformi
  - 1.3. Calcolo delle tensioni interne
    - 1.3.1. Calcolo delle tensioni dovute a momento flettente
    - 1.3.2. Calcolo delle tensioni dovute a taglio
    - 1.3.3. Criterio tensionale di von Mises
  
2. Normativa quadri bassa tensione EN IEC 61439-1:2021
  - 2.1. Requisiti costruttivi
  - 2.2. Verifiche di progetto
    - 2.2.1. Tenuta al cortocircuito
    - 2.2.2. Circuiti di apparecchi esentati dalla verifica
    - 2.2.3. Confronto con i progetti di riferimento utilizzando una tabella
    - 2.2.4. Confronto con i progetti di riferimento tramite calcoli
    - 2.2.5. Verifica tramite prova
      - 2.2.5.1. Circuiti in uscita
      - 2.2.5.2. Circuito in entrata e barre principali
      - 2.2.5.3. Collegamenti all'alimentazione delle unità in uscita
      - 2.2.5.4. Conduttore di neutro
      - 2.2.5.5. Valore e durata della corrente di cortocircuito
      - 2.2.5.6. Risultati da ottenere a seguito della corrente di guasto
      - 2.2.5.7. Prove sui circuiti di protezione
      - 2.2.5.8. Risultati da ottenere sui circuiti di protezione
  - 2.3. Allegato A
  - 2.4. Allegato B
  - 2.5. Allegato C
  
3. Normativa sulle sollecitazioni elettrodinamiche EN 60865-1:2012
  - 3.1. Conduttori rigidi
    - 3.1.1. Calcolo delle forze
    - 3.1.2. Distanza effettiva tra i conduttori principali e tra i subconduttori
    - 3.1.3. Calcolo della massima tensione interna
  - 3.2. Conduttori flessibili
    - 3.2.1. Calcolo della forza di trazione statica
    - 3.2.2. Calcolo della forza di trazione causata da impatto
    - 3.2.3. Calcolo del carico strutturale a seguito dei conduttori flessibili

4. Programma di calcolo degli sforzi elettrodinamici
  - 4.1. Considerazioni, ipotesi e scelta dei parametri
  - 4.2. Esempi applicati
    - 4.2.1. Sistema di distribuzione principale a singola barra per fase
    - 4.2.2. Sistema di distribuzione con la presenza di subconduttori
    - 4.2.3. Sistema di distribuzione con conduttori flessibili

Bibliografia

# Sommario

La seguente tesi ha lo scopo di illustrare la verifica alla tenuta dei fenomeni dovuti al cortocircuito dei conduttori (barre rigide e conduttori flessibili) di un quadro elettrico in bassa tensione, mediante un software applicativo Excel. Tale calcolo viene di norma eseguito considerando le correnti di cortocircuito che, essendo molto più elevate della nominale, producono la massima forza elettrodinamica.

Per verifica s'intende l'insieme di operazioni mediante le quali si vuole comprovare la validità del quadro elettrico alla norma, in particolare, vengono utilizzate al supporto di tale valutazione i procedimenti riportati nelle norme EN IEC 61439-1 e EN 60865-1.

Vengono inoltre riportati due esempi applicativi, in cui si prende in considerazione nel primo caso un quadro avente come conduttori principali barre rigide, mentre nel secondo conduttori flessibili.

La trattazione si presta come un'analisi delle norme internazionali, benché essa non si vuole ergere come una sostituzione di esse, in quanto viene analizzata solo una parte specifica di esse. Perciò in nessun caso l'autore potrà essere ritenuto responsabile di qualsiasi tipo di danno derivante da eventuali errori, imprecisioni, inesattezze od omissioni contenute nella tesi.



# **CAPITOLO 1**

# 1. Richiami teorici

## 1.1 Campo magnetico prodotto da una corrente

Da esperimenti, eseguiti su conduttori percorsi da corrente, si è osservato che in essi agiscono delle forze repulsive o attrattive. Queste sono state giustificate assumendo che una corrente produca effetti a distanza, esprimibili per mezzo di un campo vettoriale, chiamato campo magnetico indicato con  $B$  e si misura in Tesla  $[T]$ .

### 1.1.1 Legge di Ampère-Laplace

Dopo anni di sperimentazioni, si ottenne un'espressione generale per calcolare il campo magnetico prodotto da una spira di corrente chiusa di forma qualsiasi. Questa espressione, detta legge di Ampère-Laplace è:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} I \oint \frac{u_T \times u_r}{r^2} dl$$

dove

$\mu_0$  Permeabilità del vuoto  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[ \frac{T \cdot m}{A} \right]$

$I$  Corrente che circola nella spira

L'integrale è lungo la linea chiusa della spira di segmento  $dl$  e raggio  $r$ .

### 1.1.2 Campo magnetico prodotto da un filo rettilineo percorso da corrente

Come esempio applicativo della legge di Ampère-Laplace, si considera un conduttore filiforme stretto e lungo. Per ogni punto  $P$ , il vettore  $u_T \times u_r$  è perpendicolare al piano determinato da  $P$  e dalla corrente, perciò la sua direzione è quella del versore  $u_\theta$ .

In  $P$  il campo magnetico prodotto da  $dl$  è tangente al cerchio di raggio  $R$  che passa attraverso  $P$ , ha il suo centro nella corrente ed è in un piano perpendicolare alla corrente. Integrando la formula definita precedentemente, i contributi di tutti i termini nell'integrale hanno la stessa direzione di  $u_\theta$  e il campo magnetico risultante  $B$  è pure tangente al cerchio. Il modulo di  $u_T \times u_r$  è  $\sin\theta$ , poiché  $u_T$  e  $u_r$  sono vettori unitari.

Quindi per una corrente rettilinea, il modulo del campo magnetico è:

Figura 1 - Segmento di spira attraversato da una corrente

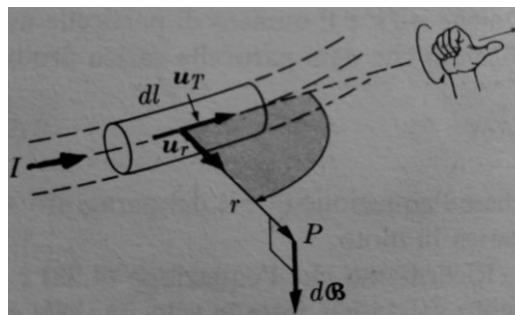
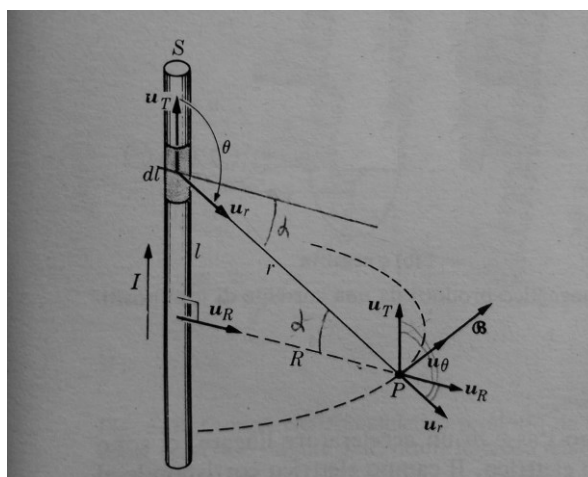


Figura 2 - Filo rettilineo percorso da una corrente





$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin\theta}{r^2} dl$$

dove  $R = r \sin(\pi - \theta) = r \sin\theta$

ne consegue  $\frac{1}{r} = \frac{\sin\theta}{R} \Rightarrow \frac{1}{r^2} = \frac{\sin^2\theta}{R^2}$  e quindi:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \text{ o in forma vettoriale } B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} u_\theta$$

Il campo magnetico di un conduttore rettilineo infinitamente lungo percorso da corrente è inversamente proporzionale alla distanza R.

Mentre per un conduttore di lunghezza L, il modulo del campo magnetico è:

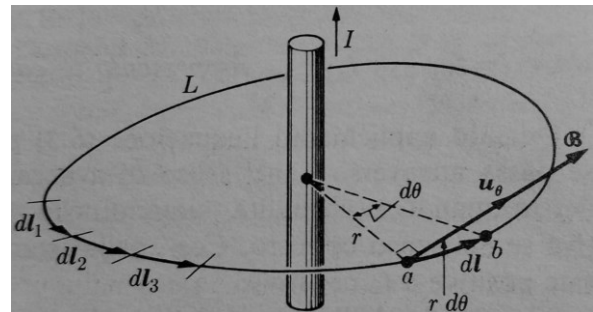
$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int_{-a}^a \frac{\sin\theta}{r^2} dl = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \frac{L}{\sqrt{R^2 + L^2}}$$

### 1.1.3 Legge di Ampère

Considerando prima un filo rettilineo di lunghezza infinita percorso da una lunghezza I. Viene quindi ora determinata la circolazione del campo magnetico lungo un percorso circolare di raggio r, concentrico con il filo in un piano ad esso perpendicolare. Essa viene denominata come forza magnetomotrice.

Si ha che  $B \cdot dl = B dl$  ed ha un'ampiezza costante. Perciò la circolazione magnetica (denominata col simbolo  $\Lambda_B$ ) è:

Figura 3 - Circolazione del campo magnetico



$$\Lambda_B = \oint_L B \cdot dl = \oint_L B dl = B \oint_L dl = B L = \left(\frac{\mu_0 I}{2\pi r}\right)(2\pi r) = \mu_0 I$$

La circolazione magnetica è quindi proporzionale alla corrente elettrica I, ed è indipendente dal raggio del percorso. Possiamo ora quindi enunciare la legge di Ampère per il campo magnetico:

“La circolazione del campo magnetico lungo una linea chiusa che concatena correnti

$$I_1, I_2, I_3, \dots \text{ è } \Lambda_B = \oint_L B \cdot dl = \mu_0 I$$

dove  $I = \sum_{i=1}^n I_n$  rappresenta la corrente totale concatenata dal percorso L”.

## 1.2 Forza magnetica

Storicamente Ampere intuì che le cariche elettriche in movimento fossero la sorgente delle forze magnetiche, anche del rispettivo campo vettoriale.

### 1.2.1 Forza di Lorentz

La forza esercitata da un campo magnetico su una carica in moto è proporzionale alla carica elettrica ed alla sua velocità e la direzione della forza è perpendicolare alla velocità della carica. La relazione che soddisfa i requisiti sperimentali appena citati è la seguente:

$$F = q v \times B$$

dove

$q$  Carica in moto [C];

$v$  velocità [m/s];

$B$  Campo magnetico [T]

Il cui modulo è  $F = q v B \sin(\theta)$  dove  $\theta$  è l'angolo tra  $v$  e  $B$ . Da qui si vede che se il campo è parallelo alla velocità la forza è nulla, mentre se è ortogonale è massima. Dalla regola della mano destra del prodotto vettoriale, si nota che la forza è sempre perpendicolare alla velocità. Quando la particella è in moto in una regione in cui vi sono un campo elettrico ed uno magnetico, la forza totale è la somma della forza elettrica  $qE$  e della forza magnetica  $qv \times B$ . Cioè

$$F = q(\mathcal{E} + v \times B)$$

Questa espressione è chiamata forza di Lorentz.

### 1.2.2 Seconda legge elementare di Laplace

Considerando una sezione sezione di un conduttore attraverso la quale sono in moto con velocità  $v$  particelle con carica  $q$ . Se ci sono  $n$  particelle per unità di volume, il numero totale di particelle passanti attraverso l'unità di area per unità di tempo è  $nv$ , e la densità di corrente, definita come la carica passante per l'unità di area per unità di tempo, è il vettore:

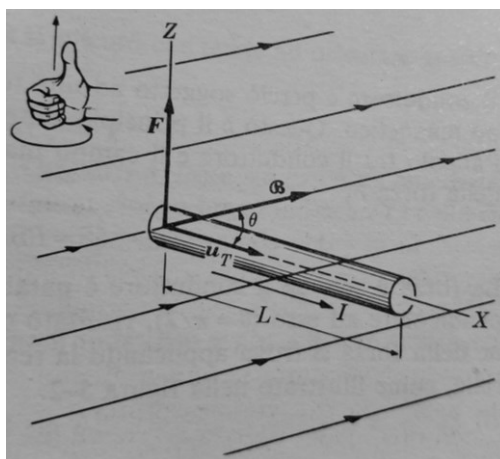
$$j = nqv$$

Se  $S$  è l'area n sezione del conduttore, orientata perpendicolarmente a  $j$ , la corrente è lo scalare

$$I = j \cdot S = nqvS$$

Supponendo che il conduttore sia in un campo magnetico, la forza su ogni carica è data dalla legge di Lorentz  $F = q(v \times B)$  e, poiché vi sono  $n$  particelle per unità di volume, la forza  $f$  per unità di volume è

Figura 4 - Relazione vettoriale tra forza magnetica, campo magnetico e corrente



$$f = nqv \times B = j \times B$$

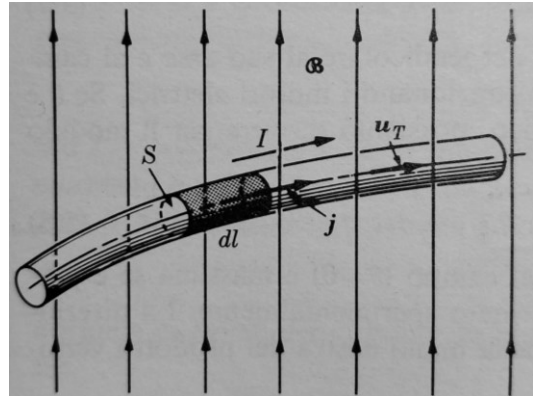
La forza totale su un volume  $dV$  del mezzo sarà  $dF = f dV = j \times B dV$ , e la forza totale su un volume finito si ottiene integrando. Cioè:

$$F = \int_{Vol} j \times B dV$$

Consideriamo il caso in cui vi sia corrente lungo un filo. Un elemento di volume  $dV$  è dato da  $S dl$  e pertanto:

$$F = \int_{filamento} j \times BS dl$$

Figura 5 - Filamento attraversato da corrente, immerso in un campo magnetico



Ora  $j = j u_T$ , dove  $u_T$  è il vettore unitario tangente all'asse del filamento. Allora:

$$F = \int (j u_T) \times BS dl = \int (jS) u_T \times B dl$$

Dove  $jS = I$ , pertanto la forza su un conduttore percorso da una corrente elettrica diviene:

$$F = I \int u_T \times B dl$$

Nel caso si avesse un conduttore rettilineo di lunghezza  $L$  posto in un campo magnetico uniforme  $B$ , allora l'equazione diverrebbe:

$$F = I L u_T \times B$$

Se  $\theta$  è l'angolo tra il conduttore e il campo magnetico, il modulo della forza diviene:

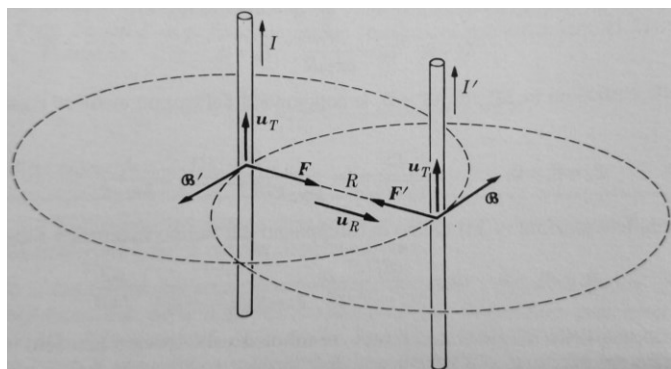
$$F = I B L \sin\theta$$

### 1.2.3 Forza su conduttori rettilinei filiformi

Per ottenere l'interazione magnetica tra due correnti elettriche, bisogna combinare l'equazione per il campo magnetico di un lungo conduttore percorso da corrente e l'equazione per la forza magnetica su una corrente. Per semplicità si considerano le due correnti  $I$  e  $I'$  parallele, aventi uguale verso e separate da una distanza  $R$ .

La forza  $F'$  su  $I'$  sarà:

Figura 6 - Interazione magnetica tra due correnti rettilinee



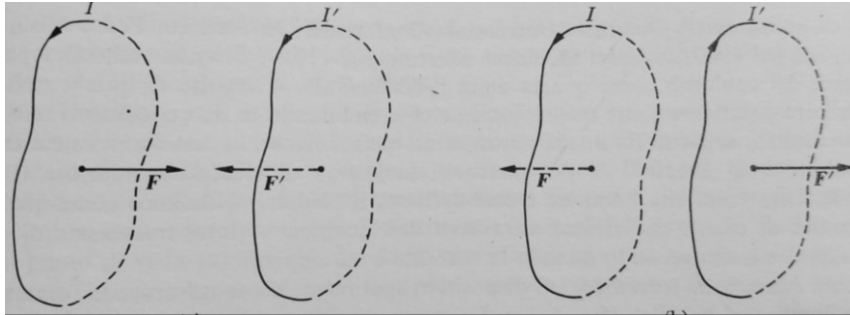
$$F' = I' \int u'_T \times B dl'$$

Ora  $u'_T \times B = -u_R B$  dove  $u_R$  è definito come il versore da  $I$  a  $I'$ . Pertanto, la forza è:

$$F' = I' \int \left(-u_R \frac{\mu_0 I}{2\pi R}\right) dl' = -u_R \left(\frac{\mu_0 I I'}{2\pi R}\right) \int dl' = -u_R \frac{\mu_0 I I'}{2\pi R} L$$

Questo risultato indica che la corrente  $I$  attira la corrente  $I'$ .

Figura 7 - Attrazione e repulsione tra due correnti



### 1.3 Calcolo delle tensioni interne

Gli elementi per i quali si effettuerà la verifica della resistenza meccanica alle sollecitazioni elettrodinamiche sono le barre rigide ed i conduttori flessibili. Dal punto di vista meccanico, una barra non è altro che una trave.

#### 1.3.1 Calcolo delle tensioni dovute a momento flettente

Figura 8 - Trave a sbalzo soggetta ad una forza

Procediamo considerando una generica trave a sbalzo, soggetta ad una forza  $P$  al suo estremo.

La Fig.8 illustra la deformazione della trave, focalizzandosi su un tratto di trave  $ds$  col suo centro di curvatura in  $O'$ . Nell'ipotesi di piccole deformazioni il segmento curvilineo  $ds$  può essere approssimato con la sua proiezione orizzontale  $dx$ , dove  $dx \approx ds = \rho d\varphi$  con  $\rho$  che rappresenta il raggio di curvatura. Quindi si ottiene che la curvatura  $\kappa$  è dato da:

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{d\varphi}{dx}$$

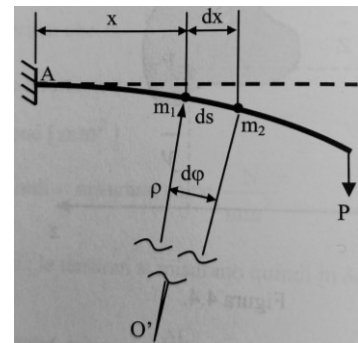
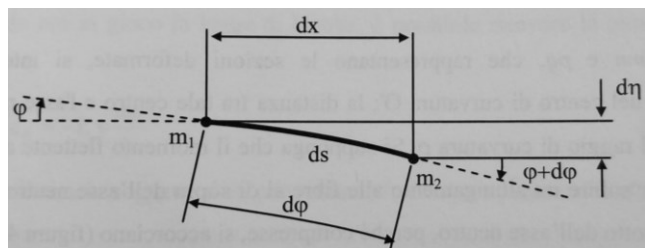


Figura 9 - Ingrandimento del tratto deformato

Se si indica con  $d\eta$  l'abbassamento infinitesimo che il punto  $m_2$  subisce rispetto  $m_1$  a seguito dell'inflexione della trave e con  $\varphi$  l'inclinazione della trave in  $m_1$ ,  $d\eta$  può essere approssimato come:

$$d\eta = dx \operatorname{tg}\varphi \approx dx \varphi \Rightarrow \varphi = \frac{d\eta}{dx}$$

dove per ipotesi di piccoli spostamenti,  $\operatorname{tg}\varphi$  è stata approssimata con  $\varphi$ .



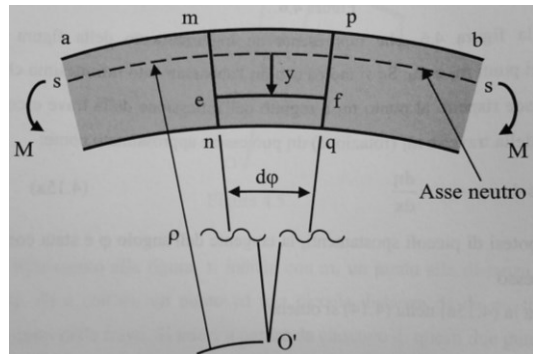
Riprendendo in considerazione l'equazione della curvatura si avrà  $\kappa = \frac{d\varphi}{dx} = \frac{d^2\eta}{dx^2}$

Figura 10 - Ingrandimento trave sotto deformazione

Sotto ipotesi che sezioni inizialmente piane rimangono piane anche a deformazione avvenuta, dalla Fig.10 si ha che i tratti  $mn$  e  $pq$ , che rappresentano le sezioni deformate, s'intersecano virtualmente nel centro di curvatura  $O'$ ; la distanza da tale centro all'asse neutro  $ss$  rappresenta il raggio di curvatura  $\rho$ .

Le fibre in corrispondenza dell'asse neutro rimangono di lunghezza invariata  $dx = \rho d\varphi$ .

La generica fibra  $ef$ , di lunghezza infinitesima  $dx$  compressa tra le sezioni  $mn$  e  $pq$ , che si trova ad una generica distanza  $y$  dall'asse neutro a deformazione avvenuta, avrà una lunghezza  $L_1$  pari a:



$$L_1 = (\rho - y)d\varphi = dx - \frac{y}{\rho} dx$$

Mentre la deformazione  $\epsilon_x$  della fibra risulta:

$$\epsilon_x = \frac{\Delta L}{dx} = \frac{L_1 - dx}{dx} = -\frac{y}{\rho} = -\kappa y$$

Mettendo ora in gioco la legge di Hooke, è possibile ricavare la tensione nominale come:

$$\sigma_x = E\epsilon_x = -Ey \frac{d\varphi}{dx}$$

In presenza di puro momento flettente si ha che

$$\int_A \sigma dA = 0 \Rightarrow \int_A -Ey \frac{d\varphi}{dx} dA = 0$$

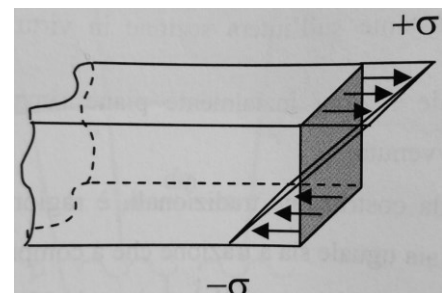
Essendo  $\frac{d\varphi}{dx}$  una costante sull'intera sezione secondo l'ipotesi che sezioni inizialmente piane rimangono piane anche a deformazione avvenuta e che per i materiali da costruzioni tradizionali il modulo elastico  $E$  sia uguale in trazione e compressione, risulta  $\int_A y dA = 0$ .

Figura 11 - Tensioni dovute a flessione

Per equilibrio alle rotazioni della generica sezione si ha inoltre che  $\int_A \sigma y dA = M$  dove  $M$  è il momento flettente agente. Sostituendo l'espressione per  $\sigma$ :

$$\begin{aligned} M &= \int_A -Ey \frac{d\varphi}{dx} y dA = -E \frac{d\varphi}{dx} \int_A y^2 dA \\ &= -E \frac{d\varphi}{dx} J_{ZZ} \end{aligned}$$

Dove  $J_{ZZ}$  è il momento geometrico del secondo ordine della sezione. Infine si ha che:



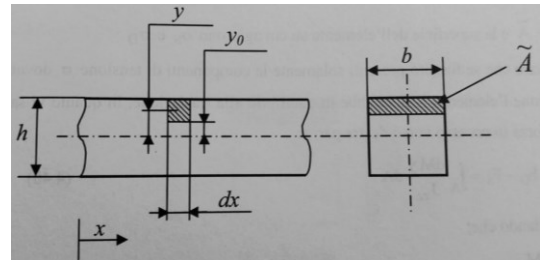
$$\frac{\sigma_x}{y} = -E \frac{d\varphi}{dx} \Rightarrow \sigma_x = \frac{M}{J_{ZZ}} y$$

L'equazione prende il nome di equazione di Navier e permette di concludere che le tensioni dovute a flessione, sono delle tensioni normali alla superficie  $\sigma_x$  come rappresentato in Fig.11.

### 1.3.2 Calcolo delle tensioni dovute a taglio

Figura 12 - Elemento infinitesimo di concio di trave

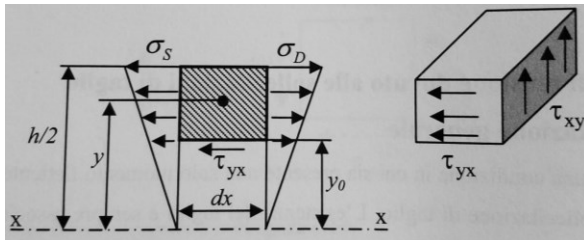
Si consideri una condizione in cui sia presente non solo il momento flettente puro, ma anche una sollecitazione di taglio. L'esistenza del taglio è sempre associata ad una variazione del momento flettente lungo la trave.



Si consideri un concio di trave e si isoli al suo interno un elemento infinitesimo di lunghezza  $dx$  e altezza  $h/2 - y_0$ , come rappresentato in Fig.12.

Con  $y$  s'indicherà la generica distanza tra il baricentro dell'elemento considerato e l'asse baricentrico della sezione. Per effetto della variazione del momento flettente, che indicheremo con  $dM$ , le facce di sinistra e di destra dell'elemento infinitesimo isolato sono soggette a delle tensioni normali  $\sigma$  di diversa entità. In particolare, con riferimento alla Fig.13, si ha che:

Figura 13 - Tensioni lungo il concio di trave



$$\sigma_S = \frac{M y}{J_{ZZ}} \quad \sigma_D = \frac{(M+dM)y}{J_{ZZ}}$$

Esse danno luogo alle seguenti risultanti sull'elemento:

$$F_S = \int_{\tilde{A}} \sigma_S d\tilde{A} = \int_{\tilde{A}} \frac{M y}{J_{ZZ}} d\tilde{A}$$

$$F_D = \int_{\tilde{A}} \sigma_D d\tilde{A} = \int_{\tilde{A}} \frac{(M + dM) y}{J_{ZZ}} d\tilde{A}$$

Dove  $\tilde{A}$  è la superficie dell'elemento su cui agiscono  $\sigma_S$  e  $\sigma_D$ .

Se fossero presenti solamente le componenti di tensione  $\sigma$  dovute alla flessione, l'elemento non sarebbe in equilibrio alla traslazione, in quanto vi sarebbe una forza in eccesso verso destra pari a:

$$\Delta F = F_D - F_S = \int_{\tilde{A}} \frac{dM y}{J_{ZZ}} d\tilde{A} \quad \text{con} \quad T = \frac{dM}{dx} \Rightarrow dM = T dx$$

dove  $T$  è lo sforzo di taglio e sostituendo si ottiene:

$$\Delta F = \int_{\tilde{A}} \frac{T dx}{J_{ZZ}} y d\tilde{A} = \frac{T dx}{J_{ZZ}} \int_{\tilde{A}} y d\tilde{A}$$

Risulta necessario per garantire l'equilibrio dell'elemento, che sulla sua faccia inferiore nascano delle componenti di tensione parallele alla faccia stessa. Esse sono delle componenti di tensione tangenziali  $\tau_{yx}$ .

Per ipotesi, le tensioni taglio sono uniformemente distribuite su tutta la larghezza  $b$ . Se le facce della sezione sono parallele e l'ipotesi è quindi soddisfatta, la risultante può essere espressa come:

$$F_{\tau} = \tau_{yx} b dx$$

la quale dovrà uguagliare  $\Delta F$  per equilibrio e si ottiene:

$$\tau_{yx} = \frac{T}{J_{ZZ} b} \int_{\tilde{A}} y d\tilde{A} = \frac{T S_{ZZ}}{J_{ZZ} b}$$

dove  $S_{ZZ}$  è il momento statico del primo ordine dell'area dell'elemento considerato, indicata come  $\tilde{A}$ . La precedente equazione, rappresenta l'equazione di Jourawskj.

### 1.3.3 Criterio tensionale di von Mises

Con le formule di Navier e di Jourawskj è quindi possibile ricavare le tensioni interne in ogni punto delle barre. Per verificare poi che non superino i valori limite si è scelto di seguire i criteri normativi, in quanto risultano più conservative, ma anche il criterio tensionale di von Mises è valido, poiché rappresenta bene i materiali duttili, essendo le barre dei quadri elettrici in metallo. Con questo metodo la tensione equivalente viene calcolata come:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

Nei conduttori flessibili l'unica tensione interna presente è quella normale. In questo caso, per ogni sezione del conduttore essa non deve superare quella di snervamento.





## **CAPITOLO 2**

## 2.1 Normativa quadri bassa tensione EN IEC 61439-1:2021

La norma EN IEC 61439-1 stabilisce le definizioni generali, le condizioni di servizio, le prescrizioni di costruzione, le caratteristiche tecniche e i requisiti di verifica per le apparecchiature assiemate di protezione e manovra per bassa tensione (quadri BT). Fondamentalmente la norma consiste in standard di sicurezza con la funzione principale di garantire che i dispositivi a bassa tensione siano sicuri e adatti allo scopo.

Si applica ai dispositivi solo se rientrano nelle seguenti caratteristiche:

- tensione di alimentazione non superiore a 1000 V AC o 1500 V DC;
- frequenza nominale non superiore a 1000 Hz;
- dispositivi designati ad applicazione interne o esterne;
- dispositivi fissi o mobili con o senza involucro;
- dispositivi connessi con la generazione, trasmissione, distribuzione e conversione dell'energia elettrica e per il controllo del consumo dell'energia elettrica dell'attrezzatura.

La norma non viene applicata a dispositivi individuali e componenti autonomi come interruttori fusibili, sistemi elettronici di conversione di potenza (PECS), alimentatori a commutazione (SMPS), gruppi di continuità (UPS), e altre apparecchiature elettroniche conformi alle norme di prodotto pertinenti.

La norma EN IEC 61439-1 si potrebbe teoricamente estendere anche ai quadri per uso domestico e simile. Poiché la sua applicazione risulterebbe inutilmente gravosa, per i piccoli centralini domestici ci si può riferire, semplificando notevolmente le procedure di verifica, ad una specifica norma, la CEI 23-51, appositamente redatta per questi piccoli quadri.

Prima di affrontare la trattazione utile alla valutazione dei fenomeni dovuti al cortocircuito dei conduttori, è importante inquadrare bene le varie tipologie di corrente elettrica che verranno trattate nella tesi.

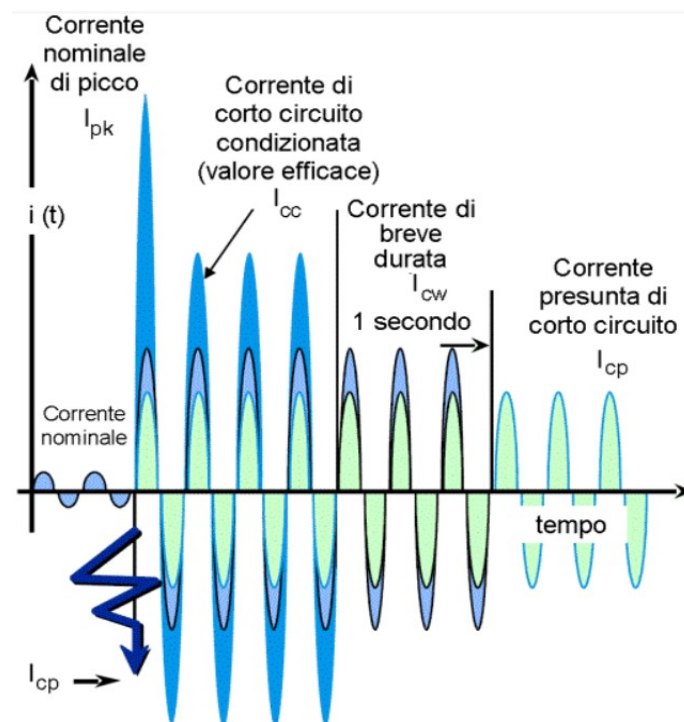
Tabella 1 - Definizioni delle principali correnti nei quadri elettrici

Simbolo	Nome	Definizione
$I_b$	Corrente d'utilizzo di un circuito elettrico	Corrente elettrica che scorre in normali condizioni operative
$I_{nA}$	Corrente nominale di un dispositivo	Corrente nominale che può scorrere in un dispositivo, senza che l'aumento di temperatura di nessuna parte ecceda nelle specifiche tecniche
$I_{ng}$	Corrente nominale di gruppo di un circuito principale	Corrente nominale che un circuito principale può trasportare considerando le reciproche influenze termiche degli'altri circuiti caricati contemporaneamente nella stessa sezione del quadro
$I_{nc}$	Corrente nominale del circuito principale	Corrente nominale che un circuito principale può trasportare quando è l'unico circuito principale all'interno di una sezione del quadro che trasporta corrente
$I_{lt}$	Corrente d'interruzione / passante	Massimo valore istantaneo che raggiunge una corrente durante l'interruzione operativa di un interruttore automatico o di un fusibile

$I_c$	Corrente di cortocircuito	Sovracorrente ottenuta da un cortocircuito dovuto ad un guasto o ad una scorretta connessione di un circuito elettrico
$I_{cc}$	Corrente di cortocircuito in condizione nominale	Valore della corrente di cortocircuito attesa, dichiarata dal fabbricante, che può essere sopportata durante il tempo d'intervento di un SCPD secondo specifiche condizioni
$I_{cp}$	Corrente di cortocircuito presunta	Corrente che può scorrere se i conduttori di alimentazione del circuito fossero cortocircuitati da un conduttore d'impedenza trascurabile situato il più vicino possibile ai terminali di alimentazione del dispositivo
$I_{cw}$	Corrente nominale a breve termine	Valore di corrente a breve termine RMS in AC o valore medio in DC, dichiarata dal fabbricante del dispositivo, che può essere sopportata sotto condizioni specifiche, definita in termini di corrente e tempo
$I_{pk}$	Corrente nominale di picco	Valore di picco della corrente dichiarata dal fabbricante del dispositivo, che può essere sopportata sotto specifiche condizioni

Di seguito vengono illustrate in [Fig.14](#) le diverse tipologie di corrente elettrica, in modo tale da fornire un'ulteriore precisazione ed delucidazione delle loro grandezze di misura in proporzione alla corrente nominale e del loro andamento nel tempo.

Figura 14 - Rappresentazione schematica delle correnti di cortocircuito (estratto da Elektro.it - Quadri elettrici in bassa tensione)



## 2.1 Requisiti costruttivi

Verranno ora analizzate brevemente dalla norma EN IEC 61439-1 le direttive ed i requisiti costruttivi:

- A. Stabilità termica
  - B. Forze meccaniche
  - C. Distanziamenti
  - D. Circuito principale
  - E. Barre e conduttori isolati
  - F. Limiti di aumento della temperatura
  - G. Protezione e resistenza ai cortocircuiti
- 
- A. Involucri o parti di esse realizzati con materiale/i isolante/i, non ancora certificate con la propria norma di prodotto, devono essere in grado di funzionare a temperature di almeno 70°C. Parti di materiali isolanti, che possono essere esposti a sollecitazioni termiche dovute agli effetti elettrici, il cui deterioramento può compromettere la sicurezza del dispositivo, non dev'essere influenzato negativamente dal calore operativo.
  - B. Tutti gli involucri o le pareti divisorie devono avere una forza meccanica sufficiente a resistere alle sollecitazioni a cui possono essere sottoposti in servizio normale e in condizioni di cortocircuito.
  - C. I requisiti per il distanziamento sono basati nei principi della IEC 60664-1, le quali provvedono al coordinamento dell'isolamento dell'installazione. L'effetto di un cortocircuito non deve ridurre in modo permanente le distanze tra le barre e/o connessioni inferiori ai valori specificati per il dispositivo. Pertanto i distanziamenti descritti dalla specifica norma prodotto, potrebbero non essere sufficienti e bisognerà effettuare un controllo con la compatibilità degli effetti elettrodinamici.
  - D. Le barre devono essere posizionate in maniera tale da non provocare cortocircuiti interni inaspettati. Devono essere classificate in conformità dei requisiti relativi alla resistenza al cortocircuito e progettate in modo da resistere almeno alle sollecitazioni di cortocircuito limitate dal dispositivo o dai dispositivi di protezione presenti sull'alimentazione lato delle barre.
  - E. I collegamenti di parti dove scorre corrente non devono subire alterazioni a causa di un normale aumento della temperatura, di un invecchiamento prematuro dell'isolamento e non devono risentire delle vibrazioni che si verificano in condizioni normali. I collegamenti tra le parti che trasportano corrente, devono essere stabiliti mediante mezzi che garantiscano una pressione di contatto sufficiente e duratura. L'effetto dell'espansione termica, dell'azione elettrolitica nel caso di metalli diversi, l'invecchiamento dovuto alle temperature dovrebbe essere preso in considerazione. Per definire la portata massima di corrente, la determinazione della sezione dipende da:
    - lo stress meccanico al quale il dispositivo può essere sottoposto;
    - il metodo utilizzato per la posa e l'isolamento del conduttore;
    - la tipologia di componente connesso

- F. Il quadro e i suoi circuiti devono essere in grado di far scorrere le loro correnti nominali, senza superare i limiti indicati dal dispositivo. Se i limiti di aumento della temperatura sono stati modificati per coprire una diversa temperatura dell'aria ambiente, allora potrebbe essere necessario modificare le correnti nominali di tutte le barre, le unità funzionali, ecc. L'aumento di temperatura non deve causare danni alle parti che trasportano corrente o alle parti adiacenti del quadro.
- G. Le apparecchiature devono essere in grado di resistere allo stress termico e dinamico derivato da cortocircuiti non superiori ai valori nominali.

NOTA 1 Gli stress derivanti dai cortocircuiti, possono essere ridotti tramite dispositivi di limitatori di corrente, ad esempio induttanze, fusibili o altri dispositivi di commutazione della limitazione della corrente.

NOTA 2 Quando avviene un cortocircuito risultante dall'operazione di estinzione di un arco, in accordo con la IEC 60947-9-1 o in caso di altri dispositivi di cortocircuito volontario, esso risulta il massimo stress concesso al circuito.

Gli apparecchi devono essere protetti contro le correnti di cortocircuito, ad esempio tramite interruttori automatici, fusibili o una combinazione di entrambi.

Se non diversamente specificato dal fascicolo tecnico del fabbricante del dispositivo, gli apparecchi che sono stati sottoposti al cortocircuito, potrebbero non essere adatti per un servizio futuro senza ispezione e/o manutenzione da parte di persone specializzate.

Per le apparecchiature con un SCPD incorporato, il fabbricante del dispositivo deve dichiarare il massimo valore consentito della probabile corrente di cortocircuito ai terminali iniziali del dispositivo.

Per le apparecchiature dove il dispositivo di protezione dai cortocircuiti non è incorporato all'interno dell'unità, il fabbricante del dispositivo deve indicare la resistenza al cortocircuito in uno o più modi delle seguenti vie:

- A. la corrente nominale a breve termine  $I_{cw}$  assieme alla corrente nominale di picco  $I_{pk}$
- B. la corrente di cortocircuito in condizione nominale  $I_{cc}$  includendo la caratteristica limite di corrente del SCPD a monte.

Per tempi fino ad un massimo di 3s, la relazione tra la corrente nominale a breve termine e la sua durata associata è data dalla formula  $I^2 t = \text{costante}$ , purché il valore di picco non ecceda il valore di resistenza alla corrente nominale di picco.

## 2.2 Verifiche di progetto

Le verifiche di progetto sono destinate per verificare complicazioni della realizzazione di un'apparecchiatura o del sistema dell'apparecchiatura con i requisiti della serie IEC 61439.

Le verifiche di progettazione devono riguardare tutte le dichiarazioni del dispositivo.

I vari metodi includono:

- verifica tramite test
- verifica con confronto del progetto di riferimento (check list)
- valutazione della verifica, ossia conferma della corretta applicazione dei calcoli e norme di progettazione.

Le prove devono essere eseguite su un campione rappresentativo di un quadro in condizioni nuove e pulite. La verifica del progetto comprende quanto segue:

1. Costruzione:
  - a. Resistenza dei materiali
  - b. Grado di protezione degli apparecchi (codice IP)
  - c. Distanziamenti e distanze di dispersione
  - d. Protezione contro contatti elettrici e l'integrità dei circuiti di protezione
  - e. Incorporazione di dispositivi e componenti di commutazione
  - f. Circuiti elettrici interni e connessioni
  - g. Terminali per conduttori esterni
  
2. Prestazioni:
  - a. Proprietà dielettriche
  - b. Aumento della temperatura
  - c. Resistenza al cortocircuito
  - d. Compatibilità elettromagnetica

Nella trattazione andremo ad analizzare soprattutto la verifica di prestazioni alla tenuta del cortocircuito.

La verifica della resistenza al cortocircuito del circuito di protezione può essere effettuata tramite un confronto con uno o più progetti di riferimento o con una prova.

La verifica mediante confronto con i progetti di riferimento viene effettuata utilizzando la Tab.2. Il confronto è da considerarsi valido se i punti considerati non mostrano scostamenti. Mentre la verifica mediante confronto con i progetti di riferimento basati sul calcolo dev'essere effettuata conformemente al punto 10.11.4 della norma (Cap. 2.2.4).

### *2.2.1 Tenuta al cortocircuito*

I requisiti di conformità sulla tenuta al cortocircuito dei quadri di automazione bordo macchina sono riportati all'articolo 10.11 della norma EN IEC 61439-1, intitolato "Tenuta al cortocircuito". I valori nominali di corrente di cortocircuito dichiarati devono essere verificati, salvo in caso di esenzione (Cap. 2.2.2). La verifica può essere effettuata mediante confronto con uno o più progetti di riferimento o mediante prove. Per la verifica, si applica quanto segue:

1. Se il sistema del quadro da verificare comprende più varianti, occorre scegliere la disposizione o le disposizioni più onerose del quadro, tenendo conto delle regole ai punti 2.2.3 e 2.2.4.
2. Le varianti del quadro selezionate per la prova, devono essere verificate conformemente al punto 2.2.5.
3. Quando il sistema di quadri testati comprende un numero di varianti, bisogna scegliere la/le configurazione/i più onerosa/e della gamma di prodotti. I risultati dei test possono essere utilizzati per stabilire le valutazioni di varianti simili senza ulteriori test. Le regole per tali derivazioni sono riportate al punto 2.2.3 e 2.2.4.

### 2.2.2 Circuiti di apparecchi esentati dalla verifica della resistenza al cortocircuito

Una verifica della resistenza al cortocircuito non è richiesta per quanto segue:

- A. apparecchi aventi una corrente nominale a breve termine  $I_{cw}$  o una corrente nominale di cortocircuito in condizioni nominali  $I_{cc}$  non superiore a 10 kA RMS AC e media di 10 kA DC
- B. apparecchi, o circuiti di apparecchi, protetti da limitatori di corrente aventi una corrente di interruzione non superiore a 17 kA
- C. circuiti ausiliari di apparecchi destinati ad essere collegati a trasformatori la cui potenza nominale non superi 10 kVA per una tensione nominale secondaria non inferiore a 110 V, o 1.6 kVA per una tensione nominale secondaria inferiore a 110 V, la cui impedenza di cortocircuito non è inferiore al 4%

Tutti gli altri circuiti vanno verificati.

Nella seguente trattazione, si andranno a valutare quadri che non rispettano alcuna condizione di cui sopra, quindi occorre procedere con la verifica secondo i metodi riportati di seguito.

### 2.2.3 Confronto con i progetti di riferimento utilizzando una tabella

Le verifiche sono effettuate confrontando un quadro da verificare con uno o più progetti di riferimento utilizzando la lista di controllo alla Tab.2.

Qualora uno degli elementi individuati nella lista di controllo non sia conforme ai requisiti della lista di controllo e rechi la dicitura «NO», deve essere utilizzato uno dei seguenti mezzi di verifica: Cap.2.2.4 e Cap.2.2.5.

Tabella 2 – Lista di controllo  
(estratto da EN 61439-1, Tabella 13)

Punti n°	Requisiti da considerare	SI	NO
1	La resistenza al cortocircuito di ciascun circuito del quadro è inferiore o uguale a quella progettuale?		
2	Le dimensioni della sezione trasversale delle barre e dei conduttori di ciascun circuito del quadro, sono maggiori o uguali a quelle progettuali?		
3	La spaziatura della linea centrale delle barre e dei conduttori di ciascun circuito del quadro è maggiore o uguale a quelli del progetto di riferimento?		
4	I supporti delle barre e del conduttore di ciascun circuito del quadro, sono dello stesso tipo, forma e materiale e hanno lo stesso o il più piccolo interlinea centrale lungo la lunghezza della barra e del conduttore come riferimento disegno? La struttura di montaggio per la barra e il conduttore di fissaggio, hanno la stessa resistenza meccanica come descritto dal progetto?		
5	Il materiale e le proprietà del materiale dei conduttori di ciascun circuito del quadro, sono uguali a quelli del progetto di riferimento?		
6	I dispositivi di protezione dal cortocircuito di ciascun circuito del quadro, sono della stessa marca e serie del progetto di riferimento? <sup>a</sup> Inoltre, i dispositivi di protezione dal cortocircuito di ciascun circuito del quadro da valutare: <ul style="list-style-type: none"> <li>• hanno una capacità di rottura non inferiore al grado di cortocircuito dell'apparecchio alla tensione nominale d'esercizio dell'apparecchio?</li> <li>• nel caso di un dispositivo di protezione che limita la corrente: la corrente passante di picco e l'energia passante, sono pari o inferiori al progetto di riferimento alla potenza nominale di cortocircuito e alla tensione nominale operativa dell'apparecchio?</li> <li>• nel caso di un dispositivo che non limita la corrente: una corrente nominale di breve durata <math>I_{cw}</math> è uguale o superiore a quella del progetto di riferimento?</li> <li>• vengono soddisfatti i requisiti di coordinamento con i dispositivi a monte e a valle, se necessario?</li> <li>• hanno la stessa disposizione del progetto di riferimento?</li> </ul>		
7	La lunghezza dei conduttori attivi non protetti, di ciascun circuito non protetto del quadro è inferiore o uguale a quelli del progetto di riferimento?		
8	Se il quadro da valutare include un involucro, il progetto di riferimento è stato realizzato per includere un involucro verificato dal test?		
9	L'involucro del quadro è stato realizzato con lo stesso design e le stesse dimensioni di quella del progetto di riferimento?		
10	I compartimenti di ogni circuito del quadro, sono stati valutati con gli stessi criteri meccanici e le stesse dimensioni del progetto di riferimento?		



“SI” a tutti i requisiti - non servono ulteriori verifiche “NO” ad un qualsiasi requisito - ulteriori verifiche necessarie	
a	I dispositivi di protezione dal cortocircuito dello stesso produttore, ma di una serie diversa, possono essere considerati equivalenti quando il fabbricante del dispositivo dichiara che le caratteristiche prestazionali sono uguali o migliori in tutti gli aspetti pertinenti rispetto alle serie utilizzate per la verifica, ad esempio le caratteristiche di limitazione ( $I^2t$ , $I_{it}$ ) e distanze critiche.

#### 2.2.4 Confronto con i progetti di riferimento tramite calcoli

La valutazione della corrente nominale di resistenza a breve termine  $I_{cw}$  di un quadro e dei suoi circuiti, deve essere effettuato mediante un confronto tra il quadro da valutare e un quadro già verificato mediante prove. La valutazione per verificare i circuiti principali di un quadro dev'essere effettuata conformemente all'Allegato C. Inoltre, ciascuno dei circuiti del quadro da valutare deve soddisfare i requisiti di cui ai punti 6, 8, 9 e 10 della Tab.2.

Se la valutazione di cui all'Allegato C non viene superata o uno qualsiasi degli elementi sopra elencati non è soddisfatto, il quadro e i relativi circuiti devono essere verificati mediante prova conformemente al Cap.2.2.5.

#### 2.2.5 Verifica tramite prova

Il quadro o le sue parti necessarie per completare la prova, devono essere montate come durante il normale esercizio. È sufficiente testare una singola unità funzionale se le restanti unità funzionali sono della stessa costruzione. Analogamente, è sufficiente testare una singola configurazione di barre se le restanti configurazioni delle barre sono della stessa costruzione.

I conduttori di alimentazione e i collegamenti di cortocircuito necessari per la prova del quadro devono avere una resistenza sufficiente alla tenuta ai cortocircuiti ed essere disposti in modo da non introdurre eventuali sollecitazioni aggiuntive sul quadro.

Tutte le parti dell'equipaggiamento destinate ad essere collegate al conduttore di protezione in servizio, compreso l'involucro, devono essere collegate come segue:

- A. per apparecchi adatti all'uso su sistemi trifase a quattro fili con stella messa a terra, che ne consenta una corrente di guasto presunta  $I_{cp}$  di almeno 1500 A
- B. per gli apparecchi adatti anche per l'uso in sistemi trifase a tre fili e su sistemi trifase a quattro fili, al conduttore fase con meno probabilità di arco a terra

Il collegamento richiamato in A e B deve comprendere un elemento fusibile, il quale consiste in un filo di diametro di 0.8mm e di lunghezza non inferiore a 50mm, o un elemento fusibile equivalente per rivelare la corrente di guasto. La corrente di guasto potenziale nel circuito dove si trova l'elemento fusibile, deve essere compresa tra 1500 A  $\pm$  150 A, salvo quanto indicato nelle note 2 e 3. Se necessario, deve essere utilizzato un resistore che limiti la corrente a tale valore.

NOTA 1 Un filo di rame di 0.8 mm di diametro fonde a 1500 A in circa mezzo ciclo ad una frequenza tra 45 Hz e 67 Hz (o 0.01s per DC).

NOTA 2 La corrente di guasto potenziale può essere inferiore a 1500 A nel caso di piccole apparecchiature, secondo i requisiti della norma di prodotto pertinente, con un filo di rame di diametro inferiore (vedi nota 4) corrispondente allo stesso tempo di fusione della Nota 1.

NOTA 3 Nel caso di un quadro avente un neutro artificiale, può essere accettata una corrente di guasto presunta inferiore, previo accordo del fabbricante del quadro, con un filo di rame di diametro inferiore vedi nota 4) corrispondente allo stesso tempo di fusione della Nota 1.

NOTA 4 Relazione tra la corrente di guasto presunta nel circuito dell'elemento fusibile e il diametro del filo di rame è indicato nella Tab.3.

Tabella 3 – Relazione tra la corrente di guasto presunta e diametro del filo di rame  
(estratto da EN 61439-1, Tabella 14)

Diametro di un filo in rame [mm]	Corrente di guasto presunta dell'elemento fusibile circuito [A]
0.1	50
0.2	150
0.3	300
0.4	500
0.5	800
0.8	1500

#### 2.2.5.1 Circuiti in uscita

L'apparecchio di manovra deve essere chiuso e mantenuto chiuso come nel normale servizio. La tensione di prova deve essere applicata una sola volta e,

- A. per un tempo sufficientemente lungo per permettere al dispositivo di protezione contro il cortocircuito nell'unità di uscita di intervenire per interrompere il guasto e in ogni caso per una durata che non sia inferiore a 10 periodi (durata della tensione di prova), o
- B. nei casi in cui il circuito di uscita non comprenda un SCPD, per un valore e una durata specificati dal costruttore originale delle barre. Le prove dei circuiti di uscita possono anche provocare l'intervento dell'SCPD del circuito di entrata.

I terminali di uscita dei circuiti in uscita devono essere dotati di un collegamento di cortocircuito bullonato.

Per gli interruttori automatici aventi una corrente nominale non superiore a 630 A, nel circuito di prova deve essere incluso un conduttore di 0,75 m di lunghezza avente un'area della sezione trasversale corrispondente alla corrente nominale (si veda Tab.4 e Tab.5).

Tabella 4 – Conduttori di prova in rame per correnti nominali fino a 400 A inclusi  
(estratto da EN 61439-1, Tabella 11)

Intervalli di correnti nominali <sup>a</sup>		Area della sezione trasversale del conduttore <sup>b,c</sup>	
[A]		mm <sup>2</sup>	AWG/MCM
0	8	1.0	18
8	12	1.5	16
12	15	2.5	14
15	20	2.5	12
20	25	4.0	10
25	32	6.0	10
32	50	10	8
50	65	16	6
65	85	25	4
85	100	35	3
100	115	35	2
115	130	50	1
130	150	50	0
150	175	70	00
175	200	95	000
200	225	95	0000
225	250	120	250
250	275	150	300
275	300	185	350
300	350	185	400
350	400	240	500

<sup>a</sup> Il valore della corrente nominale deve essere maggiore del primo valore della prima colonna e minore o uguale al secondo valore di tale colonna.

<sup>b</sup> Per comodità di prova e con il consenso del fabbricante, possono essere utilizzati conduttori di prova più piccoli di quelli indicati per una corrente nominale dichiarata.

<sup>c</sup> Può essere utilizzato uno dei due conduttori specificati

Tabella 5 – Conduttori di prova in rame per correnti nominali da 400 A a 7000 A  
(estratto da EN 61439-1, Tabella 12)

Intervalli di correnti nominali <sup>a</sup>	Conduttori di test <sup>c</sup>			
	Cavi <sup>c</sup>		Barre in rame <sup>b</sup>	
	Quantità	Area della sezione trasversale [mm <sup>2</sup> ]	Quantità	dimensioni [mm] (larghezza × profondità)
400 < I ≤ 500	2	150	2	30 × 5
500 < I ≤ 630	2	185	2	40 × 5
630 < I ≤ 800	2	240	2	50 × 5
800 < I ≤ 1 000	3	185	2	60 × 5
1 000 < I ≤ 1 250	3	240	2	80 × 5
1 250 < I ≤ 1 600	3	240	2	100 × 5
	0 4	300		
1 600 < I ≤ 2 000			3	100 × 5
2 000 < I ≤ 2 500			4	100 × 5
2 500 < I ≤ 3 150			3	100 × 10
3 150 < I ≤ 4 000			4	100 × 10
4 000 < I ≤ 5 000			5	100 × 10
5 000 < I ≤ 6 000			6	100 × 10
6 000 < I ≤ 7 000			7	100 × 10

<sup>a</sup> Il valore della corrente nominale deve essere maggiore del primo valore della prima colonna e minore o uguale al secondo valore di tale colonna.

<sup>b</sup> Si presume che le barre siano disposte con le loro facce lunghe, verticalmente. Possono essere utilizzati dispositivi con facce lunghe orizzontalmente se specificato dal fabbricante. Le barre possono essere dipinte.

<sup>c</sup> Per correnti nominali superiori a 1600 A e quando i terminali sono progettati per essere collegati ad un sistema di cavi, i cavi in parallelo, con una sezione totale non superiore a quella delle barre di rame in questa tabella, possono essere utilizzati come conduttori di prova.

### 2.2.5.2 Circuito in entrata e barre principali

I quadri contenenti barre principali devono essere sottoposti a prove per dimostrare la tenuta al cortocircuito delle barre stesse e del circuito entrante, compreso almeno un giunto in cui le barre collettrici sono destinate ad essere estendibili. Il cortocircuito deve essere posizionato in modo tale che la lunghezza della barra principale inclusa nella prova sia  $(2 \pm 0,4)$  m. Per la

verifica della corrente nominale a breve termine  $I_{cw}$  e della corrente nominale di picco  $I_{pk}$ , questa distanza può essere aumentata e la prova può essere effettuata a qualsiasi tensione opportuna, purché la corrente di prova sia il valore nominale (si veda Cap.2.5.5.5 punto B).

Se la progettazione del quadro è tale che la lunghezza delle barre da sottoporre alla prova è inferiore a 1,6 m e il quadro non è destinato ad essere esteso, si deve verificare l'intera lunghezza delle barre, essendo il cortocircuito stabilito alla fine di queste barre.

Se un sistema di barre collettrici è costituito da sezioni diverse, ciascuna sezione è sottoposta a prova separatamente o contemporaneamente, purché siano soddisfatte le condizioni di cui sopra.

#### *2.2.5.3 Collegamenti all'alimentazione delle unità in uscita*

Se un quadro contiene dei conduttori, comprese le eventuali barre di distribuzione, tra la barra principale e il lato di alimentazione delle unità di uscita che non soddisfano le prescrizioni 8.6.4 della norma EN IEC 61439-1, un circuito di ogni tipo deve essere sottoposto ad una prova aggiuntiva.

Un cortocircuito è ottenuto da connessioni bullonate sui conduttori che collegano le barre collettrici ad una singola unità in uscita, il più vicino possibile ai terminali sul lato barra dell'unità uscente. Il valore e la durata della corrente di cortocircuito devono essere uguali a quelli delle barre principali.

#### *2.2.5.4 Conduttore di neutro*

Se all'interno di un circuito è presente un conduttore di neutro, esso deve essere sottoposto ad una prova per dimostrarne la tenuta al cortocircuito in relazione al conduttore di linea più vicino del circuito in prova, compresi eventuali giunti. I collegamenti da linea a neutro in cortocircuito devono essere applicati come specificato al punto 2.2.5.2.

In assenza di un accordo tra il fabbricante e l'utilizzatore, il valore della corrente di prova nel conduttore neutro deve essere almeno pari al 60% della corrente di fase durante la prova trifase.

La prova non deve essere eseguita se è destinata ad essere effettuata con una corrente pari al 60% della corrente di fase e se il conduttore neutro è:

- della stessa forma e sezione trasversale dei conduttori di linea
- sostenuto in modo identico ai conduttori di linea e con centri di supporto lungo la lunghezza del conduttore non superiore a quella delle fasi
- distanziato ad una distanza dalla fase o dalle fasi più vicine non inferiore a quella tra le fasi

#### *2.5.5.5 Valore e durata della corrente di cortocircuito*

Per tutti i valori nominali di resistenza in cortocircuito, le sollecitazioni dinamiche e termiche devono essere verificate con una corrente presunta  $I_{cp}$  sul lato di alimentazione dell'eventuale dispositivo di protezione specificato pari al valore della corrente nominale di breve durata  $I_{cw}$ , della corrente nominale di resistenza di picco  $I_{pk}$  o della corrente nominale di cortocircuito condizionata  $I_{cc}$ .

Per la verifica di tutti i valori nominali di resistenza ai cortocircuiti, il valore della corrente di cortocircuito potenziale deve essere compreso tra lo 0% e il +5% ad una tensione di prova pari a 1,05 volte la tensione nominale di funzionamento  $U_e$  del circuito. Il valore della corrente di cortocircuito deve essere determinato da un oscillogramma di taratura, che viene portato

con i conduttori di alimentazione al quadro cortocircuitato mediante un collegamento di impedenza trascurabile posto il più vicino possibile all'alimentazione in ingresso del quadro. L'oscillogramma deve indicare un flusso costante di corrente tale da poter essere misurato ad un tempo corrispondente a quello d'intervento del dispositivo di protezione incorporato nel quadro o per una durata specificata.

Il valore della corrente durante la calibrazione è:

- per una prova in AC, il valore RMS della componente AC e la media delle correnti di tutte le fasi in un sistema polifase; o
- per una prova in DC, il valore medio in condizioni sostenute.

Per determinare gli stress elettrodinamici, il valore di corrente di picco dev'essere ottenuta moltiplicando il valore RMS delle applicazioni in AC e il valore medio della corrente di corto circuito delle applicazioni in DC per un fattore  $n$ .

Tutte le prove per applicazioni AC devono essere eseguite alla frequenza nominale del quadro con una tolleranza  $\pm 25\%$ , e con il fattore di potenza, ossia il coseno dell'angolo di sfasamento  $\varphi$  fra la tensione e la corrente, adeguato alla corrente di cortocircuito in accordo con la Tab.6. Le prove per le applicazioni DC devono essere effettuate con DC.

Tabella 6 – Valori per il fattore  $n^a$   
(estratto da EN 61439-1, Tabella 7)

Valore RMS della corrente di corto circuito	$\cos(\varphi)$	$n$
$I \leq 5$	0.7	1.5
$5 < I \leq 10$	0.5	1.7
$10 < I \leq 20$	0.3	2.0
$20 < I \leq 50$	0.25	2.1
$50 < I$	0.2	2.2
<sup>a</sup> I valori di questa tabella rappresentano la maggior parte delle applicazioni. In luoghi speciali, ad esempio in prossimità di trasformatori o generatori, si possono trovare valori più bassi del fattore di potenza, per cui la corrente di picco potenziale massima può diventare il valore limite anziché il valore RMS della corrente di cortocircuito.		

NOTA Il fattore di picco per le applicazioni in DC è soggetto all'accordo tra il fabbricante e l'utilizzatore, diversamente se non definito, viene tipicamente utilizzato il valore  $n=1.42$

- A. Per una prova alla corrente nominale di cortocircuito  $I_{cc}$ , indipendentemente dal fatto che i dispositivi di protezione si trovino nel circuito entrante del quadro o altrove, la tensione di prova deve essere applicata per un tempo sufficientemente lungo da consentire ai dispositivi di protezione dal cortocircuito di funzionare per eliminare il guasto e, in ogni caso, per almeno 10 cicli in AC e 200ms in DC. La prova deve essere effettuata a 1,05 volte la tensione nominale di funzionamento con corrente di cortocircuito presunto sul lato dell'alimentazione del dispositivo di protezione specificato, pari al valore della corrente nominale di cortocircuito condizionale. Non sono consentite prove a tensioni inferiori.

- B. Per una prova alla corrente nominale di resistenza a breve durata e alla corrente nominale di resistenza di picco nominale, le sollecitazioni dinamiche e termiche devono essere verificate con una corrente presunta pari al valore della corrente nominale di resistenza a breve durata e della corrente nominale di picco dichiarata. La corrente deve essere applicata per il tempo specificato durante il quale il valore RMS della componente AC nel caso di una prova in AC, o il valore DC nel caso di una prova in DC, deve rimanere costante.

#### *2.2.5.6 Risultati da ottenere a seguito della corrente di guasto*

Dopo la prova, la deformazione delle barre colletttrici e dei conduttori è accettabile a condizione che siano ancora rispettate i distacchi e le distanze di dispersione specificate. In caso di dubbio, le distanze appena citate vanno misurate.

Le caratteristiche dell'isolamento devono rimanere tali che le proprietà meccaniche e dielettriche dell'apparecchiatura soddisfino i requisiti della pertinente norma di montaggio. Un supporto barra o un supporto per cavi non devono essere separati in due o più pezzi. Inoltre, non devono apparire crepe sui lati opposti di un supporto e non devono apparire cedimenti, comprese le fessure superficiali, che percorrono l'intera lunghezza o larghezza del supporto. In caso di dubbio sul mancato mantenimento delle proprietà isolanti del quadro, deve essere eseguita una prova supplementare di frequenza di potenza a due volte  $U_e$  con un minimo di 1000 V.

Qualsiasi distorsione delle barre colletttrici o della struttura portante del quadro che pregiudichi il normale utilizzo, o il normale inserimento o la rimozione delle parti rimovibili è considerata un guasto.

La deformazione dell'involucro o delle partizioni interne, delle barriere e degli ostacoli dovuta alla corrente di cortocircuito è ammessa nella misura in cui il grado di protezione non sia apparentemente compromesso e le distanze di isolamento o di dispersione non siano ridotte a valori inferiori a quelli specificati.

Inoltre, dopo le prove che incorporano dispositivi di protezione da cortocircuito, il quadro sottoposto a prova deve essere in grado di resistere alla prova di tensione di resistenza alla frequenza di potenza, a un valore di tensione per la condizione di "post-prova" prescritta nella pertinente norma relativa ai dispositivi di protezione da cortocircuito per la prova di cortocircuito appropriata, come segue:

- A. tra tutte le parti sotto tensione e le parti conduttive esposte dell'insieme, e
- B. tra ciascun polo e tutti gli altri poli collegati alle masse del quadro.

Se vengono effettuate le prove A) e B), queste devono essere eseguite con i fusibili sostituiti e con qualsiasi dispositivo di commutazione chiuso.

L'eventuale elemento fusibile non deve indicare una corrente di guasto. Non devono esserci né archi elettrici né fiammate tra i poli del dispositivo di protezione, né tra i poli e l'involucro.

#### *2.2.5.7 Prove sui circuiti di protezione*

Questo test non si applica ai circuiti secondo il punto 2.2.2.

Un'alimentazione di prova monofase deve essere collegata al terminale entrante di una fase e al terminale del conduttore di protezione in ingresso. Quando il quadro è dotato di un conduttore di protezione separato, deve essere utilizzato il conduttore di fase più vicino. Se il quadro è estendibile, il circuito di protezione sottoposto a prova deve comprendere almeno un giunto. Per ciascuna unità rappresentativa in uscita, deve essere effettuata una prova separata con un collegamento di cortocircuito imbullonato tra il corrispondente terminale della fase uscente dell'unità e il terminale del conduttore di protezione in uscita pertinente.

Ogni unità uscente sottoposta a prova deve essere munita del dispositivo di protezione previsto. Se nell'unità uscente possono essere incorporati dispositivi di protezione alternativi, deve essere utilizzato il dispositivo di protezione che lascia passare i valori massimi di corrente di picco e I<sup>2</sup>t.

Per questa prova, la carcassa del quadro deve essere isolata dalla terra. La tensione di prova deve essere pari a 1.05 volte il valore monofase della tensione nominale di funzionamento. A meno che non sia stato concordato diversamente tra il fabbricante e l'utilizzatore, il valore della corrente di prova nel conduttore di protezione deve essere almeno pari al 60 % della corrente di linea durante la prova trifase del quadro.

#### *2.2.5.8 Risultati da ottenere sui circuiti di protezione*

La continuità e la resistenza al cortocircuito del circuito di protezione, che sia costituito da un conduttore separato o dal telaio o dall'involucro del quadro, non deve essere significativamente compromesso. Oltre all'ispezione visiva, ciò può essere verificato mediante misurazioni con una corrente dell'ordine della corrente nominale dell'unità uscente pertinente. La continuità di terra tra le parti conduttive esposte di un apparecchio di classe I e il circuito di protezione deve rimanere efficace. La deformazione dell'involucro o delle partizioni interne, delle barriere e degli ostacoli dovuta alla corrente di cortocircuito è ammessa nella misura in cui il grado di protezione non sia apparentemente compromesso e le distanze di isolamento o di dispersione non siano ridotte a valori inferiori a quelli specificati.

NOTA 1 Se il telaio o l'involucro del quadro sono utilizzati come conduttori di protezione, sono ammesse scintille e riscaldamento localizzato in corrispondenza dei giunti, purché non compromettano la continuità elettrica e che le parti infiammabili adiacenti non si accendano.

NOTA 2 Un confronto delle resistenze misurate prima e dopo la prova, tra il terminale per il conduttore di protezione entrante e il terminale per il conduttore di protezione in uscita pertinente, fornisce un'indicazione di conformità a questa condizione.

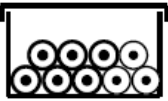




### 2.3 Allegato A

L'allegato tratta operativamente dei parametri dei cavi in rame in base alla posa e all'intervallo di corrente di funzionamento.

Le Tab.A.1 e Tab.A.2 forniscono valori guida per le correnti di funzionamento del cavo in rame unipolare e le perdite di potenza in condizioni ideali all'interno di un quadro. I metodi di calcolo utilizzati per stabilire questi valori sono forniti per consentire il calcolo dei valori per altre condizioni.

Tabella A.1 – Corrente di esercizio e perdita di potenza dei cavi in rame unipolari con una temperatura del conduttore ammissibile di 70 °C (temperatura ambiente all'interno del gruppo: 55 °C)  
(estratto da EN 61439-1, Tabella H.1)

Disposizione dei conduttori							
		Cavi unipolari in una canaletta su una parete, che corrono orizzontalmente e verticalmente. 6 cavi (2 circuiti trifase) a carico continuo		Cavi unipolari, che si toccano liberamente in aria o su una passerella perforata. 6 cavi <sup>e</sup> (2 circuiti trifase) a carico continuo		Distanziamento di almeno un diametro del cavo Cavi unipolari, distanziati orizzontalmente in aria libera	
Area della sezione trasversale del conduttore	Resistenza del conduttore a 20°C, R <sub>20</sub> <sup>a</sup>	Max. corrente di funzionamento, I <sub>max</sub> <sup>b</sup>	Perdite di potenza per conduttore, P <sub>v</sub>	Max. corrente di funzionamento, I <sub>max</sub> <sup>c</sup>	Perdite di potenza per conduttore, P <sub>v</sub>	Max. corrente di funzionamento, I <sub>max</sub> <sup>d</sup>	Perdite di potenza per conduttore, P <sub>v</sub>
[mm <sup>2</sup> ]	[mΩ/m]	[A]	[W/m]	[A]	[W/m]	[A]	[W/m]
0.5	36.0	3.5	0.6	-	-	-	-
0.75	24.5	5.0	0.7	-	-	-	-
1.0	18.1	6.0	0.7	-	-	-	-
1.5	12.1	7.5	0.8	9	1.3	15	3.2
2.5	7.41	10	0.9	13	1.5	21	3.7
4	4.61	14	1.0	18	1.7	28	4.2
6	3.08	18	1.1	23	2.0	36	4.7
10	1.83	24	1.3	32	2.3	50	5.4
16	1.15	33	1.5	44	2.7	67	6.2
25	0.727	43	1.6	59	3.0	89	6.9
35	0.524	54	1.8	74	3.4	110	7.7
50	0.387	65	2.0	90	3.7	134	8.3
70	0.268	83	2.2	116	4.3	171	9.4

95	0.193	101	2.4	142	4.7	208	10.0
120	0.153	117	2.5	165	5.0	242	10.7
150	0.124			191	5.4	278	11.5
185	0.099 1			220	5.7	318	12.0
240	0.075 4			260	6.1	375	12.7
300	0.060 1			301	6.6	432	13.5

<sup>a</sup> Valori da IEC 60228:2004, Tab. 2, col.8 (conduttori a trefoli, rame liscio).

<sup>b</sup> Capacità di carico di corrente  $I_{30}$  per un circuito trifase da IEC 60364-5-52:2009, Tab.B.52.4, col.4 (Metodo di installazione di riferimento: voce B1 della Tab. B.52.1).  $k_2 = 0,8$  (punto 1 della Tab.B.52.17, due circuiti).

<sup>c</sup> Capacità di carico di corrente  $I_{30}$  per un circuito trifase da IEC 60364-5-52:2009, Tab.B.52.10, col.5 (Metodo di installazione: voce F nella col.1 della Tab. B.52.1). Valori per sezioni inferiori a 25 mm<sup>2</sup> calcolati conformemente all'allegato D della IEC 60364-5-52:2009.  $k_2 = 0,88$  (in base all'esperienza, il punto 4 della Tab.B.52.17, due circuiti, è utilizzato in preferenza rispetto alla Tab.B.52.21).

<sup>d</sup> Capacità di carico di corrente  $I_{30}$  per un circuito trifase da IEC 60364-5-52:2009, Tab.B.52.10, col.7 (Metodo di installazione: voce G, col.1 della Tab.B.52.1). Valori per sezioni inferiori a 25 mm<sup>2</sup> calcolati conformemente all'allegato D della IEC 60364-5-52:2009. ( $k_2 = 1$ ).

<sup>e</sup> I coefficienti si basano su cavi ad orientamento orizzontale in quanto hanno un impatto trascurabile sui cavi ad orientamento verticale all'interno di un quadro.

$$I_{max} = I_{30} k_1 k_2$$

$$P_v = I_{max}^2 R_{20} \cdot [1 + \alpha \cdot (T_c - 20^\circ C)]$$

dove

$k_1$  Fattore di riduzione della temperatura dell'aria all'interno dell'involucro attorno ai conduttori (IEC 60364-5-52:2009, Tab.B.52.14)

$k_1 = 0.61$  per la temperatura dei conduttori a 70°C, temperatura ambiente 55°C

$k_2$  Fattore di riduzione per gruppi di più di un circuito

$R_{20}$  Resistenza alla temperatura di 20°C

$\alpha$  Coefficiente di temperatura  $\alpha = 0.004 K^{-1}$

$T_c$  Temperatura del conduttore [°C]

$I_{30}$  Massima corrente di funzionamento di un singolo conduttore per la temperatura dell'aria intorno al conduttore a 30 °C

Se la corrente di esercizio nella Tab.A.1 viene convertita per altre temperature dell'aria utilizzando il fattore di riduzione  $k_1$ , le perdite di potenza corrispondenti devono essere calcolate utilizzando la formula sopra riportata.

Tabella A.2 – Fattore di riduzione  $k_1$  per cavi con una temperatura del conduttore ammissibile di 70 °C  
(estratto da IEC 60364-5-52:2009, Tabella B.52.14)



Temperatura dell'aria all'interno della custodia, attorno al conduttore [°C]	Fattore di riduzione $k_1$
20	1,12
25	1,06
30	1,00
35	0,94
40	0,87
45	0,79
50	0,71
55	0,61
60	0,50

## 2.4 Allegato B

L'allegato tratta la corrente di funzionamento e perdita di potenza delle barre di rame nude. Le Tab.B.1 e Tab.B.2 forniscono i valori delle correnti di funzionamento dei conduttori e delle perdite di potenza in condizioni ideali all'interno di un quadro. Il seguente allegato non si applica ai conduttori verificati mediante prove.

Tabella B.1 – Corrente di funzionamento e perdita di potenza delle barre di rame nude a sezione rettangolare, posizionate orizzontalmente e disposte con la loro faccia più grande verticale, frequenza da 50Hz a 60Hz (temperatura dell'aria ambiente all'interno del gruppo: 55 °C, temperatura del conduttore 70 °C)

(estratto da EN 61439-1, Tabella K.1)

Altezza × spessore delle barre	Area della sezione trasversale della barra	Una barra per linea 			Due barre per linea 		
		$k_3$	Corrente di funzionamento [A]	Perdite di potenza per conduttore di linea, $P_v$ [W/m]	$k_3$	Corrente di funzionamento [A]	Perdite di potenza per conduttore di linea, $P_v$ [W/m]
12 × 2	23.5	1.00	70	4.5	1.01	118	6.4
15 × 2	29.5	1.00	83	5.0	1.01	138	7.0
15 × 3	44.5	1.01	105	5.4	1.02	183	8.3
20 × 2	39.5	1.01	105	6.1	1.01	172	8.1
20 × 3	59.5	1.01	133	6.4	1.02	226	9.4
20 × 5	99.1	1.02	178	7.0	1.04	325	11.9
20 × 10	199	1.03	278	8.5	1.07	536	16.6
25 × 5	124	1.02	213	8.0	1.05	381	13.2
30 × 5	149	1.03	246	9.0	1.06	437	14.5
30 × 10	299	1.05	372	10.4	1.11	689	18.9
40 × 5	199	1.03	313	10.9	1.07	543	17.0
40 × 10	399	1.07	465	12.4	1.15	839	21.7
50 × 5	249	1.04	379	12.9	1.09	646	19.6
50 × 10	499	1.08	554	14.2	1.18	982	24.4
60 × 5	299	1.05	447	15.0	1.10	748	22.0
60 × 10	599	1.10	640	16.1	1.21	1118	27.1
80 × 5	399	1.07	575	19.0	1.13	943	27.0

80 × 10	799	1.13	806	19.7	1.27	1372	32.0
100 × 5	499	1.10	702	23.3	1.17	1125	31.8
100 × 10	999	1.17	969	23.5	1.33	1642	37.1
120 × 10	1200	1.21	1131	27.6	1.41	1859	43.5

La corrente nominale indicata nella Tab.B.1 deve essere ridotta del 20% per le barre collettrici che corrono orizzontalmente e disposte con la loro faccia più grande orizzontale o verticale per più di 2 m.

$$P_v = \frac{I^2 \cdot k_3}{\kappa \cdot A} \cdot [1 + \alpha \cdot (T_c - 20^\circ C)]$$

dove

$P_v$  Perdita di potenza per metro

$I$  Corrente d'utilizzo

$k_3$  Fattore di correzione

$\kappa$  Conducibilità del rame,  $\kappa = 56 \frac{m}{\Omega \times mm^2}$

$A$  Sezione trasversale della barra

$\alpha$  Coefficiente di temperatura  $\alpha = 0.004 K^{-1}$

$T_c$  Temperatura del conduttore [°C]

Per un conduttore in cui la verifica avviene mediante calcolo, la temperatura di progetto del conduttore non deve superare 90 °C. Temperature più elevate possono essere accettate se è stata precedentemente eseguita una prova in un progetto di riferimento.

Le correnti di funzionamento possono essere convertite per altre temperature dell'aria ambiente all'interno del e/o per una temperatura del conduttore di 90°C moltiplicando i valori della Tab.B.1 per il fattore corrispondente  $k_4$  della Tab.B.2. Quindi le perdite di potenza devono essere calcolate utilizzando la formula sopra indicata di conseguenza.

Tabella B.2 – Fattore  $k_4$  per differenti valori della temperatura ambiente dell'aria all'interno del quadro e/o dei conduttori  
(estratto da EN 61439-1, Tabella K.2)

Temperatura dell'aria all'interno dell'involucro intorno ai conduttori °C	Fattore $k_4$	
	Temperatura del conduttore a 70°C	Temperatura del conduttore a 90°C
20	2.08	2.49
25	1.94	2.37
30	1.82	2.26
35	1.69	2.14
40	1.54	2.03
45	1.35	1.91
50	1.18	1.77
55	1.00	1.62
60	0.77	1.48

Si deve considerare che a seconda della progettazione del quadro, possono verificarsi variazioni di temperatura dell'ambiente in funzione della corrente dei conduttori . La verifica dell'effettivo aumento di temperatura in queste condizioni deve essere determinata mediante prova.

*Esempio nella determinazione della sezione di un conduttore*

*Parametri:*

- Corrente nominale di una barra:  $I_n = 200A$
- Temperatura all'interno dell'involucro: 60°C
- Limite di temperatura concessa ai conduttori: 90°C
- La barra non fa parte dell'unità funzionale
- Lunghezza inferiore a 2 m

*Siccome la barra non è facente parte dell'unità funzionale, non è previsto un sovradimensionamento della corrente nominale (125% dell' $I_n$ ). Dalla Tab.B.2 si dividono i 200A per il corrispettivo coefficiente alla temperatura dell'involucro a 60°C e della temperatura del conduttore a 90°C, cioè per 1.48 e si ricava una corrente equivalente di 135.14 A. Dalla Tab.B.1, la corrente di funzionamento per una singola barra che più si avvicina per eccesso è pari a 178A e ne comporta una sezione pari 20x5 [mm]. Se invece si desidera optare per una doppia barra, allora si procede con una corrente pari a 172A, con una sezione pari a 20x2 [mm].*

## 2.5 Allegato C

L'allegato descrive un metodo per valutare la tenuta al cortocircuito delle barre colletttrici di un quadro mediante un confronto tra un quadro da valutare e un quadro già verificato mediante prova.

Esistono strutture la cui disposizione e attrezzatura sono documentate da disegni, elenchi di parti e descrizioni nel certificato di prova (Fig.C.1 TS); ed esistono strutture che richiedono la verifica della resistenza al cortocircuito (Fig.C.2 NTS)

Figura C.1 – Strutture barre testata (TS)  
(estratto da EN 61439-1, Figura M.1)

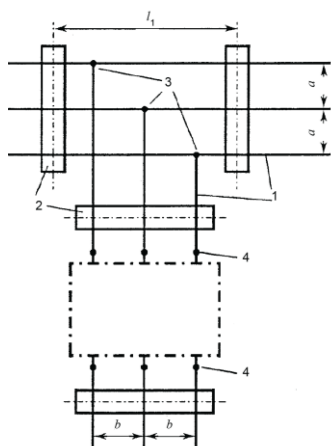
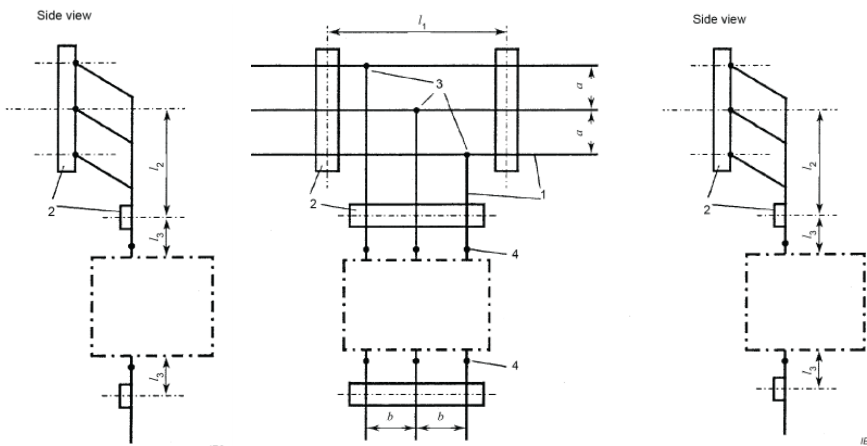


Figura C.2 – Struttura barre non testata (NTS)  
(estratto da EN 61439-1, Figura M.2)

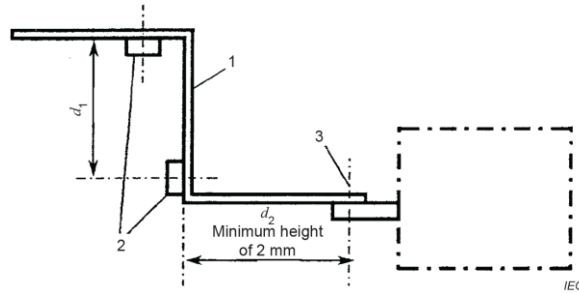


La capacità di tenuta al cortocircuito di una struttura barra derivata, cioè un NTS, viene verificata da una struttura di barre (TS) testata applicando calcoli secondo IEC 60865-1 a entrambe le strutture. La tenuta al cortocircuito dell'NTS è considerata verificata se i calcoli mostrano che l'NTS non deve sopportare sollecitazioni meccaniche e termiche più elevate rispetto alla struttura testata.

Le modifiche dei parametri, quali i giochi meccanici tra le barre, la sezione trasversale delle barre e la loro configurazione, sono consentite solo nella misura in cui sono rispettate le seguenti condizioni:

- La corrente di cortocircuito può essere modificata solo a valori inferiori
- L'intensità termica di cortocircuito di un NTS deve essere verificata mediante calcoli conformemente alla norma IEC 60865-1. L'aumento di temperatura calcolato dell'NTS non deve essere superiore a quello del TS
- Non sono consentite modifiche di materiale o di forma dei supporti di un quadro verificato mediante
- Il tipo di collegamento delle barre e delle apparecchiature deve essere stato precedentemente verificato mediante prova
- La norma IEC 60865-1 è applicabile solo alle configurazioni con barre colletttrici diritte, perciò le configurazioni angolari delle barre, possono essere considerate come una serie di configurazioni diritte quando i supporti sono forniti agli angoli

Figura 15 - Configurazione angolare barra collettrice  
(estratto da EN 61439-1, Figura M.3)



- 1 barra
- 2 supporto
- 3 collegamento dell'apparecchiatura
- $d_1, d_2$  distanza dei supporti

- Per i calcoli conformi alla IEC 60865-1 sulla struttura sottoposta a prova (TS), devono essere utilizzati i seguenti valori dei fattori  $V_\sigma$ ,  $V_{\sigma s}$  e  $V_F$ :

$$V_\sigma = V_{\sigma s} = V_F = 1.0$$

mentre per l'NTS:

$$V_\sigma = V_{\sigma s} = 1.0$$

$V_F$  è risultato da calcoli in conformità con la norma IEC 60865-1, ma se  $V_F < 1.0$ , allora deve essere sostituito con  $V_F = 1.0$ .

Di seguito viene riportata una tabella riassuntiva delle varie grandezze fondamentali per la trattazione.

Tabella 7 - Definizioni dei rapporti delle diverse forze fisiche

Simbolo	Descrizione
$V_\sigma$	Rapporto tra la sollecitazione dinamica e statica del conduttore principale
$V_{\sigma s}$	Rapporto tra stress del subconduttore dinamico e statico
$V_{\sigma m}$	Rapporto tra contributo dinamico e statico della sollecitazione del conduttore principale
$V_{rm}$	Rapporto tra sollecitazione dinamica (forze sui supporti, contributo della sollecitazione di flessione del conduttore principale) causata da forze tra conduttori principali con richiusura automatica trifase non riuscita e sollecitazione dinamica con richiusura automatica trifase riuscita
$V_{rs}$	Rapporto tra il contributo della sollecitazione dinamica causata dalle forze tra subconduttori con richiusura automatica trifase non riuscita e l'apporto della sollecitazione dinamica con richiusura automatica trifase riuscita
$V_F$	Rapporto tra forza dinamica e statica sul supporto



## **CAPITOLO 3**

### 3 Normativa sulle sollecitazioni elettrodinamiche EN 60865-1:2012

La norma EN 60865-1 è applicabile agli effetti meccanici e termici delle correnti di cortocircuito. Contiene procedure per il calcolo del:

- l'effetto elettromagnetico su conduttori rigidi e conduttori flessibili
- l'effetto termico sui conduttori nudi

In questa norma si andranno quindi ad analizzare gli effetti della corrente di cortocircuito sui conduttori rigidi e flessibili. Con i metodi di calcolo presentati in questo standard si valuteranno:

- sollecitazioni sui conduttori rigidi
- forze di trazione in conduttori flessibili
- forze sugli isolatori e sulle sottostrutture che potrebbero essere esposti a flessione, tensione e/o compressione
- spostamenti di campata di conduttori flessibili
- riscaldamento dei conduttori

Le forze elettromagnetiche sono indotte nei conduttori dalle correnti che li attraversano.

Quando tali forze elettromagnetiche interagiscono su conduttori paralleli, causano sollecitazioni che devono essere prese in considerazione. Quando i conduttori paralleli sono lunghi rispetto alla distanza tra loro, le forze saranno distribuite uniformemente lungo i conduttori e sono date dall'equazione:

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} i_1 i_2 \frac{l}{a}$$

dove

$i_1$  e  $i_2$  Valori istantanei delle correnti nei conduttori

$l$  Distanza mediana tra i supporti

$a$  Distanza mediana tra i conduttori

Quando le correnti nei due conduttori hanno la stessa direzione, le forze sono attraenti.

Quando le direzioni delle correnti sono opposte, le forze sono repulsive.

#### 3.1 Conduttori rigidi

A seconda del tipo di supporto e del numero di supporti delle barre, le sollecitazioni nei conduttori e le forze sui supporti saranno diverse per la stessa corrente di cortocircuito.

Le sollecitazioni nei conduttori e le forze sui supporti dipendono anche dal rapporto tra la frequenza naturale rilevante del sistema meccanico e la frequenza dell'impianto elettrico. Nel caso della risonanza o vicino alla risonanza, le sollecitazioni e le forze nel sistema possono essere amplificate. Se  $f_{cm} / f < 0.5$  la risposta del sistema diminuisce e le sollecitazioni massime sono nelle fasi esterne.

##### *3.1.1 Calcolo delle forze*

In un sistema trifase con i conduttori principali disposti con la stessa linea centrale distanziate sullo stesso piano, la forza massima che agisce sul conduttore principale centrale durante un cortocircuito trifase ed è data da:

$$F_{m3} = \frac{\mu_0 \sqrt{3}}{2\pi} \frac{i_p^2 l}{a_m} \quad \text{con} \quad i_p = \kappa \sqrt{2} I_k''$$

dove

$i_p$  Valore di picco della corrente di cortocircuito nel caso di un cortocircuito trifase bilanciato. Il calcolo è ottenuto dalla EN 60909 – 0

$l$  Distanza massima tra i supporti adiacenti

$a_m$  Distanza effettiva tra i conduttori principali

$\kappa$  Fattore per il calcolo della corrente di picco di cortocircuito

$I_k''$  Corrente di cortocircuito simmetrica iniziale (RMS)

$\frac{cU_n}{\sqrt{3}}$  Sorgente di tensione equivalente nel punto di cortocircuito

$Z_k$  Impedenza equivalente di corto circuito  $Z_k = R_k + jX_k$

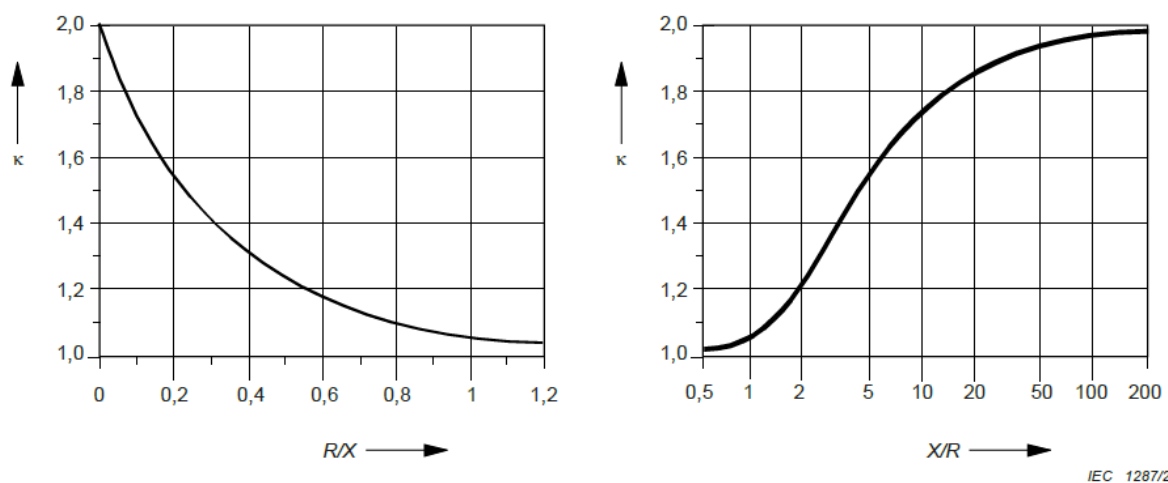
$R_k$  Somma delle resistenze connesse in serie del sistema di successione positiva

$X_k$  Somma delle reattanza connesse in serie del sistema di successione positiva

Il fattore  $\kappa$  è ottenibile tramite calcolo oppure tramite il rapporto  $R/X$  o  $X/R$  dalla [Fig.16](#):

$$\kappa = 1.02 + 0.98e^{-3 R/X}$$

Figura 16 - fattore  $\kappa$  in funzione del rapporto  $R/X$  e  $X/R$   
(estratto da IEC 60909-0, Figura 15)



IEC 1287/2000

La corrente di cortocircuito simmetrica iniziale è data da:

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_k} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} \sqrt{R_k^2 + X_k^2}}$$

Di seguito in Fig.17, viene illustrato un diagramma di un circuito equivalente a titolo di esempio con la serie di resistenze e reattanze fino alla sorgente di tensione equivalente nel punto di cortocircuito.

Figura 17 - Circuito equivalente  
(estratto da EN 60909-0, Figura 4b)

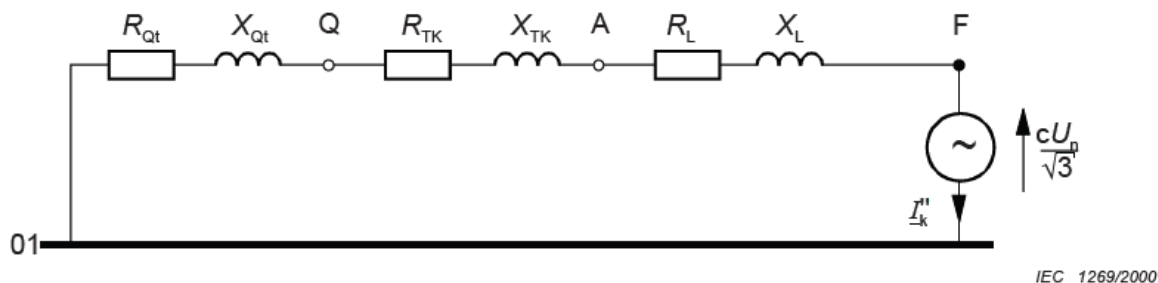


Tabella 8 - Fattore di tensione  $c$   
(estratto da IEC 60909-0, Tabella 1)

Tensione nominale $U_n$	Fattore di tensione $C$ il calcolo della	
	massima corrente di cortocircuito $C_{max}$	minima corrente di cortocircuito $C_{min}$
Bassa tensione da 100V a 1000V	1.05 <sup>1)</sup> 1.10 <sup>2)</sup>	0.95

<sup>1)</sup> Per sistemi BT con una tolleranza del +6 %, ad esempio sistemi rinominati da 380 V a 400 V.  
<sup>2)</sup> Per sistemi BT con una tolleranza del +10%.

La forza massima che agisce tra i conduttori in cui scorre la corrente di cortocircuito durante un cortocircuito linea-linea in un sistema trifase o in un sistema monofase a due linee è data da:

$$F_{m2} = \frac{\mu_0}{2\pi} i_{p2}^2 \frac{l}{a_m} \quad \text{con} \quad i_{p2} = \kappa \sqrt{2} I_{k2}''$$

La corrente di cortocircuito linea-linea simmetrica iniziale è data da:

$$I_{k2}'' = \frac{\sqrt{3}}{2} I_k''$$

dove

- $i_{p2}$  Corrente di picco di cortocircuito nel caso di un cortocircuito linea-linea
- $I_{k2}''$  Corrente di cortocircuito linea-linea simmetrica iniziale (RMS)

La forza massima agisce sui subconduttori esterni ed è compresa tra due pezzi di collegamento adiacenti data da:

$$F_s = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{i_p}{n}\right)^2 \frac{l_s}{a_s}$$

dove

- $n$  Numero di subconduttori
- $l_s$  Distanza massima esistente tra due elementi di un collegamento adiacente
- $a_s$  Distanza effettiva tra subconduttori
- $i_p$  Equivale alla  $i_p$  in un sistema trifase o ad  $i_{p2}$  per un sistema linea-linea

### 3.1.2 Distanza effettiva tra i conduttori principali e tra i subconduttori

Le forze tra conduttori in cui scorrono correnti di un cortocircuito, dipendono dalla configurazione geometrica e dal profilo dei conduttori. Per questo motivo si definisce la distanza effettiva " $a_m$ " tra i conduttori principali e sottoconduttori. Adesso verranno considerate per ogni sottocaso.

Distanza effettiva  $a_m$  tra conduttori principali complanari con la distanza della linea centrale a:

- Conduttori principali unipolari con sezione circolare:

$$a_m = a$$

- Conduttori principali con sezione rettangolare e conduttori principali composto da subconduttori a sezione rettangolare:

$$a_m = \frac{a}{k_{12}}$$

$k_{12}$  va definito dalla [Fig.3](#), con  $a_{1s} = a$ ,  $b_m$  e  $c_s = c_m$ .

Distanza effettiva  $a_s$  tra gli  $n$  subconduttori complanari di un conduttore principale:

- Subconduttori a sezione circolare:
- 

$$\frac{1}{a_s} = \sum_{j=2}^n \frac{1}{a_{1j}}$$

- Subconduttori a sezione rettangolare:  
Alcuni valori per  $a_s$  sono riportati nella [Tab.9](#). Per altre distanze e dimensioni del subconduttore l'equazione risulta essere:

$$\frac{1}{a_s} = \sum_{j=2}^n \frac{k_{1j}}{a_{1j}}$$

I valori da  $k_{12}$  a  $k_{1n}$ , vanno determinati dalla [Fig.18](#).

Figura 18 – Fattore  $k_{1s}$  per il calcolo della distanza effettiva del conduttore (estratto da EN 60865-1, Figura 1)

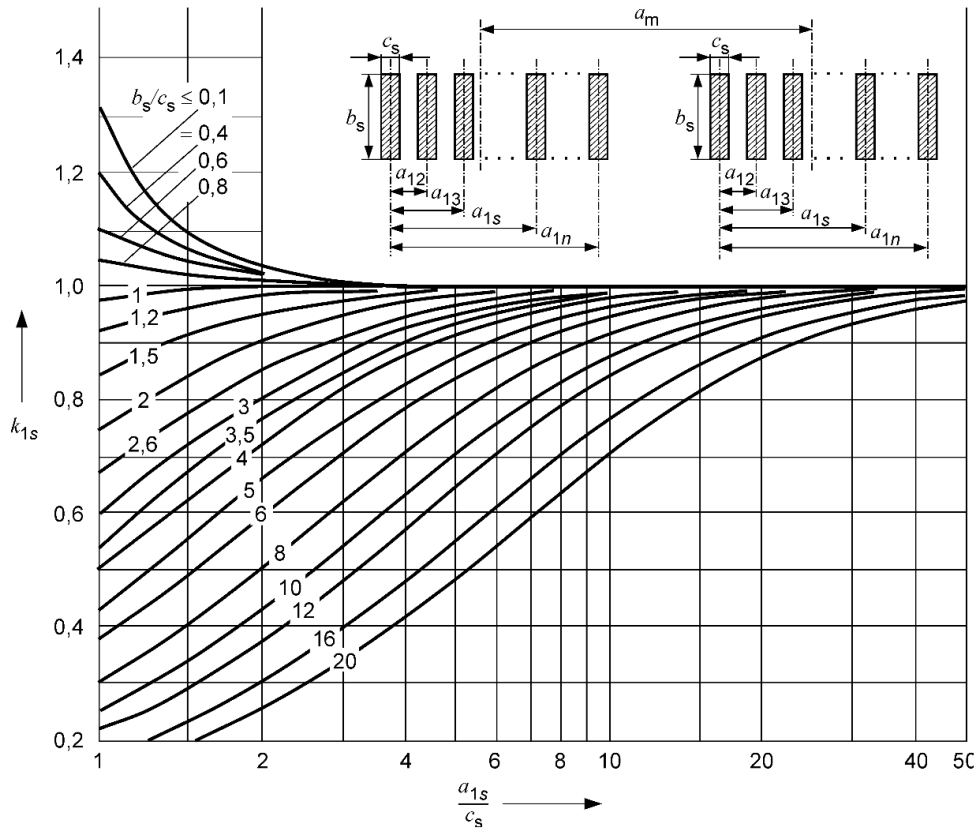
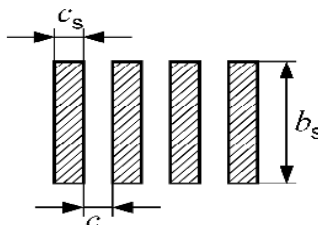
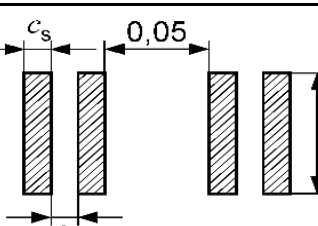


Tabella 9 – Distanza effettiva  $a_s$  tra i subconduttori con sezione rettangolare (estratto da EN 60865-1, Tabella 1)

Sezione rettangolare	$\frac{b_s}{c_s}$	0.04	0.05	0.06	0.08	0.10	0.12	0.16	0.20
	0.005	0.020	0.024	0.027	0.033	0.040	-	-	-
	0.010	0.028	0.031	0.034	0.041	0.047	0.054	0.067	0.080
	0.005	-	0.013	0.015	0.018	0.022	-	-	-
	0.010	0.017	0.019	0.020	0.023	0.027	0.030	0.037	0.043

	0.005	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.010	0.014	0.015	0.016	0.018	0.020	0.022	0.026	0.031
	0.005	-	0.014	0.015	0.018	0.020	-	-	-
	0.010	0.017	0.018	0.020	0.022	0.025	0.027	0.032	-
Tutte le dimensioni sono date in metri [m]									

### 3.1.3 Calcolo della massima tensione interna

I conduttori devono essere fissati in modo che le forze assiali possano essere ignorate. Sotto questa ipotesi le forze agenti sono forze di flessione.

- Lo sforzo di flessione causato dalle forze tra i conduttori principali è dato da:

$$\sigma_{m,d} = V_{\sigma m} V_{r m} \beta \frac{F_m l}{8 W_m}$$

dove

$\beta$  Fattore di stress del conduttore principale

$F_m$  Valore di  $F_{m3}$  o  $F_{m2}$  in base al tipo di sistema preso in considerazione

$W_m$  Modulo della sezione del conduttore principale e deve essere calcolato rispetto a la direzione delle forze tra i conduttori principali

- Lo sforzo di flessione causato dalle forze tra i subconduttori è dato da:

$$\sigma_{s,d} = V_{\sigma s} V_{r s} \beta \frac{F_s l_s}{16 W_s}$$

dove

$W_s$  Modulo della sezione del subconduttore e deve essere calcolato rispetto alla direzione delle forze tra i subconduttori.

$V_{\sigma m}$ ,  $V_{\sigma s}$ ,  $V_{r m}$  e  $V_{r s}$  sono i fattori che tengono conto dei fenomeni dinamici e  $\beta$  è un fattore dipendente dal tipo e dal numero dei supporti. Il fattore  $\beta$  descrive la riduzione della sollecitazione di flessione nel punto dei suoi supporti, tenendo conto della deformazione plastica del conduttore. Il valore massimo possibile di  $V_{\sigma m}$ ,  $V_{\sigma s}$ ,  $V_{r m}$  e  $V_{r s}$  va determinato dalla Tab.10 mentre il fattore  $\beta$  va determinato dalla Tab.11.

Campate non uniformi di travi continue, possono essere trattate con un sufficiente grado di accuratezza come la lunghezza della campata massima. Ne consegue che:

- i supporti terminali non sono sottoposti a sollecitazioni maggiori rispetto a quelli interni
- bisogna evitare lunghezze di campata inferiori al 20% di quelle adiacenti. Se ciò non è possibile, i conduttori devono essere disaccoppiati utilizzando giunti flessibili sui supporti. Se c'è un giunto flessibile all'interno di una campata, la lunghezza di questa campata deve essere inferiore al 70% delle lunghezze delle campate adiacenti.

Se non è evidente se una trave sia supportata o fissa, si deve tener conto del caso peggiore.

Tabella 10 – Valori massimi possibili di  $V_{\sigma m}$   $V_{r m}$   $V_{\sigma s}$   $V_{r s}$   $V_F$   $V_{r m}$   
(estratto da EN 60865-1, Tabella 2)

Tipologia di cortocircuito	Sistema															
	Senza richiusura automatica trifase	Con richiusura automatica trifase		Con e senza richiusura trifase automatica												
	$V_{\sigma m}$ $V_{r m}$ $V_{\sigma s}$ $V_{r s}$	$V_{\sigma m}$ $V_{r m}$ $V_{\sigma s}$ $V_{r s}$		$V_F$ $V_{r m}$												
		primo flusso di corrente	secondo flusso di corrente													
linea a linea	1.0	1.0	1.8	<div style="display: flex; align-items: center;"> <table style="border-collapse: collapse; margin-right: 10px;"> <tr> <td style="padding: 5px;">2,0</td> <td style="padding: 5px;">for</td> <td style="padding: 5px;"><math>\frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y} \leq 0,5</math></td> <td style="border-left: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">1</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;"><math>\frac{0,8 f_y}{\sigma_{tot,d}}</math></td> <td style="padding: 5px;">for</td> <td style="padding: 5px;"><math>0,5 &lt; \frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y} &lt; 1,0</math></td> <td style="border-left: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">2</td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;">1,0</td> <td style="padding: 5px;">for</td> <td style="padding: 5px;"><math>1,0 \leq \frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y}</math></td> <td style="border-left: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">3</td> </tr> </table> <div style="text-align: right;">range</div> </div>	2,0	for	$\frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y} \leq 0,5$	1	$\frac{0,8 f_y}{\sigma_{tot,d}}$	for	$0,5 < \frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y} < 1,0$	2	1,0	for	$1,0 \leq \frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y}$	3
2,0	for	$\frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y} \leq 0,5$	1													
$\frac{0,8 f_y}{\sigma_{tot,d}}$	for	$0,5 < \frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y} < 1,0$	2													
1,0	for	$1,0 \leq \frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y}$	3													



				$2,7$ for $\frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y} \leq 0,37$ $\frac{0,8 f_y}{\sigma_{tot,d}}$ for $0,37 < \frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y} < 1,0$ $1,0$ for $1,0 \leq \frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y}$	range 1 2 3
trifase	1.0	1.0	1.8		

Tabella 11 - Fattori  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  per diverse disposizioni di supporti delle barre  
(estratto da EN 60865-1, Tabella 3)

Tipo di trave e supporto			$\alpha$	$\beta^a$	$\gamma$
Trave a campata singola	A e B: supporti semplici		A: 0.5 B: 0.5	1.0	1.57
	A: supporto fisso B: supporto semplice		A: 0.625 B: 0.375	0.73	2.45
	A e B: supporti fissi		A: 0.5 B: 0.5	0.5	3.56
Trave continua con supporti semplici equidistanti	2 campate		A: 0.375 B: 1.250	0.73	2.45
	3 o più campate		A: 0.4 B: 1.1	0.73	3.56
<sup>a</sup> Effetti plastici inclusi					

Lo stress di flessione e di conseguenza, la resistenza meccanica del conduttore, dipende dalla sezione. Nella seguente tabella viene riassunto come varia il fattore  $q$  di plasticità in base alle differenti direzioni del carico sulla trave.

Tabella 12 - Fattore q dipendente dalla direzione del carico  
(estratto da EN 60865-1, capitolo 5.4.2)

Direzione del carico		Sezione trave	Fattore q
Carico lungo la superficie	a)	Sezione rettangolare	q = 1.5
		Sezione ad U ed I	q = 1.19
Carico perpendicolare alla superficie	b)	Sezione rettangolare	q = 1.5
		Sezione ad U ed I	q = 1.83

Tabella 13 - Fattore q dipendente dalla sezione trasversale della barra  
(estratto da EN 60865-1, Tabella 4)

Sezione trasversale			
	q = 1.5		q = 1.83
			q = 1.19
	q = 1.7		
	$q = 1,7 \frac{1 - (1 - 2t/d)^3}{1 - (1 - 2t/d)^4}$		
	$q = 1,5 \frac{1 - (1 - 2t/d)^3}{1 - (1 - 2t/d)^4}$		

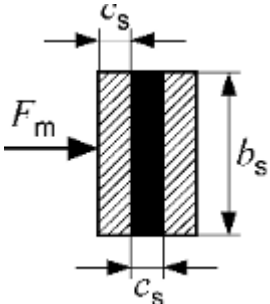
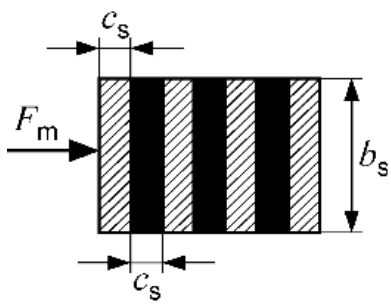
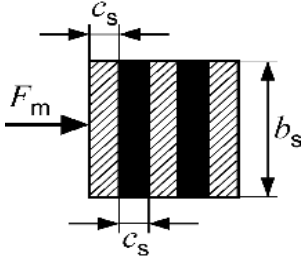
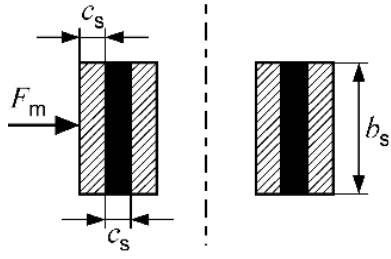
Il fattore q è valido per l'asse di piegatura tratteggiato. Le forze sono perpendicolari ad esso.

Quando, entro una distanza supportata, ci sono due o più elementi di irrigidimento, possono essere utilizzati valori più alti dei moduli di sezione:

- Per i conduttori principali composti da sottoconduttori di sezione rettangolare con uno spazio tra le barre pari allo spessore della barra, i moduli di sezione sono indicati in Tab.14
- Per i gruppi conduttori con sezioni trasversali U e I, deve essere utilizzato il 50% dei moduli di sezione rispetto all'asse 0-0.

Tabella 14 - Moduli di sezione  $W_m$  di conduttori principali con due o più elementi di irrigidimento tra due supporti adiacenti

(estratto da EN 60865-1, Tabella 5)

Sezioni rettangolari	$W_m$	Sezioni rettangolari	$W_m$
	$0.867 c_s^2 b_s$		$3.48 c_s^2 b_s$
	$1.98 c_s^2 b_s$		$1.73 c_s^2 b_s$
Gli elementi di irrigidimento sono colorati di nero.			

Si presume che un singolo conduttore resista alle forze di cortocircuito quando:

$$\sigma_{m,d} \leq q f_y$$

dove

$f_y$  corrisponde allo stress del punto di snervamento

Il fattore  $q$ , descrive l'aumento della sollecitazione ammissibile del conduttore grazie al suo comportamento plastico in punti al di fuori dei suoi supporti tenendo conto della forma del conduttore.

Quando un conduttore principale è costituito da 2 o più subconduttori, allora lo stress totale è dato da:

$$\sigma_{tot,d} = \sigma_{m,d} + \sigma_{s,d}$$

Il conduttore si presume che resista alle forze di cortocircuito quando:

$$\sigma_{tot,d} \leq q f_y$$

È necessario verificare che il cortocircuito non influisca troppo sulla distanza tra i subconduttori, è raccomandato verificare che:

$$\sigma_{sd} \leq f_y$$

Per  $\sigma_{m,d} = q f_y$  e  $\sigma_{tot,d} = q f_y$  possono verificarsi piccole deformazioni permanenti, circa l'1% della distanza tra i supporti per i valori  $q$  secondo la Tab.13, che non compromettono la sicurezza del funzionamento fintantoché non vengono violati i requisiti costruttivi degli spazi minimi tra i conduttori.

La forza statica equivalente  $F_{r,d}$  sui supporti dei conduttori rigidi deve essere calcolata come:

$$F_{r,d} = V_F V_{rm} \alpha F_m$$

Con  $F_m$  che corrisponde a  $F_{m3}$  per i sistemi trifase e  $F_{m2}$  per i sistemi linea-linea.

I valori massimi possibili di  $V_F V_{rm}$  sono determinati dalla Tab.10, mentre  $\alpha$  dalla Tab.11.

L'intensità della forza  $F_{r,d}$  non deve essere superiore al valore di tenuta indicato dal costruttore dei supporti e degli isolatori. Per un isolatore sollecitato da una forza di flessione, il valore di resistenza nominale è dato come una forza che agisce sulla testa dell'isolatore.

Per una forza che agisce in un punto superiore alla testa dell'isolatore, è necessario utilizzare un valore di resistenza inferiore al valore di resistenza nominale, basato sul momento flettente di resistenza alla sezione trasversale critica dell'isolatore.

### 3.2 Conduttori flessibili

Negli impianti con conduttori flessibili, le sollecitazioni che si verificano nei cortocircuiti linea-linea e nei cortocircuiti trifase bilanciati sono approssimativamente uguali. Tuttavia, per i cortocircuiti linea-linea, l'oscillazione del conduttore si traduce in genere in una diminuzione delle distanze minime (cioè quando i conduttori adiacenti che trasportano corrente di cortocircuito si spostano l'uno verso l'altro dopo il cortocircuito).

#### 3.2.1 Calcolo della forza di trazione

Le seguenti sezioni sono valide per cavi orizzontali disposti fianco a fianco. In altre disposizioni, possono verificarsi forze di trazione più piccole. A causa dello sforzo di tali calcoli, si consiglia di utilizzare l'equazione data anche in questi casi.

Le seguenti equazioni si applicano alle lunghezze della campata fino a circa 120 m e ai rapporti tra abbassamento e lunghezza della campata a circa l'8 %.

Il carico elettromagnetico caratteristico per unità di lunghezza sui conduttori principali flessibili in sistemi trifase è dato:

- Se la corrente scorre lungo tutta la lunghezza della campata del conduttore principale con e senza sostegno:

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} 0.75 \frac{I_k'^2 l_c}{a l}$$

- Se la corrente percorre solo metà del conduttore, l'equazione diventa:

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} 0.75 \frac{I_k'^2 l_c/2 + l_v/2}{l}$$

dove

- $I_k'$  Corrente iniziale di cortocircuito simmetrica trifase (RMS)
- $a$  Distanza della linea centrale tra i punti medi del conduttore principale
- $l_c$  Lunghezza del cavo del conduttore principale nella campata
- $l_v$  Lunghezza del cavo del conduttore verticale

Se i conduttori sono allentati ed esercitano forze di flessione nel sostegno  $l_c = l$ . Per conduttori tesi  $l_c = l - 2l_i$ , dove  $l_i$  è la lunghezza della catena di isolatori.

Un parametro importante è il rapporto tra forza elettromagnetica e quella di gravità:

$$r = \frac{F'}{n m'_s g}$$

dove

- $n$  Numero di subconduttori
- $m'_s$  Massa per unità di lunghezza dei subconduttori
- $g$  Accelerazione gravitazionale  $g = 9.81 \text{ N/m}$

Questo permette di calcolare la direzione della forza totale risultante:  $\delta_1 = \tan^{-1}(r)$ .  
L'abbassamento del conduttore in mezzzeria nelle condizioni statiche è dato da:

$$f_{es} = \frac{n m'_s g l^2}{8 F_{st}}$$

dove

$F_{st}$  Forza di trazione statica

Un'altra equazione che la norma fornisce è quella per il calcolo del periodo T di oscillazioni del conduttore. Senza che sia percorso da corrente e nel caso di un basso angolo di oscillazione si ha:

$$T = 2\pi \sqrt{0.8 \frac{f_{es}}{g}}$$

Invece il periodo calcolato con la corrente di cortocircuito, si calcola nel modo seguente:

$$T_{res} = \frac{T}{\sqrt[4]{1+r^2} \left(1 - \frac{\pi^2}{64} \left(\frac{\delta_1}{90^\circ}\right)^2\right)}$$

dove  $\delta_1$  va espresso in gradi.

Il modulo di rigidità si ottiene tramite:

$$N = \frac{1}{S l} + \frac{1}{n E_{eff} A_s}$$

dove

S Costante elastica

$A_s$  Sezione del conduttore

$E_{eff}$  Modulo di Young effettivo che viene calcolato nel modo seguente:

$$E_{eff} = \begin{cases} E \left[ 0,3 + 0,7 \sin \left( \frac{F_{st}}{n A_s \sigma_{fin}} 90^\circ \right) \right] & \text{for } \frac{F_{st}}{n A_s} \leq \sigma_{fin} \\ E & \text{for } \frac{F_{st}}{n A_s} > \sigma_{fin} \end{cases}$$

Con  $\sigma_{fin} = 50 \cdot 10^6 \frac{N}{m^2}$  che consiste nel valore minimo della tensione del cavo per cui il modulo di Young diventa costante.

Il fattore di stress  $\zeta$  del conduttore principale si calcola come:

$$\zeta = \frac{(n g m'_s l)^2}{24 F_{st}^3 N}$$

Durante o alla fine del flusso di corrente di cortocircuito, la campata avrà oscillato dalla posizione stazionaria all'angolo dato da:

$$\delta_{\text{end}} = \begin{cases} \delta_1 \left[ 1 - \cos \left( 360^\circ \frac{T_{k1}}{T_{\text{res}}} \right) \right] & \text{for } 0 \leq \frac{T_{k1}}{T_{\text{res}}} \leq 0,5 \\ 2 \delta_1 & \text{for } \frac{T_{k1}}{T_{\text{res}}} > 0,5 \end{cases}$$

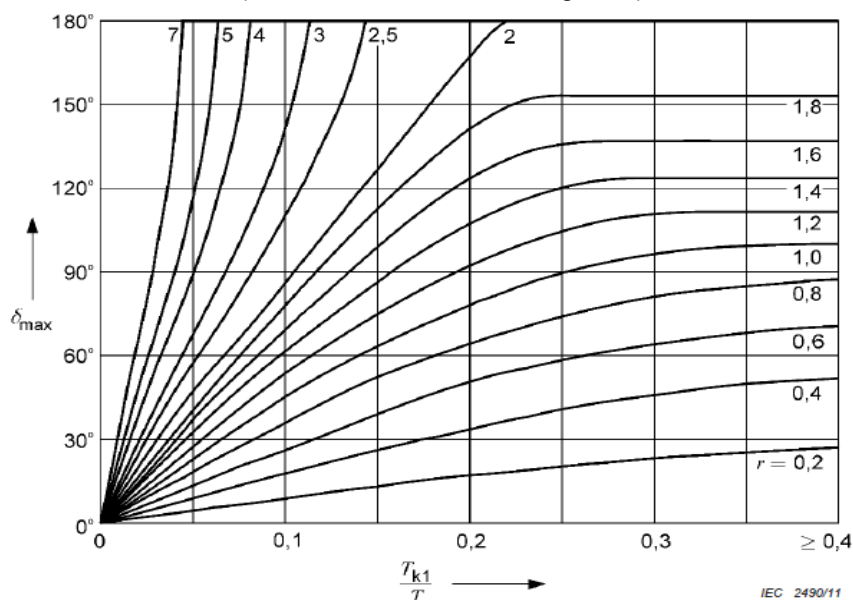
Nella misura in cui è nota la durata del primo flusso di corrente di cortocircuito  $T_{k1}$ , l'angolo massimo di oscillazione  $\delta_{\text{max}}$  può essere determinato secondo la Fig.19 o calcolato come indicato di seguito:

$$\chi = \begin{cases} 1 - r \sin \delta_{\text{end}} & \text{for } 0 \leq \delta_{\text{end}} \leq 90^\circ \\ 1 - r & \text{for } \delta_{\text{end}} > 90^\circ \end{cases}$$

con

$$\delta_{\text{max}} = \begin{cases} 1,25 \arccos \chi & \text{for } 0,766 \leq \chi \leq 1 \\ 10^\circ + \arccos \chi & \text{for } -0,985 \leq \chi \leq 0,766 \\ 180^\circ & \text{for } \chi < -0,985 \end{cases}$$

Figura 19 - Angolo di oscillazione massimo  $\delta_{\text{max}}$  per una data durata massima di cortocircuito  $T_{k1}$  (estratto da EN 60865-1, Figura 6)

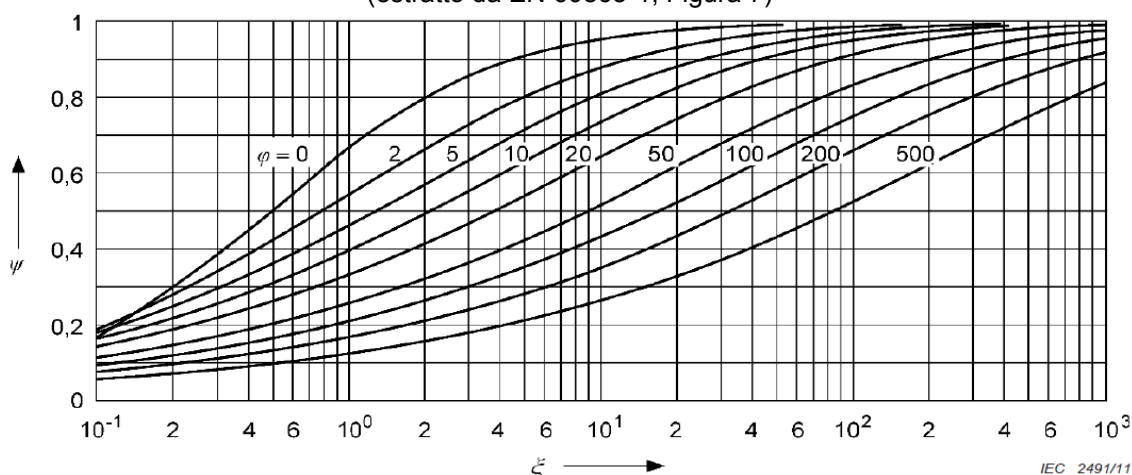


Successivamente la norma tratta la forza di trazione nel cortocircuito durante l'oscillazione, che dipende da un termine che è definito così:

$$\varphi = \begin{cases} 3 \left( \sqrt{1+r^2} - 1 \right) & \text{for } T_{k1} \geq T_{\text{res}} / 4 \\ 3 \left( r \sin \delta_{\text{end}} + \cos \delta_{\text{end}} - 1 \right) & \text{for } T_{k1} < T_{\text{res}} / 4 \end{cases}$$

Il fattore  $\psi$  è in funzione di  $\zeta$  e  $\varphi$ , ed è determinato nella Fig.20.

Figura 20 - Fattore  $\psi$  per la forza di trazione nei conduttori flessibili  
(estratto da EN 60865-1, Figura 7)



La forza di trazione durante l'oscillazione  $F_{t,d}$  nei conduttori flessibili è data da:

$$F_{t,d} = F_{st}(1 + \varphi\Psi)$$

La forza di trazione di cortocircuito dev'essere sempre calcolata con la precedente equazione per le campate senza sostegno centrale. Nel caso di sostegno centrale, si rimanda al punto 6.2.5 della norma EN 60865-1, in quanto non viene affrontata.

### 3.2.2 Calcolo della forza di trazione causata da impatto

Al termine del cortocircuito la campata oscilla o torna indietro. Il valore massimo della forza per un intervallo alla termine del sostegno è significativo solo per  $r > 0.6$ , se  $\delta_{max} \geq 70^\circ C$ . In tal caso la forza d'impatto è data da:

$$F_{f,d} = 1,2 F_{st} \sqrt{1 + 8 \zeta \frac{\delta_{max}}{180^\circ}}$$

NOTA Nelle campate corte la rigidità di flessione della campata riduce l'impatto della campata, il che significa che l'impatto della campata è calcolata come troppo grande se la lunghezza della campata è inferiore a circa 100 volte il diametro del singolo conduttore, cioè  $l < 100 d$ .

### 3.2.3 Calcolo del carico strutturale a seguito dei conduttori flessibili

**Il dispositivo di serraggio per l'ancoraggio del conduttore deve essere specificato con una classificazione basata sulla forza di trazione massima tra  $F_{t,d}$  e  $F_{f,d}$ .**

Il valore massimo della forza per i dispositivi dei conduttori flessibili, non deve essere superiore al valore di resistenza indicato dal fabbricante dei supporti e degli isolatori. Per un isolatore sollecitato da una forza di flessione, il valore di resistenza nominale è dato come una forza che agisce sulla testa dell'isolatore.

I connettori per conduttori flessibili devono essere classificati sulla base del valore massimo di  $1,5 F_{t,d}$  o  $1,0 F_{f,d}$ .

NOTA Il fattore 1,5 tiene conto del fatto che l'energia delle oscillazioni viene assorbita dalla massa degli isolanti.



## **CAPITOLO 4**

## 4. Programma di calcolo degli sforzi elettrodinamici

### 4.1 Considerazioni, ipotesi e scelta dei parametri

L'analisi progettuale viene effettuata tramite un programma Excel, in quanto, per motivi pratici di confronto con le tabelle dati fornite ed i cataloghi prescelti, risulta più dinamico e semplice da utilizzare da chiunque.

Vengono analizzati i casi di barre rigide rettangolari disposte con uno o più conduttori e conduttori flessibili orizzontali senza supporto centrale. Il programma è strutturato in base alle formule fornite dalla norma EN 60865-1, le quali vengono affrontate tutte precedentemente.

È presente una prima parte in cui bisogna fornire una serie di dati richiesti, in base alla scelta dei conduttori principali, i sostegni e le loro proprietà fisiche.

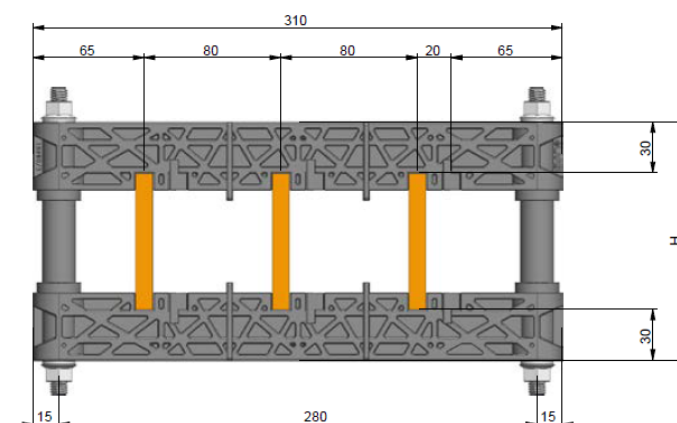
A forma di esempio, si fornisce dal catalogo AICu System nella Tab.15 la massima corrente di cortocircuito  $I_k''$  in base alla corrente nominale delle barre e al loro interasse massimo.

Tabella 15 - Caratteristiche portabarre lineare tripolare

TABELLA INTERASSE PORTABARRE								
I.Nom	630A	800A	1000A	1250A	1600A	1800A	2000A	2500A
Interasse Max	lcc	lcc	lcc	lcc	lcc	lcc	lcc	lcc
1000mm	16 kA	16 kA	20 kA	20 kA	25 kA	25 kA	30 kA	35 kA
950mm	16 kA	16 kA	20 kA	20 kA	25 kA	30 kA	35 kA	35 kA
900mm	16 kA	16 kA	20 kA	20 kA	25 kA	30 kA	35 kA	40 kA
850mm	16 kA	16 kA	20 kA	20 kA	25 kA	30 kA	35 kA	40 kA
800mm	20 kA	20 kA	25 kA	25 kA	30 kA	35 kA	40 kA	45 kA
750mm	25 kA	25 kA	25 kA	30 kA	35 kA	40 kA	40 kA	45 kA
700mm	25 kA	25 kA	25 kA	30 kA	35 kA	45 kA	40 kA	45 kA
650mm	25 kA	25 kA	25 kA	30 kA	35 kA	45 kA	45 kA	50 kA
600mm	25 kA	30 kA	30 kA	35 kA	40 kA	40 kA	50 kA	55 kA
550mm	25 kA	30 kA	35 kA	40 kA	45 kA	50 kA	55 kA	55 kA
500mm	30 kA	35 kA	40 kA	45 kA	50 kA	55 kA	60 kA	60 kA
450mm	35 kA	40 kA	45 kA	50 kA	55 kA	60 kA	70 kA	70 kA
400mm	40 kA	45 kA	50 kA	55 kA	60 kA	70 kA	75 kA	75 kA
350mm	45 kA	50 kA	55 kA	65 kA	70 kA	80 kA	80 kA	80 kA
300mm	50 kA	60 kA	65 kA	75 kA	85 kA	85 kA	85 kA	85 kA
250mm	60 kA	70 kA	75 kA	85 kA				
200mm	80 kA	85 kA	85 kA					
Codice	IS36308CU1/C	IS3808CU1/C	IS31008CU1/C	IS31208CU1/C	IS31608CU1/C	IS31808CU1/C	IS32008CU1/C	IS32508CU1/C

Figura 21 - Portabarre lineare tripolare

Isolatore tripolare per sostegno barre in rame da 630A a 2500A



Il catalogo consultabile, tratta portabarre lineari realizzati per supportare barre in rame o alluminio fino ad una corrente nominale di 4000 A con portabarre singolo e fino a 6300 A con portabarre in parallelo.

Come supporti, sempre a titolo di esempio, sono stati scelti dal catalogo dell'azienda nVent dei supporti ISOTP45M8L, con il limite del carico di rottura pari a 10kN.

Il programma è automatico una volta aver dichiarato tutti i dati, ma bisogna prestare una particolare attenzione per 2 parametri:

- il fattore  $k_{1s}$  per il calcolo della distanza effettiva del conduttore, va determinato dalla Fig.18 in base ai rapporti  $b_s/c_s$  e  $a_{1s}/c_s$
- il fattore  $\psi$  per la forza di trazione nei conduttori flessibili, va determinato dalla Fig.23 in base ai parametri  $\varphi$  e  $\xi$  che vengono determinati dal programma

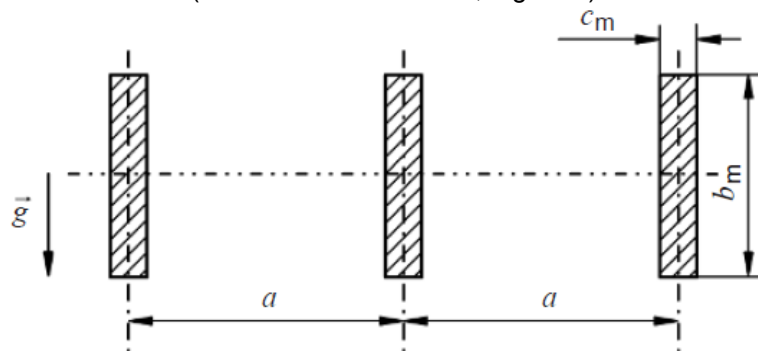
Per dare una maggior rilevanza a questi parametri, si è scelto di esaltarli con un colore diverso dagli altri dati.

Il foglio di calcolo procede quindi con l'analisi ed il confronto dei limiti progettuali. Esso valuta se i supporti e i conduttori prescelti riescono a resistere alle varie sollecitazioni, fornendo in punti ben visibili delle indicazioni: "VERO" se il dimensionamento è a norma secondo la EN 60865-1, "FALSO" diversamente.

## 4.2 Esempi applicativi

### *4.2.1 Sistema di distribuzione principale a singola barra per fase*

Figura 22 - Disposizione delle barre rigide  
(estratto da EN 60865-2, Figura 1)



Nel primo esempio si analizza il caso di un sistema trifase, utilizzando una singola barra continua per ogni fase con supporti semplici equidistanti, a 3 o più campate come mostrato in Fig.22. Si procede quindi ad analizzare se il sistema è conforme alla norma nel caso in cui sussista un guasto trifase bilanciato.

Di seguito viene riportata la tabella contenente tutti i dati richiesti.

Tabella 16 - Raccolta dati esempio 4.2.1

Note	Descrizione	Simbolo	Valore
Si veda <a href="#">Tab.16</a>	Corrente simmetrica iniziale 3F di cortocircuito	$I_k''$ [A]	25000
Si veda <a href="#">Fig.2</a> o tramite formula	Fattore per il calcolo della corrente di picco di cortocircuito	k	1,35
	Frequenza	f [Hz]	50
	Distanza massima tra i supporti adiacenti	l [m]	1
	Distanza mediana tra i conduttori	a [m]	0,55
	Dimensione di un conduttore principale perpendicolare alla direzione della forza	b_m [m]	0,06
Si veda <a href="#">Tab.B.1</a>	Dimensione di un conduttore principale nella direzione della forza	c_m [m]	0,01
	Costante magnetica, permeabilità del vuoto	$\mu_0$ [H/m]	1,26E-06
	Accelerazione gravitazionale	g [m/s <sup>2</sup> ]	9,81
Materiale: EN AW-6101B T7	Massa per unità di lunghezza del conduttore principale	m'm [kg/m]	1,62
	Modulo di Young	E [N/mm <sup>2</sup> ]	70000
	Sollecitazione corrispondente al punto di snervamento (minimo)	f <sub>y_min</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	120
	Sollecitazione corrispondente al punto di snervamento (massimo)	f <sub>y_max</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	180
Supporti ISOTP45M8L nVent	Carico di rottura	F_max [N]	1,00E+04
Fattori di sicurezza parziali, secondo EN 1990	Fattore di sicurezza parziale per l'azione	$\gamma_F$	1,35
	Fattore di sicurezza parziale per la proprietà del materiale	$\gamma_M$	1,1
Si veda <a href="#">Tab.10</a>	Rapporti delle sollecitazioni dinamiche dei conduttori principali	$\nu_{sm} \nu_{rm}$	1
	Rapporti delle sollecitazioni dinamiche dei subconduttori	$\nu_{os} \nu_{rs}$	1
Trave continua con supporti semplici equidistanti. Trave a 3 o più campate. Si veda <a href="#">Tab.11</a>	Fattore di forza sul supporto A	$\alpha_A$	0,4
	Fattore di forza sul supporto B	$\alpha_B$	1,1
	Fattore di stress del conduttore principale	$\beta$	0,73
	Fattore per la stima della frequenza naturale pertinente	$\gamma$	3,56
Si veda <a href="#">Fig.3</a>	Fattore per il calcolo della distanza effettiva del conduttore principale	k12	0,99
Si veda <a href="#">Tab.12</a> e <a href="#">Tab.13</a>	Fattore di plasticità	q	1,5

Successivamente i dati vengono elaborati e nella prima sezione si valuta il caso di carico normale considerando il carico morto della barra, mentre nella seconda sezione per il caso di carico eccezionale considerando la combinazione di effetti di correnti di cortocircuito e carico morto. Vengono utilizzate barre da 60mm x 10mm, con una corrente nominale da 630A secondo la [Tab.B.1](#). L'interasse delle fasi è di 550mm e secondo la [Tab.16](#) ne consegue una corrente simmetrica iniziale di cortocircuito pari a 25 kA.

Tabella 17 - Elaborazione risultati esempio 4.2.1

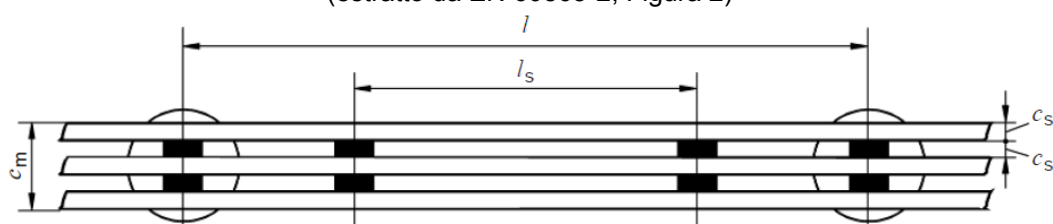
Descrizione	Simbolo	Valore
<b>Stress del conduttore e forze sui supporti causati dal carico morto</b>		
Carico morto (valore caratteristico)	F_str,k [N]	15,89
Carico morto (valore di progetto)	F_str,d [N]	21,45
Momento secondo dell'area principale del conduttore rispetto alla direzione del carico morto	J_st,m [m <sup>4</sup> ]	1,80E-07
Modulo di sezione del conduttore principale rispetto alla direzione del carico morto	W_st,m [m <sup>3</sup> ]	6,00E-06
Sforzo di flessione del conduttore (valore caratteristico)	σ_st,m,k [N/mm <sup>2</sup> ]	0,33
Sforzo di flessione del conduttore (valore di progetto)	σ_st,m,d [N/mm <sup>2</sup> ]	0,45
Sforzo di soglia	f <sub>y,min</sub> /γ <sub>M</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	109,09
I conduttori resistono allo sforzo? σ_st,m,d <= f <sub>y,min</sub> / γ <sub>M</sub> ???	VERO	
Forza esercitata sul supporto A dovuto al carico morto	F_st,r,dA [N]	8,58
Forza esercitata sul supporto B dovuto al carico morto	F_st,r,dB [N]	23,60
I supporti resistono al carico morto? F_st,r,dA < F_max? F_st,r,dB < F_max?	VERO	
<b>Effetti delle correnti di cortocircuito</b>		
Momento geometrico del secondo ordine della sezione	Jzz [m <sup>4</sup> ]	5,00E-09
Corrente di picco di cortocircuito	I <sub>p</sub> [A]	4,77E+04
Distanza effettiva tra i conduttori principali	a_m [m]	0,556
Forza sul conduttore principale centrale durante un cortocircuito trifase bilanciato	F <sub>m3</sub> [N]	710,25
Modulo di sezione del conduttore principale	W <sub>m</sub> [m <sup>3</sup> ]	1,00E-06
Massima sollecitazione di flessione conduttore principale (valore di progetto)	σ_m,d [N/mm <sup>2</sup> ]	64,81
Sollecitazione totale (barra singola)	σ_tot,d [N/mm <sup>2</sup> ]	65,26
Sforzo di soglia	q*f <sub>y,min</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	180,00
I conduttori resistono allo sforzo? σ_tot= σ_m,d + σ_st,m,d <= q*f <sub>y,min</sub> ???	VERO	
Valore da confrontare per i rapporti V <sub>f</sub> e V <sub>rm</sub>	σ_tot,d/(0,8*f <sub>y,max</sub> )	0,45
V <sub>f</sub> V <sub>rm</sub> range 1	V <sub>f</sub> V <sub>rm</sub>	NULL
V <sub>f</sub> V <sub>rm</sub> range 2		2,21
V <sub>f</sub> V <sub>rm</sub> range 3		NULL
V <sub>f</sub> e V <sub>rm</sub> prescelti	V <sub>f</sub> V <sub>rm</sub>	2,21
Forza statica equivalente sul supporto A	F <sub>r,dA</sub> [N]	626,91
Forza statica equivalente sul supporto B	F <sub>r,dB</sub> [N]	1724,00
I supporti resistono al carico? F <sub>r,dA</sub> < F_max? F <sub>r,dB</sub> < F_max?	VERO	

In questo caso, essendo  $0.37 < \frac{\sigma_{tot,d}}{0.8 f_{y,max}} < 1.0$ , i valori di  $V_F$   $V_{rm}$  vanno scelti nel range 2 secondo la Tab.10, mentre per i valori del range 1 e 3, il foglio di calcolo li scarta automaticamente.

Come si evince, sia i conduttori, sia i supporti delle barre, resistono agli sforzi in entrambe le sezioni. Lo sforzo del solo carico morto, è nettamente inferiore alla soglia di resistenza sia delle barre sia dei supporti. Per quanto riguarda gli effetti elettrodinamici, a parità di fattori di sicurezza, si è analizzato in questo caso specifico che per una distanza superiore a 1,66 m tra i supporti adiacenti, lo sforzo sarebbe tale da superare la soglia limite delle barre di  $q f_{y,min} = 180 \text{ N/mm}^2$ , mentre i supporti riuscirebbero a resistere allo sforzo.

#### 4.2.2 Sistema di distribuzione con la presenza di subconduttori

Figura 23 - Disposizione e dei subconduttori  
(estratto da EN 60865-2, Figura 2)



Nel secondo caso, oltre alle barre principali sono presenti 3 subconduttori con le stesse dimensioni e lo stesso materiale analizzato nel caso precedente. I pezzi di collegamento sono distanziali semplici equidistanti, a 3 o più campate.

Come nel caso precedente si analizza nella prima sezione gli effetti del carico morto, mentre nella seconda gli effetti elettrodinamici.

Tabella 18 - Raccolta dati esempio 4.2.2

Note	Descrizione	Simbolo	Valore
Si veda <a href="#">Tab.16</a>	Corrente simmetrica iniziale 3F di cortocircuito	$I_k^*$ [A]	30000
Si veda <a href="#">Fig.2</a> o tramite formula	Fattore per il calcolo della corrente di picco di cortocircuito	k	1,35
	Numero di subconduttori	n	3
	Frequenza	f [Hz]	50
	Distanza massima tra i supporti adiacenti	l [m]	2,1
	Distanza mediana tra i conduttori	a [m]	0,5
	Distanza della linea centrale tra i pezzi di collegamento	$l_s$ [m]	0,7
Si veda <a href="#">Tab.B.1</a>	Dimensione di un conduttore principale perpendicolare alla direzione della forza	$b_m$ [m]	0,06
	Dimensione di un conduttore principale nella direzione della forza	$c_m$ [m]	0,01
	Costante magnetica, permeabilità del vuoto	$\mu_0$ [H/m]	1,26E-06
	Accelerazione gravitazionale	g [m/s <sup>2</sup> ]	9,81
Materiale: EN AW-6101B T7	Massa per unità di lunghezza del conduttore principale	m'm [kg/m]	1,62
	Modulo di Young	E [N/mm <sup>2</sup> ]	70000
	Sollecitazione corrispondente al punto di snervamento (minimo)	$f_{y\_min}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	120
	Sollecitazione corrispondente al punto di snervamento (massimo)	$f_{y\_max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	180
Supporti ISOTP45M8L nVent	Carico di rottura	$F_{max}$ [N]	1,00E+04
Fattori di sicurezza parziali, secondo EN 1990	Fattore di sicurezza parziale per l'azione	$\gamma_F$	1,5
	Fattore di sicurezza parziale per la proprietà del materiale	$\gamma_M$	1,1
Si veda <a href="#">Tab.10</a>	Rapporti delle sollecitazioni dinamiche dei conduttori principali	$\sqrt{\sigma_m} \sqrt{\sigma_{rm}}$	1
	Rapporti delle sollecitazioni dinamiche dei subconduttori	$\sqrt{\sigma_s} \sqrt{\sigma_{rs}}$	1
Trave continua con supporti semplici equidistanti. Trave a 3 o più campate. Si veda <a href="#">Tab.11</a>	Fattore di forza sul supporto A	$\alpha_A$	0,4
	Fattore di forza sul supporto B	$\alpha_B$	1,1
	Fattore di stress del conduttore principale	$\beta$	0,73
	Fattore per la stima della frequenza naturale pertinente	$\gamma$	3,56
Si veda <a href="#">Fig.3</a>	Fattore per il calcolo della distanza effettiva del conduttore principale	k12	0,99
	Fattore per il calcolo della distanza effettiva del subconduttore	k12'	0,6
	Fattore per il calcolo della distanza effettiva del subconduttore	k13'	0,78
Si veda <a href="#">Tab.12</a> e <a href="#">Tab.13</a>	Fattore di plasticità	q	1,5

Anche in questo caso vengono utilizzate barre da 60mm x 10mm, ma l'interasse delle fasi è di 500 mm e secondo la [Tab.16](#), ne consegue una corrente simmetrica iniziale di cortocircuito pari a 30 kA. Vengono utilizzati 4 coppie di distanziali, con una distanza massima pari a 2,1 m complessivi, con equidistanza pari ad 0,7 m. Si è leggermente aumentato il fattore di sicurezza  $\gamma_F$  da 1,35 a 1,5.

Tabella 19 - Elaborazione risultati esempio 4.2.2

Descrizione	Simbolo	Valore
<b>Stress del conduttore e forze sui supporti causati dal carico morto</b>		
Carico morto (valore caratteristico)	F_str,k [N]	33,374
Carico morto (valore di progetto)	F_str,d [N]	50,060
Momento secondo dell'area principale del conduttore rispetto alla direzione del carico morto	J_st,m [m <sup>4</sup> ]	1,80E-07
Modulo di sezione del conduttore principale rispetto alla direzione del carico morto	W_st,m [m <sup>3</sup> ]	6,00E-06
Sforzo di flessione del conduttore (valore caratteristico)	σ_st,m,k [N/mm <sup>2</sup> ]	1,460
Sforzo di flessione del conduttore (valore di progetto)	σ_st,m,d [N/mm <sup>2</sup> ]	2,190
Sforzo di soglia	f_y_min/γ_M [N/mm <sup>2</sup> ]	109,091
I conduttori resistono allo sforzo? σ_st,m,d ≤ f_y_min / γ_M ???		VERO
Forza esercitata sul supporto A dovuto al carico morto	F_st,r,dA [N]	60,073
Forza esercitata sul supporto B dovuto al carico morto	F_st,r,dB [N]	165,199
I supporti resistono al carico morto? F_st,r,dA < F_max? F_st,r,dB < F_max?		VERO
<b>Effetti delle correnti di cortocircuito</b>		
Momento geometrico del secondo ordine della sezione	J_zz [m <sup>4</sup> ]	5,00E-09
Corrente di picco di cortocircuito	I_p [A]	5,73E+04
Distanza effettiva tra i conduttori principali	a_m [m]	0,51
Distanza effettiva tra i subconduttori	a_s [m]	0,51
Forza sulla conduttrice principale centrale durante un cortocircuito trifase bilanciato	F_m3 [N]	2362,57
Forza elettromagnetica massima sul subconduttore esterno tra due pezzi di collegamento adiacenti	F_s [N]	1000,29
Modulo di sezione dei subconduttori	W_s [m <sup>3</sup> ]	1,00E-06
Modulo di sezione del conduttore principale	W_m [m <sup>3</sup> ]	3,00E-06
Massima sollecitazione di flessione conduttore principale (valore di progetto)	σ_m,d [N/mm <sup>2</sup> ]	150,91
Massima sollecitazione di flessione subconduttore (valore di progetto)	σ_s,d [N/mm <sup>2</sup> ]	43,76
Sollecitazione totale	σ_tot,d [N/mm <sup>2</sup> ]	196,86
Sforzo di soglia	q*f_y_min [N/mm <sup>2</sup> ]	180
I conduttori resistono allo sforzo? σ_tot,d ≤ q*f_y_min ???		FALSO
I conduttori resistono allo sforzo? (valore consigliato per subconduttori) σ_s,d ≤ f_y_min ???		VERO
Valore da confrontare per i rapporti V_f e V_rm	σ_tot,d / (0,8*f_y_max)	1,37
V_f V_rm range 1		NULL
V_f V_rm range 2		NULL
V_f V_rm range 3		1
V_f e V_rm prescelti		1
Forza statica equivalente sul supporto A	F_r,dA [N]	945,03
Forza statica equivalente sul supporto B	F_r,dB [N]	2598,83
I supporti resistono al carico? F_r,dA < F_max? F_r,dB < F_max?		VERO

In questo caso  $1 \leq \frac{\sigma_{tot,d}}{0.8 f_{y,max}}$  e ne consegue che i valori di  $V_F$   $V_{rm}$  vanno scelti nel range 3

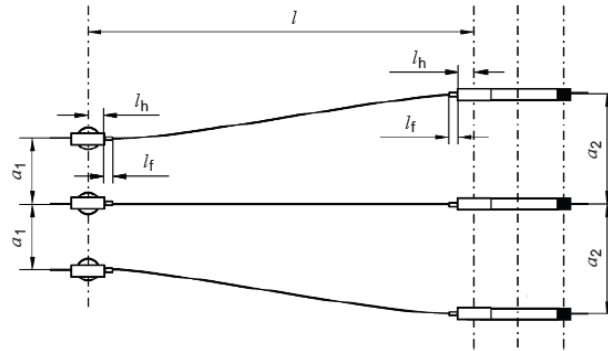
secondo la Tab.10 con un valore prescelto pari ad 1.

Anche in questo caso, lo sforzo del solo carico morto viene sopportato sia dalle barre sia dai supporti. Per quanto riguarda gli effetti elettrodinamici, si può vedere che non ci sono ripercussioni sulle distanze, in quanto  $\sigma_{s,d} \leq f_{y,min}$ , ma i conduttori non passerebbero alla prova dello sforzo elettrodinamico, in quanto la soglia di resistenza pari a 180 MPa e inferiori ai 197 MPa registrati. Questo è dovuto al fatto che i distanziali che supportano le barre sono a distanze troppo elevate. Infatti se si ponesse invece che 4 coppie di distanziali, almeno 5 coppie equidistanti a parità della distanza massima, la sollecitazione passerebbe dal valore di 197 MPa a 177 MPa, che è pur sempre vicino alla soglia ma d'intensità minore. Quindi seppur siano sufficienti almeno 5 coppie di distanziali, si consiglia di porne 6.

Per quanto riguarda la forza esercitata sui supporti, essi riuscirebbero a resistere allo sforzo. Ne consegue quindi che in questo caso, seppur i supporti siano sufficientemente resistenti, si avrebbero degli effetti meccanici critici che comporterebbero una deformazione plastica permanente ed è proprio per questo motivo che il dimensionamento non sarebbe a norma.

#### 4.2.3 Sistema di distribuzione con conduttori flessibili

Figura 24 - Disposizione dei conduttori flessibili  
(estratto da EN 60865-2, Figura 4)



Nel terzo caso viene preso in considerazione un quadro con un sistema di distribuzione con conduttori flessibili in lega di alluminio da  $240 \text{ mm}^2$  dal catalogo Lumpi-Berndorf a Tab.20 conformi alla EN 50182.

Tabella 20 - Catalogo cavi alluminio Lumpi-Berndorf

Code	Old code	Area mm <sup>2</sup>	No. of wires	Diameter		Mass per unit length kg/km	Rated strength kN	DC resistance Ohm/km	Final modulus of elasticity N/mm <sup>2</sup>	Coefficient of linear expansion 1/K	Current carrying capacity A
				Wire mm	Cond. mm						
24-AL1	25	24,2	7	2,10	6,30	66,3	4,36	1,1787	60000	2,30E-05	144
34-AL1	35	34,4	7	2,50	7,50	93,9	6,01	0,8317	60000	2,30E-05	180
49-AL1	50	49,5	7	3,00	9,00	135,2	8,41	0,5776	60000	2,30E-05	225
66-AL1	70	65,8	19	2,10	10,5	180,9	11,85	0,4367	57000	2,30E-05	270
93-AL1	95	93,3	19	2,50	12,5	256,3	16,32	0,3081	57000	2,30E-05	340
117-AL1	120	117,0	19	2,80	14,0	321,5	19,89	0,2456	57000	2,30E-05	390
147-AL1	150	147,1	37	2,25	15,8	405,7	26,48	0,1960	57000	2,30E-05	455
182-AL1	185	181,6	37	2,50	17,5	500,9	31,78	0,1588	57000	2,30E-05	520
243-AL1	240	242,5	61	2,25	20,3	671,1	43,66	0,1193	55000	2,30E-05	625
299-AL1	300	299,4	61	2,50	22,5	828,5	52,40	0,0966	55000	2,30E-05	710
400-AL1	400	400,1	61	2,89	26,0	1107,1	68,02	0,0723	55000	2,30E-05	855
452-AL1	450	451,5	61	3,07	27,6	1249,3	74,50	0,0641	55000	2,30E-05	925
500-AL1	500	499,8	61	3,23	29,1	1382,9	82,47	0,0579	55000	2,30E-05	990
626-AL1	625	626,2	91	2,96	32,6	1739,7	106,45	0,0464	55000	2,30E-05	1140
802-AL1	800	802,1	91	3,35	36,9	2228,3	132,34	0,0362	55000	2,30E-05	1340
1000-AL1	1000	999,7	91	3,74	41,1	2777,3	159,95	0,0291	55000	2,30E-05	1540

Tabella 21 - Raccolta dati esempio 4.2.3

Note	Descrizione	Simbolo	Valore
Si veda <u>Tab.16</u>	Corrente simmetrica iniziale 3F di cortocircuito	$I_k^*$ [A]	19000
	Frequenza	f [Hz]	50
	Durata del primo flusso di corrente di cortocircuito	$T_{k1}$ [s]	0,3
	Distanza massima tra i supporti adiacenti	l [m]	11,5
	Estensione di un'armatura della testa e morsetto	lh [m]	0,4
	Fattore di forma	lf	0,15
	Distanza mediana tra i conduttori (parte iniziale)	a1 [m]	0,6
	Distanza mediana tra i conduttori (parte finale)	a2 [m]	0,8
	Costante elastica risultante di entrambi i supporti della campata	S [N/mm]	100
	Numero di subconduttori	n	1
Si veda <u>Tab.A.1</u>	Sezione trasversale	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	242,5
	Costante magnetica, permeabilità del vuoto	$\mu_0$ [H/m]	1,26E-06
	Accelerazione gravitazionale	g [m/s <sup>2</sup> ]	9,81
Materiale: EN 243-AL1	Forza di trazione statica di un conduttore flessibile ad una temperatura di -20°C	$F_{st,-20}$ [N]	350
	Forza di trazione statica di un conduttore flessibile ad una temperatura di 60°C	$F_{st,60}$ [N]	250
	Massa per unità di lunghezza del conduttore principale	$m's$ [kg/m]	0,671
	Modulo di Young	E [N/mm <sup>2</sup> ]	55000
	Valore minimo della tensione del cavo per cui il modulo di Young diventa costante	$\sigma_{fin}$ [N/m <sup>2</sup> ]	5,00E+07
	Fattore di sicurezza parziale	$\gamma$	1,1
	Carico di rottura	$F_{max}$ [N]	1,00E+05



La base per i calcoli in questo esempio è una connessione a conduttore flessibile trifase con un conduttore interamente in alluminio per fase con distanze variabili tra i conduttori, inizialmente pari 0,6m e alla fine pari a 0,8m. Viene aggiunto un fattore di sicurezza  $\gamma = 1,1$  al dimensionamento, seppur la norma non la introduca.

Tabella 22 - Elaborazione risultati esempio 4.2.3

Descrizione	Simbolo	Valore
<b>Stress del conduttore e forze sui supporti causati dal carico morto</b>		
Lunghezza effettiva della campata	$l_{eff}$ [m]	10,40
Lunghezza del cavo del conduttore principale nella campata	$l_c$ [m]	10,40
Distanza equivalente	$a$ [m]	0,70
Carico elettromagnetico caratteristico per unità di lunghezza	$F'$ [N]	77,36
Rapporto tra la forza elettromagnetica e quella di gravità	$r$	11,75
La direzione della forza risultante sul conduttore	$\delta_1$ [deg]	85,14
Abbassamento del conduttore equivalente in mezzeria nelle condizioni statiche (-20°C)	$f_{es,-20}$ [m]	0,25
Abbassamento del conduttore equivalente in mezzeria nelle condizioni statiche (-60°C)	$f_{es,60}$ [m]	0,36
Periodo dioscillazione del conduttore (-20°C)	$T_{-20}$ [s]	0,90
Periodo dioscillazione del conduttore (-60°C)	$T_{60}$ [s]	1,07
Periodo calcolato con corrente di cortocircuito (-20°C)	$T_{res,-20}$ [s]	0,31
Periodo calcolato con corrente di cortocircuito (-60°C)	$T_{res,60}$ [s]	0,36
Valore di soglia (-20°C)	$F_{st,-20} / (n * As)$ [N/m <sup>2</sup> ]	1,44E+06
Valore di soglia (60°C)	$F_{st,60} / (n * As)$ [N/m <sup>2</sup> ]	1,03E+06
Modulo di Young effettivo (-20°C)	$E_{eff,-20}$ [N/m <sup>2</sup> ]	1,82E+10
Modulo di Young effettivo (60°C)	$E_{eff,60}$ [N/m <sup>2</sup> ]	1,77E+10
Modulo di rigidità (-20°C)	$N_{-20}$ [N <sup>-1</sup> ]	1,19E-06
Modulo di rigidità (60°C)	$N_{60}$ [N <sup>-1</sup> ]	1,19E-06
Fattore di stress (-20°C)	$\xi_{-20}$	3,84
Fattore di stress (60°C)	$\xi_{60}$	10,47
Valore di soglia per una data durata massima di cortocircuito (-20°C)	$T_{k1}/T_{res,-20}$	0,98
Valore di soglia per una data durata massima di cortocircuito (60°C)	$T_{k1}/T_{res,60}$	0,83
Angolo di oscillazione dalla posizione stazionaria (-20°C)	$\delta_{end,-20}$ [deg]	170
Angolo di oscillazione dalla posizione stazionaria (60°C)	$\delta_{end,60}$ [deg]	170
Parametro per il massimo angolo di oscillazione	$X_{-20}$	-10,75
Parametro per il massimo angolo di oscillazione	$X_{60}$	-10,75
Angolo massimo di oscillazione (-20°C) range 1	$\delta_{max,-20}$ [deg]	NULL
Angolo massimo di oscillazione (-20°C) range 2		NULL
Angolo massimo di oscillazione (-20°C) range 3		180
Angolo massimo di oscillazione (-20°C) prescelto	$\delta_{max,-20}$ [deg]	180
Angolo massimo di oscillazione (60°C) range 1	$\delta_{max,60}$ [deg]	NULL
Angolo massimo di oscillazione (60°C) range 2		NULL
Angolo massimo di oscillazione (60°C) range 3		180
Angolo massimo di oscillazione (60°C) prescelto	$\delta_{max,60}$ [deg]	180
Termine $\phi$ (-20°C)	$\phi_{-20}$	32,38
Termine $\phi$ (60°C)	$\phi_{60}$	32,38
Fattore $\psi$ (-20°C)	$\psi_{-20}$	0,6
Fattore $\psi$ (60°C)	$\psi_{60}$	0,75
Forza di trazione (-20°C)	$F_{t,d,-20}$ [N]	7,15E+03
Forza di trazione (60°C)	$F_{t,d,60}$ [N]	6,32E+03
Forza di trazione massima	$F_{t,d}$ [N]	7,15E+03
Forza d'impatto dopo il cortocircuito (-20°C)	$F_{f,d,-20}$ [N]	2,36E+03
Forza d'impatto dopo il cortocircuito (60°C)	$F_{f,d,60}$ [N]	2,76E+03
Forza d'impatto massima	$F_{f,d}$ [N]	2,76E+03
Forza per il dimensionamento del dispositivo d'ancoraggio	$F_{tot}$ [N]	1,18E+04
I supporti resistono alla sollecitazione? $F_{tot} < F_{max} ???$		VERO

Ci sono diverse valutazioni da fare per l'elaborazione dei dati. In questo caso risulta che  $\frac{F_{st}}{n A_s} < \sigma_{fin}$  perciò in base alla norma bisogna ricalcolare il modulo di Young con un valore equivalente (equazione  $E_{eff}$  presente nel capitolo 3.2.1). Inoltre, siccome il rapporto  $\frac{T_{k1}}{T_{res}} > 0,5$ , l'angolo di oscillazione risulterà  $2\delta_1$ . Si rimanda al capitolo 3.2.1 per le stesse valutazioni che sono state fatte per i parametri  $\chi$ ,  $\delta_{max}$  e  $\varphi$ .  
In questo caso si evince che i supporti riescono a resistere alle sollecitazioni elettrodinamiche dei cavi dovute al cortocircuito, quindi i supporti passano alla norma.

## Bibliografia

- Elementi di fisica per l'università Vol. II Campi e onde 1984. Marcello Alonso-Edward J. Finn (seconda edizione)
- Costruzione di Macchine, seconda edizione 2014. Marino Quaresimin, Michele Zappalorto
- EN IEC 61439-1:2021: Apparecchiature assiemate di protezione e di manovra per bassa tensione (quadri BT)
- EN 60865-1:2012: Correnti di cortocircuito - Calcolo degli effetti - Definizioni e metodi di calcolo
- EN 60865-2: Correnti di cortocircuito - Esempi di calcolo
- EN 60909-0: Correnti di cortocircuito nei sistemi trifase in corrente alternata - Calcolo delle correnti
- EN 13601: Barre e fili di rame per usi elettrici generali
- IEC 60364-5-52: Impianti elettrici a bassa tensione - Parte 5-52: Selezione e montaggio di materiale elettrico - Sistemi di cablaggio
- IEC 60228: Cavi conduttori isolati
- IEC 60038: Tensioni standard IEC
- IEC 1287/2000: Caratteristiche e metodi di prova
- Manuale Cremonese Elettrotecnica - Zanichelli - Quarta edizione 2015
- Copper Development Association; Publication No. 22:1996 formula No. 8.
- Elektro.it [www.elektro.it/quadri\\_bt/quadri\\_bt\\_img\\_02.html](http://www.elektro.it/quadri_bt/quadri_bt_img_02.html)
- AICu System [https://www.alcusystem.com/portfolio\\_page/isolatori-lineari-componibili/](https://www.alcusystem.com/portfolio_page/isolatori-lineari-componibili/)
- nVent ERIFLEX <https://www.nvent.com/en-us/eriflex/products/efsisotp45m8l>
- Lumpi-Berndorf EN 50182 AT\_DE\_CH\_SWE\_UK ([lumpi-berndorf.at](http://lumpi-berndorf.at))