

CAPITOLO II

COMPONENTI DELL'IMPIANTO ELETTRICO LINEE ELETTRICHE

1. Generalità

Le linee elettriche vengono impiegate per il trasferimento della energia elettrica dai punti in cui essa si produce a quelli in cui si utilizza; esse si dividono in due grandi categorie: linee con conduttori nudi e linee in cavo.

2. Linee con conduttori nudi

Le linee con conduttori nudi vengono impiegate prevalentemente per la trasmissione aerea dell'energia elettrica. Esse sono costituite da tre componenti fondamentali:

- i conduttori di potenza, che servono per il trasferimento dell'energia e che sono tesi nell'aria;
- gli isolatori, che sostengono meccanicamente e isolano verso il sostegno i conduttori di potenza;
- i sostegni, che svolgono una funzione di sostegno degli isolatori e dei conduttori di potenza.

Oltre ai conduttori di potenza, sono spesso presenti altri conduttori, denominati funi di guardia, che sono disposti sulla sommità dei sostegni e che, tramite questi, sono collegati a terra; essi hanno funzioni protettive contro le sovratensioni di origine atmosferica.

2.1 Conduttori di potenza

I materiali impiegati sono il rame e l'alluminio. Le caratteristiche principali dei due materiali, sia elettriche che meccaniche, sono riportate nella tab. II.1. I valori indicati si riferiscono ai materiali crudi giacchè in questa forma vengono usati per la realizzazione dei conduttori per linee aeree.

Come si può facilmente evincere dalla tabella, rispetto al rame, l'alluminio è più leggero (circa il 30 %) ed ha una minore conducibilità (circa il 60 %). Ne consegue che se, teoricamente, si volesse impiegare lo stesso volume di materiale conduttore per costruire una linea, quella in alluminio peserebbe circa un terzo di una linea in rame.

Un confronto più aderente alla realtà è, invece, quello fatto a parità di perdite, e cioè a parità di resistenza; in questo caso, essendo maggiore la resistività dell'alluminio, per ottenere una resistenza equivalente a quella di una linea in rame, si deve adottare una sezione maggiore, il che comporta un aumento del peso. Complessivamente una linea in alluminio rispetto ad una linea in rame caratterizzata dalle stesse perdite, pesa all'incirca la metà e non un terzo, come sembrerebbe considerando solo i valori dei pesi specifici.

Tab.II.1 – Caratteristiche principali del rame e dell'alluminio a 20 °C

Caratteristica	Rame	Alluminio
Resistività elettrica a 20 °C [$\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$]	0,0178	0,0284
Sollecitazione a rottura [MPa]	200÷250	120÷180
Densità [kg/dm ³]	8,89	2,70
Coefficiente di dilatazione lineare [K ⁻¹]	17 10 ⁻⁶	23 10 ⁻⁶

Sempre rispetto al rame, l'alluminio presenta una resistenza alla rottura minore (circa il 43 %).

L'alluminio, infine, ha un coefficiente di dilatazione termica maggiore, per cui, a parità di distanza tra due sostegni successivi (campata), dà frecce¹ più elevate del rame, pur essendo più leggero di quest'ultimo.

Il rame è impiegato essenzialmente nel campo della bassa tensione, sotto forma di filo pieno o di corda. Le applicazioni del filo pieno sono limitate a conduttori di sezione inferiore a 10 mm², adottando per le sezioni maggiori i conduttori cordati a 7, 19 o 37 fili; le corde presentano, rispetto al filo, una maggiore flessibilità, con conseguente maggiore facilità di stendimento e di montaggio.

I campi di applicazione dell'alluminio, quale unico metallo dei conduttori di potenza, sono relativi principalmente alla media tensione.

L'alluminio, i cui costi di produzione sono di gran lunga inferiori a quelli del rame, si adopera esclusivamente sotto forma di conduttore cordato a 7, 19, 37 o 61 fili, essendo molto difficile ottenere fili di un certo spessore con sufficiente omogeneità; esso resiste bene, come il rame, alle azioni atmosferiche, grazie alla pellicola di ossido che rapidamente lo riveste e lo protegge.

Da ultimo, si ritiene di dover dare cenno al fatto che, soprattutto nelle linee di trasmissione, vengono impiegati conduttori bimetallici, in cui è presente anche l'acciaio, o conduttori in lega di alluminio (aldrey), e ciò allo scopo di migliorare le caratteristiche meccaniche del conduttore nel suo complesso. Nel campo delle altissime tensioni, infine, per migliorare la trasmissione dell'energia, si adottano più conduttori alluminio-acciaio in parallelo per ciascuna fase opportunamente distanziati tra loro (conduttori a fascio).

2.2 Funi di guardia

¹ I conduttori di una linea aerea, per le sollecitazioni a cui sono sottoposti, si dispongono tra due sostegni successivi non lungo una linea retta, ma secondo una linea che prende il nome di catenaria. La freccia è la distanza PQ tra un generico punto P della linea retta che congiunge gli attacchi del conduttore ai due sostegni ed il punto Q del conduttore individuato dalla verticale passante per il punto P.

Le funi di guardia vengono tesate superiormente ai conduttori di potenza ed hanno una funzione di protezione contro le sovratensioni di origine atmosferica.

Attualmente esse sono realizzate come corde preformate in acciaio i cui fili, per opportune deformazioni impresse durante la fabbricazione, non hanno tendenza a svolgersi, per cui non c'è pericolo che la rottura di un filo lo possa portare a contatto di un conduttore di potenza sottostante.

2.3 Isolatori

Gli isolatori sono quei componenti di un sistema elettrico il cui compito è quello di collegare meccanicamente, isolandoli elettricamente, elementi a tensione differente. Nel caso delle linee con conduttori nudi, che qui si trattano, gli elementi a tensione differente sono il conduttore di potenza ed il sostegno; in questo caso, il collegamento tramite isolatori richiede il soddisfacimento di alcuni requisiti di sistema quali:

- la limitazione delle correnti di dispersione verso gli altri conduttori o la terra;
- la mancanza di fenomeni di scarica distruttiva in aria tra conduttore e strutture metalliche vicine o la terra in relazione al livello di isolamento prefissato;
- l'adeguata resistenza alle sollecitazioni meccaniche a cui può essere soggetto l'isolatore nell'esercizio del sistema.

Negli isolatori è sempre presente un nucleo costituito da materiale isolante ed elementi metallici. Il nucleo isolante è soggetto, dal punto di vista elettrico, ad una differenza di potenziale che può essere costituita dalla tensione di normale funzionamento o da una sovratensione.

I materiali impiegati per il nucleo isolante sono la porcellana ed il vetro ricotto o temprato (tab.II.2).

Tab.II.2 – Caratteristiche dielettriche e meccaniche dei principali isolanti

Caratteristica	Ceramica		Vetro
	Porcellana	Ricotto	Temprato
Permittività relativa (20°C e 50 Hz)	6	7,5	7,5
Rigidità dielettrica [kV/cm]	170	230	230
Densità [kg/m ³]	2,4	2,5	2,5
Sollecitazione a rottura [MPa]	30	20	150
Modulo di elasticità [MPa]	77000	74000	72000

Nel caso della porcellana, che è il materiale isolante più comunemente impiegato, almeno nel campo dell'alta tensione, per ottenere questi requisiti vengono dosati opportunamente i suoi materiali componenti (quarzo, caolino, feldspato).

La porcellana è ricoperta normalmente da uno strato di smalto vetroso, che ne migliora lo stato superficiale ed il meccanismo di dilavazione; essa, inoltre, ha un ottimo comportamento a compressione ed un pessimo comportamento a trazione.

Con il vetro temprato si riesce ad ottenere una resistenza a trazione 5-6 volte superiore a quella del vetro ricotto ed una migliore tenuta a brusche variazioni di temperatura. Le caratteristiche del vetro, dal punto di vista elettrico, sono simili a quelle della porcellana.

E' degli ultimi anni, infine, l'uso di materiali compositi nella costruzione degli isolatori.

In relazione ai requisiti precedentemente indicati, le proprietà che un materiale isolante per isolatori deve possedere sono:

- elevata resistività di massa e superficiale per limitare le correnti di dispersione;
- idoneo valore della rigidità dielettrica di massa e superficiale per evitare la scarica distruttiva;
- adeguati valori di resistenza meccanica e di resistenza alla dilatazione termica.

Di solito gli isolatori vengono divisi in due categorie:

- isolatori rigidi;
- isolatori sospesi.

Gli isolatori rigidi hanno come limite di applicazione quello della media tensione; essi, quindi, sono quelli impiegati negli impianti elettrici a media e bassa tensione. Tali isolatori sono, a loro volta, suddivisi in ulteriori due categorie: gli isolatori rigidi per tensioni fino a 1 kV e quelli per tensioni superiori a 1 kV.

Gli isolatori rigidi fino a 1 kV (fig.II.1 a), che sono caratterizzati dalla presenza di un unico pezzo di materiale isolante, sono di forma a campana; nella parte superiore sono presenti scanalature che servono per il fissaggio del conduttore.



Fig. II.1 – Isolatori rigidi: a) per tensione fino a 1 kV; b) per tensione superiore a 1 kV.

Gli isolatori rigidi per tensioni superiori a 1 kV (fig.II.1 b) in genere sono costituiti da più pezzi di materiale isolante, cementati tra di loro. Aumentando la tensione, infatti, aumentano le distanze da garantire tra le parti a differente tensione, con la conseguenza che aumenta di pari passo la quantità di materiale isolante necessario e,

con essa, la probabilità di avere imperfezioni all'interno dell'isolatore e, quindi, scariche indesiderate.

Il limite di applicazione degli isolatori rigidi, come detto, è quello della media tensione, in quanto, anche se teoricamente si può pensare, per tensioni superiori a tale limite, di cementare sempre più pezzi in serie, ne verrebbe fuori un isolatore molto ingombrante e pesante, il che ne rende praticamente non più conveniente l'impiego.

Per tensioni superiori a quelle della media tensione, sia per motivi tecnici che economici, vengono pressochè universalmente impiegati gli isolatori sospesi, ed, in particolare, quelli detti a "cappa e perno" (fig.II.2).

Negli isolatori a cappa e perno la cappa collega l'isolatore al sostegno o ad un altro isolatore disposto superiormente mentre il perno si aggancia o, attraverso un opportuno collare metallico, al conduttore o, direttamente, ad un altro isolatore disposto inferiormente. Tra cappa e perno è presente un unico pezzo di materiale isolante.

Con tale tipo di isolatore si superano completamente i problemi tecnologici degli isolatori rigidi perchè, al crescere della tensione, i necessari livelli di isolamento tra parti a differente tensione vengono garantiti disponendo più isolatori in serie tra loro (catena di isolatori, fig.II.3): in questo modo, con una sola unità base, si possono isolare linee a tensione differente, variando unicamente il numero di isolatori messi in serie.

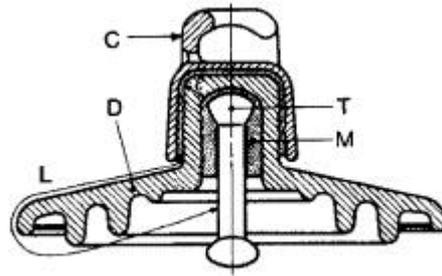


Fig. II.2 – Isolatore sospeso a cappa e perno: C = cappa; T = perno; D = materiale isolante; L = minima distanza in aria esterna all'isolatore; M = materiale cementante.

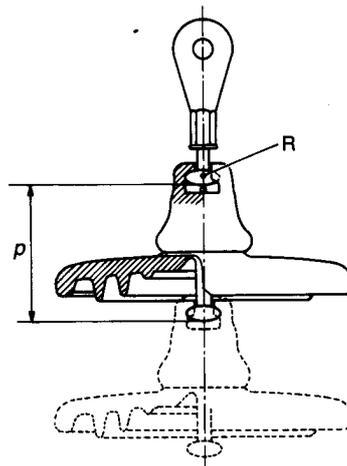


Fig. II.3 – Catena di isolatori a cappa e perno: R= rotula; p = passo.

Un isolatore, sia rigido che sospeso, è sagomato in modo tale che il percorso delle correnti sulla superficie sia il più lungo possibile e che il campo elettrico non

presenti, in alcun punto vicino all'isolatore, valori superiori della rigidità dielettrica dell'aria.

2.4 Sostegni

I sostegni si possono classificare a seconda dei materiali usati in sostegni:

- in legno;
- in acciaio;
- in cemento armato;
- in vetroresina.

I sostegni in legno sono oggi impiegati molto raramente, essenzialmente per le linee più modeste a bassa e media tensione; essi sono costituiti da pali ad asse rettilineo, in abete o castagno opportunamente trattati in modo da resistere all'azione del tempo, i quali, superiormente attraverso mensole o ganci, sostengono degli isolatori rigidi, a loro volta connessi ai conduttori di potenza, disposti o superiormente o lateralmente.

La seconda categoria di sostegni, che è la più diffusa, è quella dei sostegni in acciaio. Nel campo della bassa e media tensione si impiegano pali ad asse rettilineo, ad esempio tubolari, ottenuti mediante tubi senza saldatura (tipo Mannesman). Nel campo dell'alta ed altissima tensione si impiegano, invece, i sostegni detti in gergo a traliccio, in cui diversi elementi modulari vengono connessi tra di loro in maniera conveniente così da ottenere una struttura di forma più o meno complessa.

Nei sostegni in cemento armato gli elementi rettilinei costituenti il sostegno sono dei pali in cemento armato centrifugato, aventi una sezione trasversale di forma anulare riempita di calcestruzzo ed attraversata da tondini di acciaio.

Nei pali in vetroresina, infine, il materiale utilizzato è di tipo composito, costituito da resine poliestere insature termoindurenti rinforzate con fibre di vetro. Le proprietà di tali materiali (alto rapporto resistenza-peso, ottima resistenza agli agenti atmosferici e alla corrosione atmosferica, ottimo isolamento elettrico) consentono di ottenere sostegni caratterizzati da una maggiore leggerezza, con minori costi di trasporto e installazione, non hanno deformazioni permanenti, hanno una ottima resistenza agli agenti atmosferici esterni con conseguente eliminazione dei costi di manutenzione, ed una elevata sicurezza dai pericoli di incendio.

3. Linee in cavo

Le linee in cavo sono impiegate per la trasmissione sottomarina dell'energia elettrica e prevalentemente negli impianti elettrici in media e bassa tensione in posa sotterranea, principalmente, od anche aerea. Esse sono costituite dai cavi e dagli accessori di raccordo, che permettono di collegare il cavo ad una linea aerea o ad un sistema di sbarre (accessori di estremità) o due tratti di cavo tra di loro (giunzioni). Il cavo, a sua volta è costituito da tre elementi fondamentali:

- uno o più conduttori, che servono per il trasferimento dell'energia;
- un isolante solido, che circonda il conduttore e che garantisce l'isolamento;
- una guaina di protezione.

Possono, poi, essere presenti una armatura di protezione meccanica e opportuni schermi costituiti da materiale semiconduttore o metallico, necessari ad uniformare il campo elettrico all'interno del materiale isolante; le disuniformità possono derivare da

irregolarità superficiali dei conduttori o possono essere presenti nei cavi multipolari.

3.1 Materiali impiegati per le parti costituenti un cavo

I materiali più largamente impiegati per la parte conduttrice di un cavo sono il rame e l'alluminio, le cui caratteristiche sono state già illustrate nel par. 2.1.

Il confronto tra questi due materiali nell'ambito dei cavi, però, si diversifica notevolmente in funzione dei diversi livelli di tensione.

Nel campo della bassa tensione il costo del conduttore può essere una aliquota significativa del costo totale del cavo e, in tali casi, il confronto economico potrebbe anche essere a vantaggio dell'alluminio; d'altra parte, per le alte tensioni il volume dell'isolante e la complessità dell'intero cavo è tale che il costo del conduttore non è che una frazione piuttosto piccola del costo totale, e, quindi, il confronto si chiude sempre a vantaggio del rame.

Nel campo delle medie tensioni (fino a 20 kV) i conduttori di alluminio possono consentire a volte una certa economia nel costo totale del cavo, soprattutto se la guaina, anziché di piombo, è anch'essa di alluminio.

I materiali principalmente utilizzati nei cavi per la parte isolante sono la carta impregnata e gli isolanti estrusi. I cavi in isolante estruso sono quelli principalmente impiegati negli impianti elettrici a media e bassa tensione.

La carta usata nell'isolamento dei cavi deve essere di pura cellulosa per possedere qualità elettriche soddisfacenti e proprietà assorbenti tali da assicurare un perfetto impregnamento. Gli impregnanti più usati per la carta sono gli olii.

Gli isolanti estrusi principalmente impiegati sono il PVC (policloruro di vinile), il PE (polietilene) e suoi derivati, l'EPR (gomma etilenpropilenica) e la gomma butilica. Si tratta di materiali isolanti che si presentano compatti e omogenei, in contrapposizione alla carta impregnata che costituisce un isolante stratificato e non omogeneo, perché composto da due diversi materiali (carta ed impregnante).

E' interessante confrontare il comportamento dei diversi isolanti estrusi, per i diversi livelli di tensione, tenendo presente le seguenti fondamentali proprietà: rigidità dielettrica, perdite dielettriche ($\text{tg}\delta$) e resistenza alle scariche parziali.

Il PVC ha una rigidità dielettrica bassa e perdite eccessive, che ne rendono sconsigliabile l'impiego per tensioni maggiori di 10-15 kV. Ha una ottima resistenza alle scariche parziali.

Il PE è un materiale eccellente per quanto riguarda la rigidità dielettrica e le perdite dielettriche, appena accettabile per quanto riguarda la resistenza alle scariche parziali. Si ossida rapidamente, è infiammabile e poco igroscopico.

Tra i materiali derivati dal polietilene il PE reticolato è assai interessante, per le sue proprietà termiche, migliori di quelle del PE.

Tra le gomme sintetiche le proprietà migliori sono quelle della gomma etilenpropilenica (EPR) che, infatti, presenta un sempre più largo impiego. Ha una rigidità dielettrica superiore a quella del PVC, perdite dielettriche un po' elevate, anche se decisamente inferiori a quelle del PVC, una eccellente resistenza alle scariche parziali ed alle intemperie.

La gomma butilica non ha né sufficiente rigidità dielettrica né sufficiente resistenza alle scariche parziali per poterne allargare il campo di impiego oltre la media tensione.

I materiali più largamente impiegati per le guaine sono il piombo, il policloroprene e il PVC.

L'armatura di un cavo può essere costituita da nastri di acciaio o da fili di acciaio; gli schermi metallici sono di piombo, rame od alluminio.

3.2 Caratteristiche costruttive dei principali tipi di cavo

Nel seguito, verranno descritti brevemente i cavi isolati con isolante estruso, essendo quelli principalmente impiegati negli impianti elettrici a media e bassa tensione. Nella fig.II.4 sono riportati, a titolo di esempio, alcuni tipi di tali cavi.

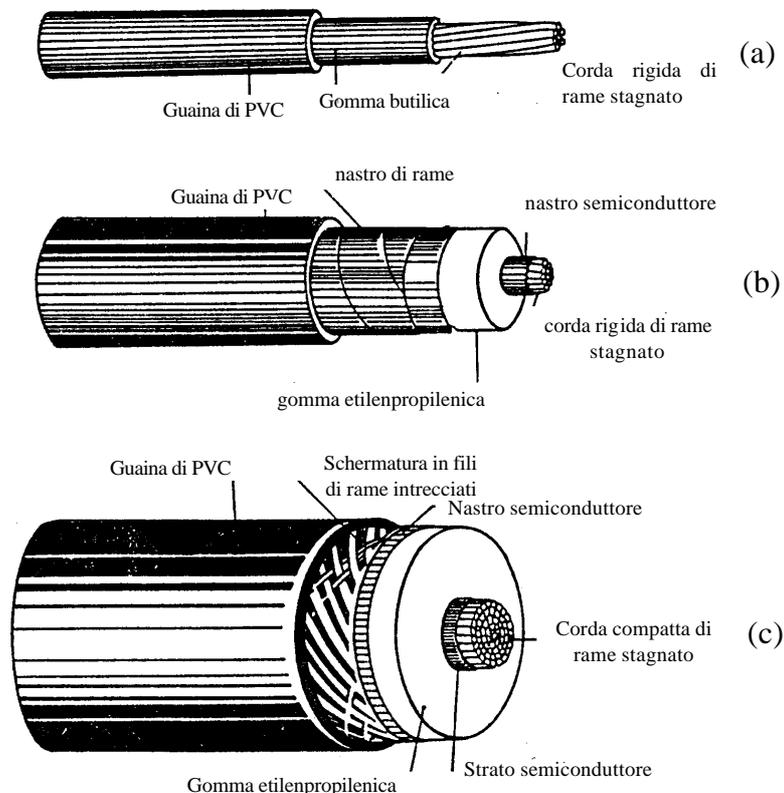


Fig. II.4 – Esempi di cavi isolati in isolante estruso per bassa tensione (a), per media tensione (b) e per alta tensione (c).

Nei cavi in bassa tensione l'isolante che circonda il conduttore viene in genere realizzato con mescole a base di PVC, gomma butilica o EPR ed è formato da più strati perfettamente aderenti tra loro. La guaina è in PVC, policloroprene o gomma. A volte, per protezione contro le sollecitazioni meccaniche e contro i roditori, è presente, sotto la guaina, un'armatura metallica in fili o piattina di acciaio. I cavi di bassa tensione trifase

possono essere caratterizzati dalla presenza di un quarto conduttore, il neutro, che serve a rendere disponibile la tensione di fase agli utilizzatori; il neutro può essere anche disposto concentricamente ai tre conduttori di fase isolati. Per distinguere i conduttori di fase da quello di neutro, ciascuno di essi viene distinto con un diverso colore; in particolare, vengono usati i colori nero, marrone e grigio per contraddistinguere i conduttori di fase, il colore celeste chiaro per contraddistinguere il conduttore di neutro. Si fa notare che viene, poi, impiegato il colore giallo-verde per contraddistinguere altri conduttori che, per i motivi che verranno illustrati in futuro, possono essere presenti, e cioè il conduttore di terra, di protezione o equipotenziale².

Nei cavi in media tensione, gli isolanti più impegnati sono la gomma etilenpropilenica (EPR) ed il polietilene reticolato (XLPE), che hanno sostituito completamente la gomma butilica. Per evitare che tra conduttore ed isolante possa eventualmente ionizzarsi l'aria presente, si tende a compattare la corda e, almeno per tensioni superiori a 3,6 kV, ad inserire uno schermo semiconduttore. Per motivi analoghi, sulla superficie dell'isolante può essere posto un ulteriore schermo semiconduttore, accoppiato eventualmente anche ad uno schermo metallico, per rendere radiale il campo.

Attualmente l'EPR e l'XLPE stanno estendendo il loro campo di azione anche all'alta tensione.

3.3 Grandezze elettriche caratteristiche dei cavi

Si definiscono grandezze elettriche caratteristiche di un cavo quei valori delle grandezze elettriche (tensione, corrente, ecc.) cui corrispondono i valori delle sollecitazioni ammissibili per un cavo, in condizioni normali ed anormali di funzionamento.

Poiché tra le varie parti costituenti un cavo quella più sensibile a qualunque tipo di sollecitazione è l'isolante, ad esso si farà riferimento nel seguito.

Le principali sollecitazioni cui è sottoposto l'isolante di un cavo sono:

- la sollecitazione elettrica, legata ai gradienti di tensione;
- la sollecitazione termica, legata alla temperatura e che, a sua volta, dipende dalle perdite per effetto Joule che si sviluppano nel cavo.

I valori ammissibili di tali sollecitazioni, per ovvi motivi, vanno ricavati:

- nel caso della sollecitazione elettrica, in condizioni normali e nelle condizioni anormali di funzionamento legate alla presenza di sovratensioni;
- nel caso della sollecitazione termica, in condizioni normali e nelle condizioni anormali di funzionamento legate alla presenza di sovracorrenti.

Con riferimento alla sollecitazione elettrica in condizioni anormali di funzionamento si definiscono le seguenti grandezze elettriche caratteristiche:

- U_0 = *tensione nominale di isolamento a frequenza industriale*, in kV efficaci, tra un conduttore isolato e la terra;

² Nel caso di cavi per corrente continua viene usato il colore nero per contraddistinguere il conduttore con polarità negativa mentre il rosso viene generalmente adoperato per contraddistinguere il conduttore con polarità positiva.

- U = *tensione nominale di isolamento a frequenza industriale*, in kV efficaci, tra due conduttori isolati del cavo.

Si definisce, poi, anche la *tensione di designazione di un cavo*; essa è individuata dalla coppia di valori di tensione (U_0 , U) che designano il cavo sotto l'aspetto dell'isolamento; ad esempio si usa la dicitura di "cavo a 0,6/1 kV" oppure "cavo a 6/10 kV".

I valori attribuiti dai costruttori alle suddette grandezze elettriche individuano le sollecitazioni elettriche ammissibili del cavo in condizioni anormali di funzionamento e cioè le massime sovratensioni che il cavo è in grado di sopportare.

Per quanto riguarda la sollecitazione termica in condizioni normali di funzionamento, si osservi che i conduttori presenti in un cavo quando sono percorsi da corrente sono sede di dissipazioni di potenza per effetto Joule; tali dissipazioni avvengono non soltanto nei conduttori di potenza veri e propri, ma anche in tutte le altre parti metalliche del cavo, per effetto di induzione da parte delle correnti che interessano i conduttori di potenza stessi.

Come già evidenziato in precedenza, in un cavo la parte sensibile alla temperatura è rappresentata dall'isolante. Infatti, il materiale isolante ha una "vita utile", L_u , che è legata alla temperatura di esercizio, θ . Il decadimento della vita utile di un cavo in funzione della temperatura di esercizio segue la nota legge di Arrhenius:

$$L_u = Ae^{-b\theta} \quad (\text{II.1})$$

con A e b costanti che dipendono dal tipo di materiale isolante.

E' opportuno sottolineare che la temperatura di esercizio dell'isolante va considerata pari a quella del conduttore, essendo egli stesso a stretto contatto.

Fissato il tipo di materiale isolante e il valore minimo della durata utile dello stesso (tipicamente 25 – 30 anni), per ogni tipo di isolante, e di conseguenza per ogni tipo di cavo, rimane fissato, in base alla (II.1), un valore massimo della temperatura del conduttore θ_N , detta temperatura massima di servizio del conduttore (nel caso di PVC essa vale 70 °C, nel caso di EPR e di XLPE essa vale 90 °C).

Per ogni valore di sezione, è possibile individuare, poi, attraverso l'impiego di opportuni bilanci termici, la massima corrente che può circolare continuamente, senza che venga superata il suddetto valore massimo di temperatura.

Con riferimento, infatti, alla situazione di regime si può ipotizzare che tutta la potenza generata nel conduttore per effetto Joule venga dissipata verso l'ambiente esterno. Per l'analisi del funzionamento è allora sufficiente imporre la seguente equazione di bilancio termico (fig. II.5):

$$P_d = R \cdot I^2 = (\theta_c - \theta_a) / (T_{is} + T_g + T_{est}) \quad (\text{II.2})$$

con T_{is} , T_g e T_{est} resistenze termiche dell'isolante, della guaina e dell'ambiente esterno, rispettivamente, e con θ_c e θ_a temperature sulla superficie del conduttore ed ambiente,

rispettivamente³. Nella (II.2) sia la resistenza elettrica del conduttore che le resistenze termiche sono funzione della sezione S.

Fissato θ_c al suo valore massimo ammissibile θ_N in condizioni normali di funzionamento, si può calcolare, per una assegnata sezione S della parte conduttrice del cavo, la massima corrente che a regime può circolare in esso; detta corrente è definita portata del cavo, I_Z ed è data, nel semplice caso della fig. II.5, da:

$$I_Z = \sqrt{\frac{\theta_N - \theta_a}{T_{\text{tot}}(S)R(S)}} \quad (\text{II.3})$$

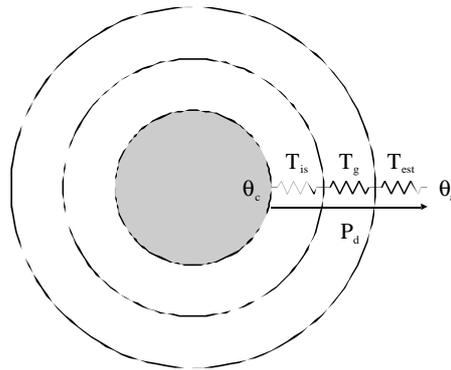
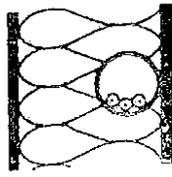


Fig. II.5: Circuito termico semplificato di un cavo unipolare in condizioni di regime

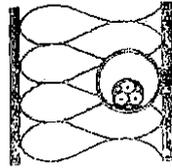
La portata è funzione di molti parametri quali il tipo di posa (che influenza la costante termica T_{est}), la vicinanza di altri conduttori, la sezione stessa del conduttore. Particolarmente significativa è l'influenza che ha il tipo di posa; quest'ultima può essere di vario tipo: interrata, su mensole, su passerelle perforate, in tubi protettivi circolari posati entro muri termicamente isolati, ecc.; alcuni esempi sono riportati nella fig. II.6.

Un modo più semplice di gestire la relazione appena considerata è quella di tabellare, fissato un valore convenzionale per la temperatura ambiente (tipicamente $\theta_a = 30 \text{ }^\circ\text{C}$) e nota la temperatura massima ammissibile per il tipo di isolante impiegato, la portata dei cavi per sezioni commerciali, per tipo di materiale conduttore e per tipo di isolante e per tipo di posa. Nella tab. II.3 è riportato un esempio qualitativo di come può essere strutturata una tale tabella, al variare del tipo di posa; le portate sono espresse in A.

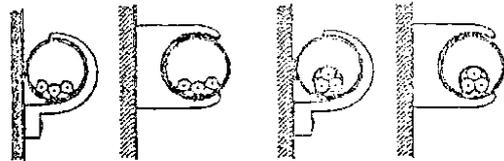
³ La relazione (II.2) è relativa ad un cavo unipolare di bassa tensione costituito dal conduttore di potenza, dall'isolante e da una guaina. Relazione più complesse, ma basate sullo stesso principio del bilancio termico, si possono ricavare per tutte le geometrie possibili dei cavi di media e bassa tensione.



Cavi senza guaina in tubi protettivi circolari posati entro muri termicamente isolanti



Cavi multipolari in tubi protettivi circolari posati entro muri termicamente isolanti



Cavi senza guaina in tubi protettivi circolari posati su o distanziati da pareti

Cavi multipolari in tubi protettivi circolari posati su o distanziati da pareti

Fig. II.6 : Alcuni esempi di possibili condizioni di posa di un cavo

Tabella II.3 – Portate I_z dei cavi

S [mm ²]	Rame				Alluminio			
	PVC		EPR		PVC		EPR	
	Posa 1 [A]	Posa 2 [A]						
1.5	8	12	10	14	7	11	9	13
2.5	14	18	16	20	13	17	15	19
4	20	24	22	26	19	23	21	25
6	26	30	28	32	25	29	27	31

Con riferimento alla sollecitazione termica in presenza di sovracorrenti – e, più in particolare di correnti di corto circuito – viene definita come grandezza elettrica caratteristica del cavo l'energia termica specifica W_T – cioè quella per unità di resistenza del conduttore – che il cavo è in grado di sopportare senza superare la temperatura massima ammissibile in condizioni di corto circuito. In corto circuito, infatti, essendo il fenomeno normalmente di breve durata per la presenza dei sistemi di protezione⁴, si ammette come temperatura massima ammissibile un valore maggiore di quello relativo alle condizioni di funzionamento normali.

⁴ Come si vedrà nei capitoli successivi, esistono nei sistemi elettrici sistemi di protezione contro il corto circuito che sono in grado di percepire la presenza di tale condizione di funzionamento anormale e di intervenire al fine di minimizzarne le conseguenze. Tali sistemi di protezione, di fatto,

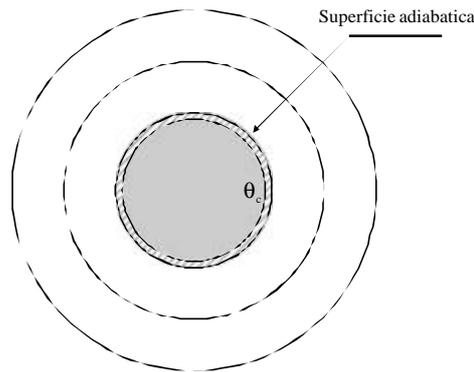


Fig. II.7: Circuito termico semplificato di un cavo unipolare in condizioni adiabatiche

Poiché usualmente l'intensità della corrente di corto circuito è elevata e, quindi, il tempo di eliminazione del guasto molto breve, il calcolo della suddetta energia può condursi ritenendo trascurabile la quantità di calore trasmessa dal conduttore al mezzo isolante e considerando, quindi, un riscaldamento adiabatico del conduttore stesso (fig. II.7).

Sotto tali ipotesi, tutta l'energia termica prodotta nel conduttore contribuisce ad elevarne la temperatura, per cui se si considera un conduttore di lunghezza L , sezione costante S , di resistenza $R = \rho L/S$ e percorso dalla corrente di corto circuito i , si ha che l'incremento infinitesimo della temperatura $d\theta$ che il conduttore subisce per effetto dell'energia accumulata per effetto Joule nell'intervallo di tempo infinitesimo dt soddisfa la seguente equazione differenziale:

$$Ri^2 dt = \rho \frac{L}{S} i^2 dt = c_v V d\theta \quad (\text{II.4})$$

con c_v calore specifico e $V=LS$ volume del conduttore

La resistività ρ è funzione della temperatura attraverso la ben nota relazione:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\theta), \quad (\text{II.5})$$

essendo α il coefficiente di variazione della resistività con la temperatura e ρ_0 la resistività a 0 °C. La (II.4), pertanto, può porsi nella forma:

$$i^2 dt = \frac{c_v S^2}{\rho_0} \frac{1}{1 + \alpha\theta} d\theta \quad (\text{II.6})$$

Se, adesso, si integra la (II.6) tra l'inizio del corto circuito (assunto a $t=0$) e l'istante t_f , si ha:

interrompono il flusso della corrente di corto circuito che, pertanto, perdura solo per l'intervalli di tempo necessario al sistema di protezione stesso per eliminare il guasto; tale intervallo di tempo è, pertanto, denominato "tempo di eliminazione del guasto".

$$\int_0^{t_f} i^2 dt = \frac{c_v S^2}{\rho_0} \int_{\theta_i}^{\theta_f} \frac{1}{1 + \alpha\theta} d\theta = \frac{c_v S^2}{\rho_0 \alpha} \ln \frac{1 + \alpha\theta_f}{1 + \alpha\theta_i} \quad (\text{II.7})$$

essendo θ_f e θ_i le temperature raggiunta all'istante $t=t_f$, e di inizio del fenomeno, all'istante $t=0$.

La grandezza a secondo membro della (II.7) rappresenta, di fatto, l'energia specifica – cioè quella per unità di resistenza del conduttore – che interessa il cavo durante il corto circuito. Tale energia raggiunge il suo valore massimo W_T se si assumono come temperatura di inizio del corto circuito quella massima ammissibile in condizioni di funzionamento normale θ_N e come temperatura finale quella massima ammissibile θ_{\max} per l'isolante in condizioni di corto circuito; in tal caso la (II.7) diventa:

$$W_T = \int_0^{t_f} i^2 dt = \frac{c_v S^2}{\rho_0 \alpha} \ln \frac{1 + \alpha\theta_{\max}}{1 + \alpha\theta_N} = K^2 S^2. \quad (\text{II.8})$$

Il coefficiente K nella (II.8) dipende chiaramente dalle caratteristiche del metallo con cui è realizzato il conduttore; alla massima energia termica W_T che il cavo è in grado di sopportare senza superare la temperatura massima ammissibile in condizioni di corto circuito viene spesso anche dato il nome di integrale di Joule del cavo.

Nella tabella II.4 sono indicati alcuni valori di K , nell'ipotesi che all'istante iniziale di corto circuito il cavo si trovi alla massima temperatura di servizio $\theta_i = \theta_N$.

Se il cavo ha una temperatura iniziale inferiore alla massima temperatura di servizio θ_N , perché, quando si verifica il corto circuito, è percorso da una corrente inferiore alla portata relativa alle sue condizioni d'installazione, i valori di K indicati nella tabella sono a favore della sicurezza.

Tabella II.4 - Valori del coefficiente K (CEI 64-8)

Natura dell'isolante	Materiale conduttore	
	Rame	Alluminio
PVC ($\theta_N = 70 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta_{\max} = 160 \text{ }^\circ\text{C}$)	115	76
Gomma naturale ($\theta_N = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta_{\max} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$), gomma		
Butilica ($\theta_N = 85 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta_{\max} = 220 \text{ }^\circ\text{C}$)	135	89
Gomma etilenpropilenica, polietilene reticolato ($\theta_N = 90 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta_{\max} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$)	143 (¹)	94 (¹)

(¹) Se le giunzioni saldate a stagno, si applicano i valori K sopraindicati per il PVC, perché le giunzioni non sopporterebbero le temperature corrispondenti a valori di K superiori.

3.4 Designazione dei cavi

Esistono due sistemi di designazione dei cavi :

- sistema di designazione secondo Norma CEI 20 – 27,
- sistema di designazione secondo Tabella CEI - UNEL 35011.

La Norma CEI 20 - 27 e la Tabella CEI - UNEL 35011 stabiliscono le regole per designare un dato tipo di cavo fornendo una descrizione abbreviata della configurazione del cavo stesso.

a) Sistema di designazione secondo Norma CEI 20 - 27

La sigla di designazione (tab.II.5) è formata da un complesso di lettere e numeri, suddivisi in tre parti che indicano:

parte 1 - riferimento alle norme e alla tensione di designazione del cavo;

parte 2 - caratteristiche costruttive del cavo in sequenza radiale partendo dal materiale isolante, quindi, dopo un trattino (-) materiale e forma dei conduttori (cioè procedendo dall'esterno verso l'interno del cavo);;

parte 3 - dopo uno spazio libero, numero e sezione dei conduttori.

Per la designazione del numero e della sezione dei conduttori sono previsti i seguenti simboli:

nxS oppure nGS

n - numero dei conduttori che costituiscono il cavo;

x - simbolo di moltiplicazione da usare nei cavi senza conduttore di protezione;

G - simbolo di moltiplicazione da utilizzare nei cavi con conduttore di protezione (colore giallo-verde);

S - sezione dei conduttori in millimetri quadrati.

La sigla deve essere preceduta dalla denominazione cavo e seguita dalla citazione del numero della tabella UNEL, ove questa esiste.

Ad esempio cavo H07V-U 2x2,5 designa un cavo armonizzato per tensioni nominali 450 V / 750 V con isolamento in PVC, costituito da due conduttori di rame a filo unico da 2,5 mmq

b) Sistema di designazione secondo secondo tabella CEI - UNEL 35011

La sigla di designazione (tab.II.5) è formata da un complesso di lettere e numeri, suddivisi in tre parti che indicano:

parte 1 - numero e sezione dei conduttori ;

parte 2 - caratteristiche costruttive del cavo in sequenza radiale partendo dal materiale conduttore (cioè procedendo dall'interno verso l'esterno del cavo);

parte 3 - riferimento alla tensione di designazione del cavo, preceduta da un trattino (-);

Ai fini della designazione completa di un cavo, la sigla deve essere preceduta dalla denominazione cavo e seguita dalla citazione del numero della tabella UNEL, ove questa esista.

Si ricordano le sigle di designazione dei più comuni cavi di media e di bassa tensione impiegati negli impianti di distribuzione.

- I cavi per media tensione tripolari ad elica visibile (X) in alluminio isolati con gomma etilenpropilenica ad alto modulo elastico, schermati, sotto guaina di PVC (sigla: ARG7H1RX 12/20 kV);

esempio di designazione: CAVO 3 x (1 x 185) ARG7H1RX-12/20 kV.

- I cavi per media tensione tripolari ad elica visibile (X) isolati con gomma etilenpropilenica ad alto modulo elastico, schermati, sotto guaina di PVC (sigla: RG7H1RX-12/20 kV);

esempio di designazione: CAVO 3 x (1 x 120) RG7H1RX-12/20 kV.

- I cavi per media tensione unipolari isolati con gomma etilenpropilenica ad alto modulo elastico, schermati, sotto guaina di PVC (sigla: RG7H1R-12/20 kV);
esempio di designazione: CAVO 1 x 630 RG7H1R-12/20 kV.
- I cavi per bassa tensione quadripolari, con tre anime di fase e conduttore di neutro concentrico di rame, isolati con gomma etilenpropilenica ad alto modulo elastico, sotto guaina di PVC (sigle: UG7OCR-0,6/1 kV e RG7OCR-0,6/1 kV);
esempio di designazione: CAVO 3 x 95 + 50 C RG7OCR-0,6/1 kV.
- I cavi per bassa tensione bipolari, con anima e conduttore di neutro concentrico di rame, isolati con gomma etilenpropilenica ad alto modulo elastico, sotto guaina di PVC (sigle: UG7CR-0,6/1 kV e RG7CR-0,6/1 kV);
esempio di designazione: CAVO 1 x 16 + 16 C RG7CR-0,6/1 kV.

Tab. II.5 – Sigle di designazione dei cavi di media e bassa tensione .

DESIGNAZIONE SECONDO CEI 20 - 27

Riferimento alle norme	H			ARMONIZZATO con marchio < HAR >		
	A			AUTORIZZATO		
	N			NAZIONALE		
Tensione nominale		03		TENSIONE NOMINALE U ₀ /U 300/300 V		
		05		TENSIONE NOMINALE U ₀ /U 300/500 V		
		07		TENSIONE NOMINALE U ₀ /U 450/750 V		
		1		TENSIONE NOMINALE U ₀ /U 0.6/1 kV		
Materiale isolante			V	POLIVINILCLORURO – PVC		
			R	GOMMA SINTETICA		
			G9	ELASTOMERO RETICOLATO SPECIALE		
Schermatura e armatura				C	CONDUTTORE CONCENTRICO DI RAME	
				A7	SCHERMO ELETTROSTATICO DI ALLUMINIO	
				C7	SCHERMATURA A FILI O NASTRI	
				C4	SCHERMATURA A TRECCIA DI FILI DI RAME	
				Z2	ARMATURA A FILI	
				Z3	ARMATURA A PIATTINE	
				Z4	ARMATURA A NASTRI	
Guaina				N	POLICLOROPRENE	
				V	POLIVINILCLORURO – PVC	
Materiale del conduttore				- A	ALLUMINIO (per il rame = nessuna sigla)	
Forma del conduttore					- U	FILO UNICO
					- R	CORDA RIGIDA
					- K	CORDA FLESSIBILE PER POSA FISSA
					- F	CORDA FLESSIBILE PER SERVIZIO MOBILE

DESIGNAZIONE SECONDO CEI-UNEL 35011

Natura e forma del conduttore	A				ALLUMINIO (per il rame = nessuna sigla)		
				U	FILO UNICO		
				R	CORDA RIGIDA		
				F	CORDA FLESSIBILE		
				S	CONDUTTORE SETTORIALE		
Materiale isolante				G1	GOMMA SINTETICA		
				G5	GOMMA EPR		
				G7	GOMMA EPR AD ALTO MODULO		
				G9	ELASTOMERO RETICOLATO SPECIALE		
				G10	ELASTOMERO RETICOLATO SPECIALE		
				R	POLIVINILCLORURO - PVC		
				R2	PVC DI QUALITA' SUPERIORE		
Forma dei cavi				E4	POLIETILENE RETICOLATO SPECIALE		
					O	ANIME RIUNITE PER CAVO ROTONDO	
Schermatura e armatura					D	ANIME PARALLELE PER CAVO PIATTO	
						C	CONDUTTORE CONCENTRICO DI RAME
						H	SCHERMO ELETTROSTATICO DI ALLUMINIO
						H1	SCHERMATURA A FILI O NASTRI
						H2	SCHERMATURA A TRECCIA DI FILI DI RAME
						F	ARMATURA A FILI
						Z	ARMATURA A PIATTINE
Guaina					N	ARMATURA A NASTRI	
					A	ARMATURA A FILI DI ACCIAIO	
					R	POLIVINILCLORURO - PVC	
					K	POLICLOROPRENE	