

Capitolo 3

Impianti in Alta Tensione

Gli elementi fondamentali degli impianti in AT sono le linee di trasmissione dell'energia elettrica: per lo più di tipo trifase, possono estendersi per molte migliaia di chilometri, come avviene nei grandi elettrodotti usati per la trasmissione.



Figura 3.1: linea aerea.

Sono presenti anche altri elementi, quali ad esempio banchi di compensazione di energia reattiva e trasformatori di misura, sui quali però non ci soffermeremo.

Le linee elettriche di trasmissione possono essere aeree oppure in cavo. Un esempio di linea aerea è riportato in Figura 3.1, mentre una linea in cavo, tipicamente interrata, è costituita sempre da tre conduttori, tenuti separati da un isolante e racchiusi in una guaina protettiva. I conduttori di una linea aerea tendono a disporsi secondo una curva detta catenaria, descritta in dettaglio nell'appendice posta alla fine di questo capitolo: essa rappresenta la curva secondo cui si distribuiscono gli

anelli di una catena qualora questa venga sostenuta da due sostegni, ad esempio, di uguale altezza. Notate pure che, oltre ai tre conduttori di energia, è presente un quarto conduttore, posto più in alto e di sezione più piccola, detto *fune di guardia*, la cui funzione verrà discussa nel seguito.

La tabella che segue mostra i normali valori della tensione dei sistemi di trasmissione: i valori tra parentesi sono considerati non preferenziali in sede internazionale, mentre i valori non normalizzati in Italia (norme CEI) sono indicati in corsivo.

Nominale (kV)	Massima (kV)
3	3.6
6	7.2
10	12
(15)	(17.5)
20	24
30	36
(45)	(52)
66	72.5
<i>(110)</i>	<i>(123)</i>
132	145
(150)	(170)
220	245
<i>275</i>	<i>300</i>
330	362
380	420
<i>500</i>	525
700 ÷ 750	765

È importante segnalare che l'estensione della rete aerea supera, di norma, di gran lunga l'estensione della rete in cavo: questo perché il costo chilometrico delle linee aeree è decisamente più basso di quello delle linee in cavo.

3.1 Elementi costitutivi delle linee aeree

Gli elementi costitutivi delle linee elettriche aeree sono i conduttori, preposti al vero e proprio trasporto dell'energia, i sostegni, che tengono le linee lontano dal suolo evitando interazione con esso e con le persone, e gli isolatori, che hanno la funzione di evitare che i sostegni e i conduttori vengano in contatto elettrico tra loro.

• Conduttori

Nelle linee elettriche in AT vengono adoperati conduttori nudi, privi di isolamento solido, opportunamente distanziati tra loro. I conduttori per linee aeree sono generalmente di sezione circolare, a filo unico, fino ad una sezione non superiore a 50 mm²: ciascun conduttore è costituito da un'anima in corda di acciaio ad alta resistenza meccanica ed un mantello esterno costituito da più strati di filo di rame o di alluminio crudo avvolti ad elica; si dice, in gergo, che viene adoperato un conduttore bimetallico. Il motivo per cui viene usato questo tipo di conduttore è da ricercarsi nel cosiddetto **effetto pelle**.

Consideriamo un campo elettromagnetico, caratterizzato da una certa frequenza, che interagisca con una lamina metallica. Si verifica sperimentalmente che esso penetra nella regione metallica, praticamente, solo fino a un certo spessore, detto *spessore di penetrazione*, che vale circa 10 mm per il rame, alla frequenza industriale di 50 Hz. Quindi, quando in una linea aerea in alternata sono necessarie elevate sezioni, si fa ricorso a funi con anima in acciaio e regione periferica in rame o lega di alluminio dimensionata per la corrente elettrica totale: l'anima di acciaio ha solo funzione meccanica consentendo una maggiore lunghezza delle campate tra i tralicci. La corrente che interessa la parte di acciaio è dell'ordine del 3% della totale.

Nel caso di sezioni superiori a 50 mm², i conduttori per linee aeree sono costituiti da corde, composte da più fili elementari avvolti ad elica di grande passo attorno all'anima centrale: il grande vantaggio delle corde è la loro flessibilità.

Nella tabella che segue vengono riportate le caratteristiche dei conduttori in alluminio-acciaio secondo le Norme UNEL, che riportano dimensioni, caratteristiche meccaniche ed elettriche.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	L	M	N	O	P	Q
127.6	20.91	148.5	26	2.50	7	1.95	6.14	15.85	6430	0.2282	522.3	250	19	7350
184.7	43.10	227.8	30	2.80	7	2.80	4.29	19.60	8071	0.1576	859.4	370	18	7950
264.6	43.10	307.7	26	3.60	19	2.80	6.14	22.80	9148	0.1100	1081	455	19	7350
288.6	65.81	354.4	30	3.50	19	2.10	4.38	24.50	12295	0.1009	1332	496	17.8	7700
349.2	78.94	428.2	30	3.85	19	2.30	4.38	2.90	14632	0.08337	1607	560	17.8	7700
415.6	93.27	508.9	30	4.20	19	2.50	4.38	29.30	15582	0.05631	1982	720	19.3	6500
519.5	65.81	585.3	54	3.50	19	2.10	7.96	31.50	17137	0.07004	1906	630	17.8	7700
628.7	78.94	707.6	54	3.85	19	2.30	7.96	34.60	18492	0.04654	2392	820	19.3	6500

- A** sezione complessiva dei conduttori in alluminio (mm²)
- B** sezione complessiva dei conduttori in acciaio (mm²)
- C** sezione totale A + B (mm²)
- D** numero di fili in alluminio
- E** diametro di ciascun filo in alluminio (mm)
- F** numero di fili in acciaio

G	di diametro di ciascun filo in acciaio (mm)
H	rapporto delle sezioni tra i conduttori in alluminio e acciaio
I	di diametro esterno del conduttore (mm)
L	carico di rottura (kg)
M	resistenza ohmica per unità di lunghezza a 20 °C (W/km)
N	peso per unità di lunghezza (kg/km)
O	corrente massima ammissibile agli effetti termici (A)
P	coefficiente di dilatazione termica lineare ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
Q	modulo di elasticità (kg/mm^2)

Condizioni particolari di umidità e pressione possono favorire l'instaurarsi di uno strano, quanto fastidioso, fenomeno noto come **effetto corona**. Spesso la presenza di tale effetto si rivela con un caratteristico crepitio accompagnato da un alone luminescente, sotto forma di una specie di 'manicotto' di colore azzurrino che riveste, per un certo tratto, la linea. Questo effetto, collegato alla ionizzazione degli strati di aria (rigidità dielettrica 24 kV/cm, in condizioni normali) più prossimi al conduttore, deve essere combattuto con decisione, dato che è fonte di perdite di energia e di disturbi di vario genere, sotto forma di scariche il cui spettro è tanto ampio da arrecare interferenze apprezzabili fino alle frequenze di alcuni megahertz, tipiche delle comunicazioni radioelettriche. Se le tensioni sono molto elevate, l'effetto corona può costituire, inoltre, il punto di partenza per scariche elettriche più gravi.

Per contrastare questo effetto è necessario abbassare il campo elettrico lungo le linee e ciò può essere ottenuto con successo adottando linee a conduttori multipli a fasci, che hanno proprio la funzione di aumentare il diametro 'efficace' dei conduttori, dato che il valore di tensione critica alla quale l'effetto corona comincia a manifestarsi è tanto più basso quanto minore è il diametro dei fili e la loro distanza. Dal singolo cavo si passa, allora, alle linee 'binate' e 'trinate' fino alle configurazioni più complesse a fasci di conduttori previste per le altissime tensioni. Inoltre, sempre per contrastare l'effetto corona, si impiegano conduttori tubolari in rame costituiti da tanti settori incastrati tra loro ed avvolti ad elica di grande passo. Altro tipo è il conduttore denominato 'anaconda', anch'esso tubolare, ma formato da tanti fili sottili di rame a sezione circolare, disposti ad elica e sostenuti da un'armatura interna costituita da un nastro avvolto, anch'esso ad elica, di sezione a doppia T.

• Sostegni

I sostegni impiegati nella realizzazione delle linee in AT sono in gran parte i cosiddetti **pali a traliccio**.



Figura 3.2: palo a fusto piramidale e palo a fusto a Y.

I pali a traliccio sono costituiti da elementi meccanici, detti profilati, che si sviluppano verticalmente sotto forma di montanti e da profilati di giunzione, detti appunto tralicci. Tutti i profilati impiegati sono normalmente in acciaio e sono protetti dalla corrosione mediante zincatura a caldo o mediante vernici. La forma e le dimensioni dei sostegni sono determinate dalla disposizione dei conduttori (ad esempio disposizione orizzontale o verticale), dalle distanze reciproche che devono essere rispettate tra i conduttori stessi e tra i conduttori e il sostegno, tenendo conto della tensione nominale, delle sovratensioni previste e del movimento dei conduttori. Le principali forme sono a fusto piramidale oppure a fusto a Y, entrambe mostrate in Figura 3.2.

La distanza tra i conduttori viene stabilita in funzione della tensione nominale della linea e, soprattutto, per evitare i pericoli di contatto tra i conduttori in conseguenza delle oscillazioni indotte dai colpi di vento, cadute di neve o manicotti di ghiaccio. Le norme CEI fissano i valori minimi della distanza sia tra i conduttori nei punti di attacco dei sostegni della linea, sia tra ciascun conduttore e loro accessori sotto tensione e le parti più vicine ai sostegni. La tabella che segue fornisce i valori medi orientativi delle distanze tra i conduttori, non soltanto per linee aeree in alta tensione, in funzione della tensione nominale.

Tensione nominale (kV)	Distanza (m)
10 ÷ 20	1.00 - 1.50
30	1.50 - 2.00

45	1.80 - 2.50
66	2.00 - 3.00
80	2.50 - 3.50
120	3.50 - 5.00
150	4.00 - 6.00
220	6.00 - 8.00
380	8.00 - 9.00

Nelle linee trifasi ad una sola terna, a tensione non molto elevata, la disposizione dei conduttori più comunemente usata è quella simmetrica, con tre conduttori disposti ai vertici di un triangolo equilatero: in tal modo, si realizza una perfetta uguaglianza per le tre fasi dei parametri elettrici della linea. Per le linee trifasi a tensione molto elevata, si preferisce la disposizione in uno stesso piano orizzontale allo scopo di ridurre l'altezza dei pali, eseguendo la trasposizione ciclica dei tre conduttori per compensare gli squilibri tra le induttanze e le capacità dei conduttori allineati.

La campata, cioè la distanza tra due pali, dipende dal sostegno impiegato e da considerazioni di carattere tecnico ed economico, che consigliano di scegliere lunghezze di campata crescenti al crescere della tensione di esercizio. Con i tralicci in ferro si possono raggiungere i valori più diversi fino a quelli eccezionali degli attraversamenti di laghi, corsi d'acqua, bracci di mare: nel fiordo di Sogne, in Norvegia, ad esempio, la lunghezza della campata è di 4890 m.

• Isolatori

Gli isolatori sono componenti che vengono utilizzati per collegare meccanicamente i conduttori ad altri elementi dell'impianto, tipicamente i sostegni, realizzando il necessario isolamento elettrico. Essi devono pertanto sopportare le eventuali sollecitazioni meccaniche, impedire la scarica tra i conduttori e gli altri elementi ad essi collegati e contenere il più possibile eventuali correnti di dispersione. Un esempio di isolatore, del tipo cosiddetto a **cappa e perno** è riportato in Figura 3.3. Esso è costituito da una campana in porcellana o vetro che si allarga alla base, dove presenta un certo numero di ondulazioni. Una cappa di ghisa o di acciaio è calettata sulla parte superiore della campana ed un perno nella parte inferiore: cappa e perno si adattano l'una all'altro mediante una articolazione.



Figura 3.3: due isolatori a cappa e perno, sovrapposti.

Dal punto di vista elettrico, gli isolatori devono avere le tre caratteristiche di seguito brevemente illustrate.

» Elevata resistività di massa e superficiale, necessaria per limitare le correnti di dispersione. La resistività superficiale può diminuire enormemente in presenza di umidità, pioggia, depositi conduttori (emissioni industriali o zone ad alta salinità). In questo caso si adottano isolatori di forma particolare con profonde ondulazioni oppure, in taluni casi, si ricorre addirittura ad impianti di lavaggio.

» Elevata rigidità dielettrica di massa e superficiale, capace di inibire una scarica all'interno del materiale o provocarne una che segua il profilo della superficie dell'isolatore. La rigidità dielettrica può essere influenzata dalle condizioni atmosferiche, e, per evitare che il materiale assorba umidità, si ricorre, quando necessario, alla verniciatura o alla vetrificazione delle superfici degli isolatori. Per migliorare la caratteristiche di rigidità superficiale, gli isolatori vengono spesso realizzati in forma molto ondulata.

» Dal punto di vista meccanico un isolatore deve resistere a vari tipi di sollecitazione. Sono sottoposti principalmente a trazione gli isolatori impiegati per sostenere ed ancorare linee aeree. Sono soggetti a compressione gli isolatori cosiddetti portanti, ossia quegli isolatori su cui poggiano le linee. Si possono anche avere sollecitazioni di flessione e di torsione. Buone caratteristiche meccaniche sono, dunque, un elemento fondamentale nella realizzazione dell'isolatore.

Per quanto riguarda i materiali impiegati, gli isolatori si realizzano in porcellana o vetro (oggi prevalentemente vetro). Esistono vari tipi di isolatori, ma per le linee in AT si utilizzano sempre **isolatori a sospensione**. Questi sono costituiti da *catene* di elementi, il cui numero dipende dalla tensione di servizio, che sono mobili

intorno al loro punto di attacco al sostegno. In Figura 3.4 sono riportate due tipiche catene di isolatori.



Figura 3.4: catene di isolatori.

• **Linee in cavo**

Nei sistemi elettrici in AT trovano impiego linee in cavo, monofasi o trifasi. Si tratta in genere di linee relativamente corte, con estensioni che non superano qualche decina di chilometri. In Figura 3.5 è rappresentata la sezione di un tipico cavo tripolare. Il materiale più comunemente impiegato è il rame ricotto, mentre l'alluminio è adoperato solo per cavi speciali. La calza, di materiale conduttore, ha la funzione di schermo elettrostatico e partecipa anche alla protezione meccanica del cavo. La guaina è in materiale isolante (gomma sintetica, polietilene, PVC).

Molto diffusi per tensioni fino a 60 kV sono i **cavi in carta impregnata**, cosiddetti a causa dell'isolamento realizzato in carta manilla, ricavata dalle fibre della canapa, sotto forma di nastro, avvolta in strati elicoidali di numero crescente con la tensione, impregnata con oli minerali e resine per eliminare l'aria che è facilmente ionizzabile. Poiché la carta perde le sue proprietà isolanti se assorbe umidità o contiene gas occlusi, l'impregnazione avviene in autoclave in cui si effettua anche l'essiccamento sottovuoto, a temperatura di circa 100 °C, in modo da espellere gas ed umidità. Il cavo viene poi forzato in una guaina di piombo e protetto con rivestimenti diversi. I cavi in carte impregnata possono essere unipolari, con sezioni fino a 630 mm², oppure tripolari, con sezioni fino a 400 mm². Un grave inconveniente che presenta questo tipo di cavi è quello costituito dalla presenza, nell'isolamento, di spazi vuoti dovuti ad imperfetta impregnazione oppure a successive deformazioni del cavo in esercizio. Per questo motivo, per tensioni superiori a 60 kV, si utilizzano cavi ad olio fluido o cavi a gas compresso.

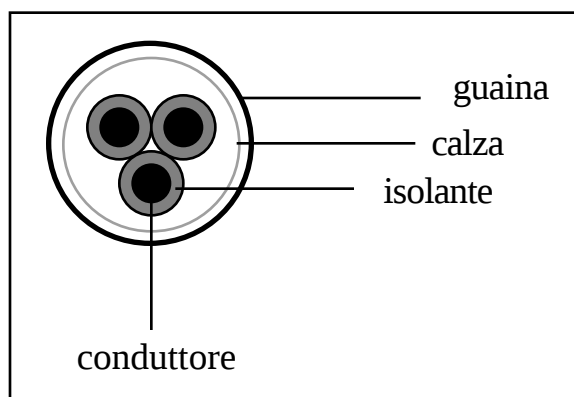


Figura 3.5: rappresentazione schematica di cavo tripolare

I **cavi ad olio fluido**, unipolari o tripolari, contengono al loro interno l'olio, ad una pressione variabile tra 1 e 3 atmosfere, che mantiene il cavo sempre impregnato in modo perfetto e costante, evitando la formazione di spazi vuoti pericolosi per l'isolamento.

Di impiego più limitato sono i **cavi a gas compresso**, nei quali si evita la formazione di vuoti immettendo nel cavo gas inerte, generalmente azoto, alla pressione di 15 atmosfere.

Parallelamente a quella dei cavi tradizionali, è in corso, ormai da diversi anni, una vasta sperimentazione di **cavi superconduttori**, costituiti da materiali che, se portati a temperature sufficientemente basse, pochi gradi assoluti per intenderci, mostrano una drastica riduzione della resistività. Sebbene la scoperta della superconduttività da parte di H. Kammerlingh Onnes risalga al 1911, è soltanto in tempi recenti, nel 1986, che J. G. Bednorz e K. A. Muller misero a punto una nuova classe di materiali che diventa superconduttrice a temperature più elevate. La comunità scientifica internazionale sta dedicando da alcuni anni parecchi sforzi per tentare di produrre materiali che esibiscano le proprietà superconduttrici a temperature non molto diverse da quella ambiente: l'uso diffuso di cavi superconduttori abbatterebbe drasticamente le perdite in rete, dovute all'effetto Joule, che dissipano il 12% dell'energia prodotta. È in corso, ad esempio, a Detroit, negli Stati Uniti, una vasta sperimentazione di cavi superconduttori, a resistenza praticamente nulla, a cui partecipa anche la Pirelli, dalla costruzione alla messa in opera.

Prima di concludere questo paragrafo, ritroviamo nelle norme CEI (20 - 31 e 20 - 32) alcune delle definizioni riportate.

Cavo: denominazione generica usata per indicare un conduttore uniformemente isolato o un insieme di più conduttori uniformemente isolati e riuniti, generalmente provvisto di uno o più rivestimenti protettivi e caratterizzato da un grande sviluppo in lunghezza.

Conduttore (di un cavo): filo o corda di metallo, generalmente rame o alluminio (puro, in lega), destinato a condurre la corrente elettrica.

Isolante (di un'anima o di un cavo): involucro di materiale dielettrico destinato a sopportare la tensione elettrica.

Rivestimento protettivo: termine generico per indicare la parte del cavo che non ha funzione essenzialmente elettrica ma di protezione meccanica, chimica, e così via; può essere costituito da una guaina metallica o non metallica, da un'armatura, una fasciatura, o da più di detti elementi.

Guaina (di un cavo): rivestimento protettivo costituito da un tubo continuo e aderente di materiale non metallico.

3.2 Equazioni delle linee

In questo paragrafo vogliamo introdurre un nuovo tipo di circuiti, detti 'a costanti distribuite'. Per la verità, la parola 'circuiti' usata in questo contesto può essere assai ingannevole poiché, come si discuterà nel dettaglio tra non molto, questi circuiti introducono un tempo di ritardo tra l'insorgere della causa ed il manifestarsi dell'effetto, cosa che in un circuito, normalmente inteso, non può mai verificarsi. Tanto è vero che la letteratura tecnica parla di circuiti 'a costanti concentrate', per indicare quelli che finora abbiamo inteso nel senso di circuiti elettrici, in contrapposizione a quelli 'a costanti distribuite'. Ma, prima di introdurre in maniera rigorosa questi nuovi concetti, cominciamo con un semplice esempio che ci faccia intuire cosa sia questo 'tempo di ritardo'.

Prendiamo in esame il semplice circuito RC di Figura 3.6, che supporremo a riposo per $t < 0$, e consideriamo l'andamento temporale della tensione sulla capacità.

La tensione forzante sia un gradino di ampiezza $E = 2\text{ V}$, la resistenza e la capacità siano pari, rispettivamente, a

$$R_1 = 50\text{ W}, \quad C_1 = 1\text{ mF}.$$

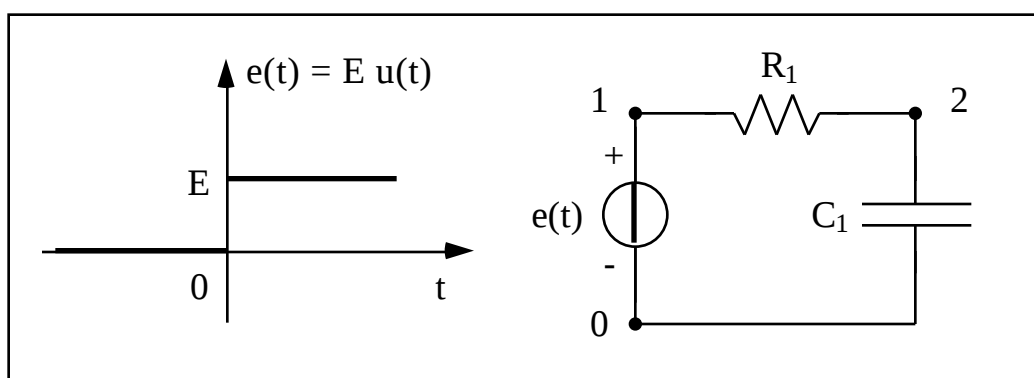


Figura 3.6: circuito RC forzato da un generatore a gradino.

Il listato Spice riportato ci consente di ottenere rapidamente le dinamiche riportate in Figura 3.7: anche se il generatore in ingresso commuta istantaneamente al valore E, la tensione ai capi del condensatore evolve verso questo valore di regime, secondo la relazione

$$v_2(t) = E (1 - e^{-t/\tau}) ,$$

teoricamente in un tempo infinito, praticamente raggiungendo il valore di regime in 4 o 5 volte la costante di tempo, che è pari a

$$\tau = R_1 C_1 = 50 \cdot 10^{-3} \text{ s} = 0.05 \text{ s} = 50 \text{ ms} .$$

Esempio 3.1

* Circuito RC

```

VE      1      0      PWL(0 2 10 2)
R1      1      2      50
C1      2      0      1m      IC=0
.TRAN   10m      1      0      10m      UIC
.PROBE
.END

```

Ritrovate le cose che abbiamo detto sui grafici fatti con Probe e riportati in Figura 3.7, la quale testimonia che, seppure poco per volta, la tensione del condensatore risponde *istantaneamente* alla sollecitazione prodotta dal generatore. Raggiunge il valore di regime dopo qualche costante di tempo, ma la risposta è immediata. Detto in altri termini, tutte le parti che costituiscono il circuito si accorgono istantaneamente dell'avvenuta commutazione del generatore, anche se si adeguano ai nuovi valori di regime in un determinato intervallo di tempo.

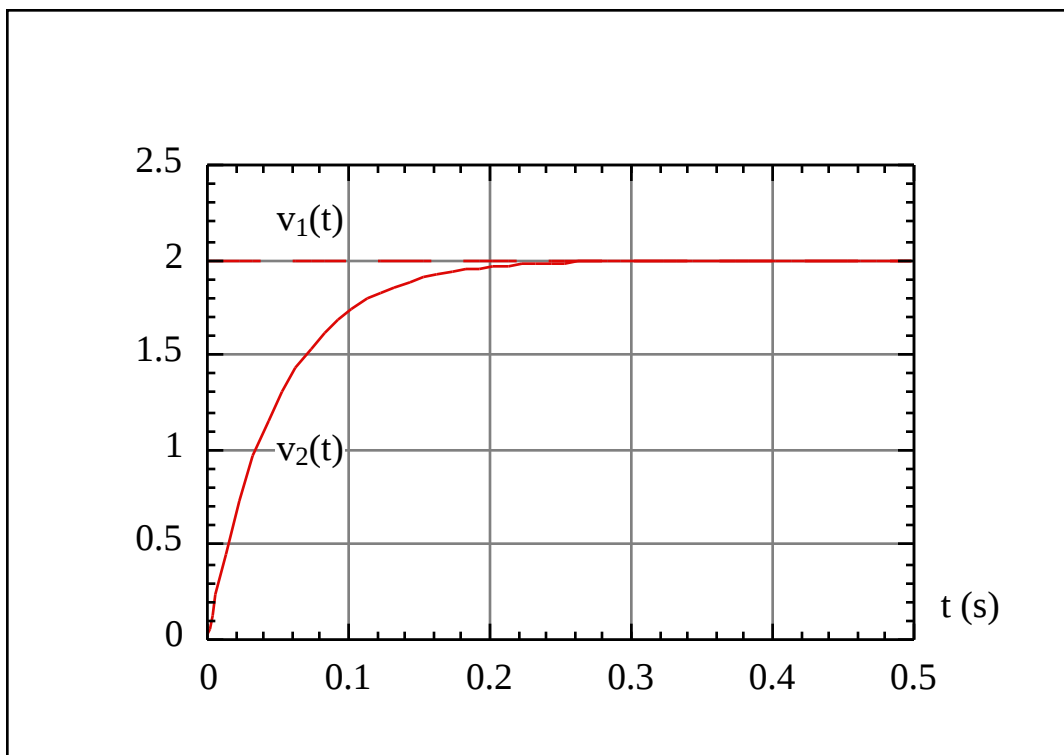


Figura 3.7: andamento temporale della tensione del generatore e del condensatore.

Ora, se come mostrato in Figura 3.8 tra il generatore e la serie del resistore e del condensatore si interpone una linea di trasmissione, rappresentata dai due tratti di conduttore più doppi (non preoccupatevi troppo di cosa rappresenti veramente per il momento) e con un voltmetro si misura la tensione ai capi del condensatore, si troverà che la risposta del condensatore non è più immediata.

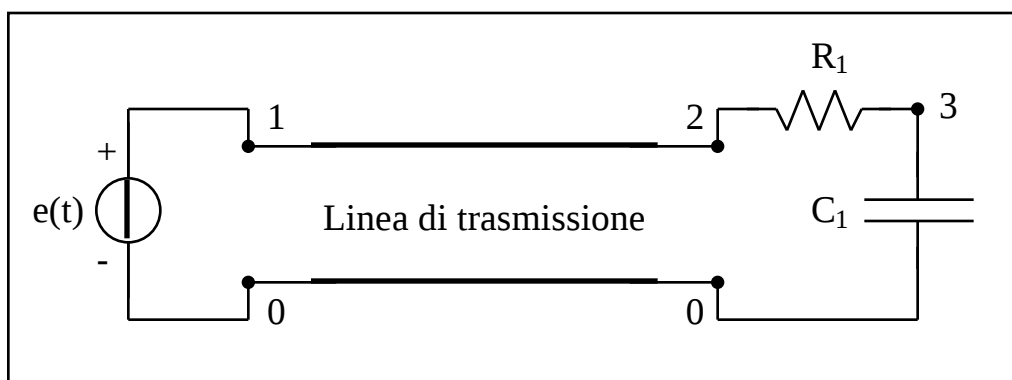


Figura 3.8: una linea di trasmissione è interposta tra generatore e carico.

Ci vuole un certo tempo, detto **tempo di ritardo**, o semplicemente ritardo, perché il condensatore cominci a rispondere alla sollecitazione in ingresso. Succede pure che il valore di regime raddoppia, ma questa è un'altra storia che cercheremo di chiarire tra poco. La cosa veramente nuova è il ritardo introdotto dalla linea di trasmissione, un doppio bipolo che abbiamo interposto tra generatore e carico. In Figura 3.9 abbiamo riportato la tensione misurata ai capi del condensatore indicata

con 'v(3)' posto alla fine di una linea che introduce un tempo di ritardo di 1 secondo.

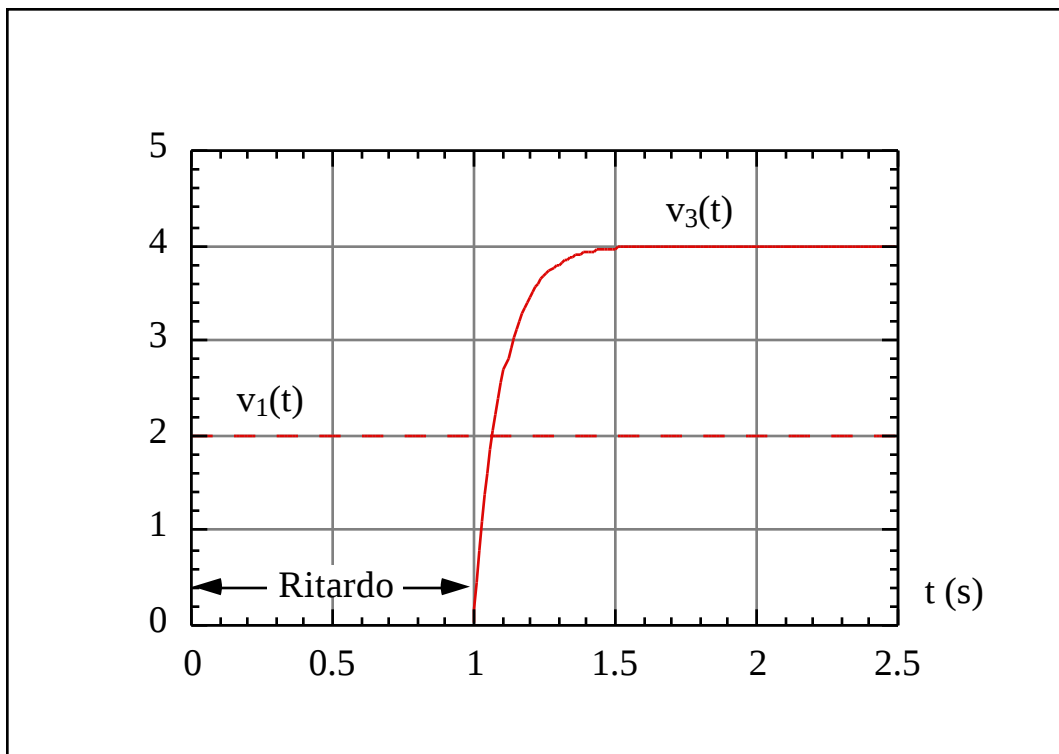


Figura 3.9: ritardo tra la tensione del generatore e quella del condensatore.

Dunque, la commutazione del generatore non viene avvertita immediatamente da tutte le parti del circuito: la linea di trasmissione introduce un ritardo, che era assente nei circuiti a costanti concentrate.

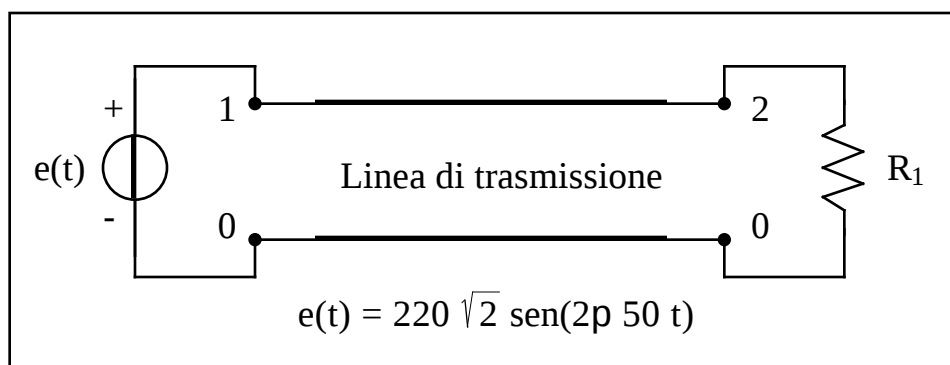


Figura 3.10: generatore sinusoidale collegato ad una linea.

Per studiare il funzionamento in una rete, inizialmente scarica e sottoposta ad un forzamento sinusoidale, si consideri un esempio di linea che, a regime, operi in corrente alternata. In Figura 3.10, un generatore sinusoidale è collegato, per mezzo di una linea di trasmissione, a un resistore $R_1 = 50 \text{ W}$. Notate dalla Figura 3.11 come, anche in questo esempio, la tensione sul resistore sia in ritardo rispetto a quella imposta dal generatore: proprio questo ritardo testimonia la presenza della

linea, supposta nell'esempio priva di perdite. Tuttavia, prima di procedere oltre, ci sembra giunto il momento di capire come si possa caratterizzare elettricamente una linea e quali siano le equazioni che descrivano questo nuovo fenomeno, legato alla propagazione delle onde elettromagnetiche.

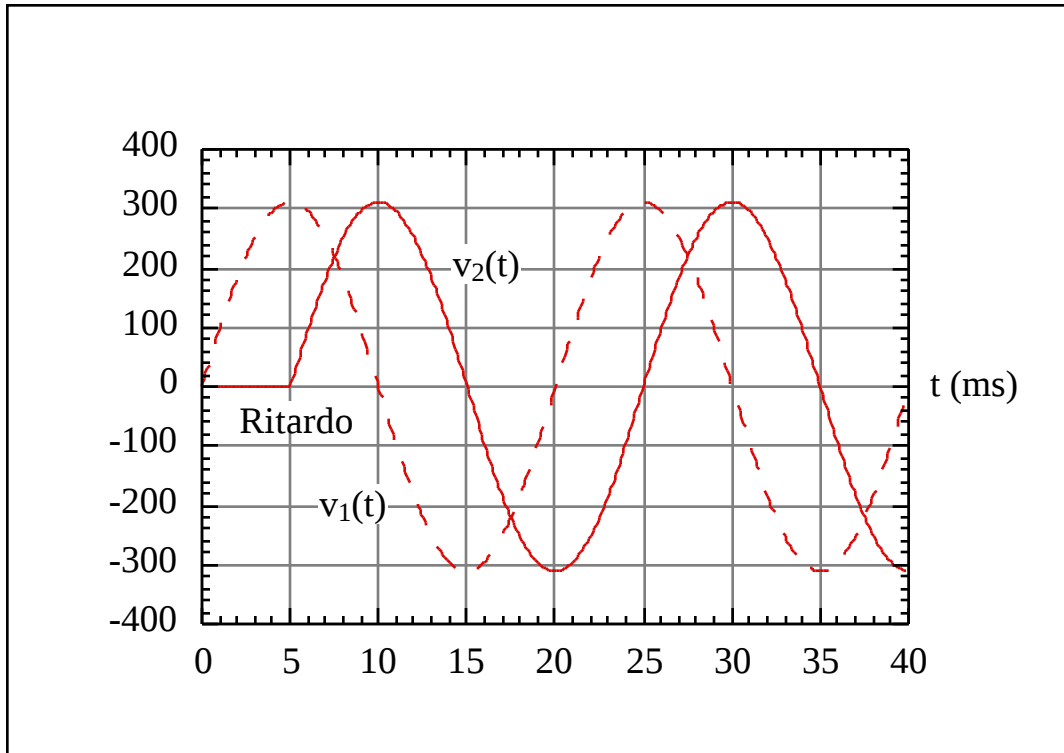


Figura 3.11: ritardo tra la tensione del generatore e quella del resistore di carico.

• Linea senza perdite

Lo schema di principio di una possibile realizzazione di una linea di trasmissione è mostrato in Figura 3.12: due conduttori di sezione circolare, paralleli, sono immersi in un mezzo dielettrico, un isolante supposto omogeneo ed interposto tra i due conduttori, che sono terminati con componenti elettrici di vario tipo, non riportati nel disegno. Il primo conduttore è quello di andata, il secondo quello di ritorno per la corrente. L'asse z del riferimento, mostrato in figura, coincide con la direzione di sviluppo della linea che rappresenta la direzione lungo cui si propaga il campo elettromagnetico, come sarà più chiaro tra un momento.

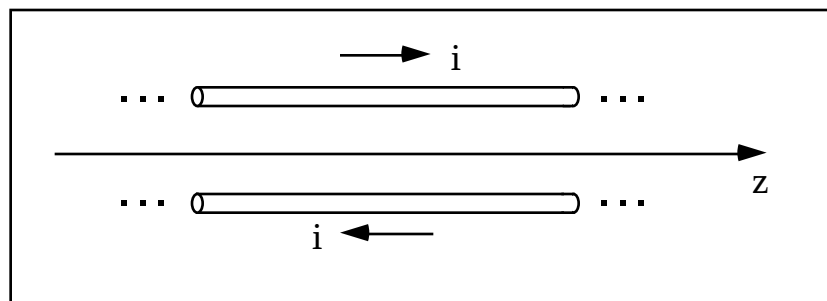


Figura 3.12: rappresentazione schematica di una linea di trasmissione.

La prima domanda da porsi riguarda la natura del campo elettromagnetico, inteso come la coppia di vettori costituita dal campo elettrico $\vec{E}$ e dal campo magnetico $\vec{H}$, che si propaga lungo questa linea, in gergo detta anche **struttura guidante**. A tal proposito cominciamo con alcune definizioni.

Si definisce **modo naturale** una struttura di campo elettromagnetico che si propaga lungo l'asse z , dotata di particolari proprietà che ne identificano le caratteristiche. Esistono tre diversi tipi di modi:

- ^a il modo TEM, trasverso elettromagnetico;
- ^a il modo TM, trasverso magnetico;
- ^a il modo TE, trasverso elettrico.

Il modo TEM ha la proprietà di avere nulle le componenti dei campi lungo la direzione di propagazione del campo stesso, cioè $E_z = 0$ V/m e $H_z = 0$ A/m. Ciò vuol dire che il campo presenta componenti che, durante la propagazione lungo z , appartengono in ogni istante di tempo al piano trasverso, perpendicolare ai due conduttori. I modi TE e TM hanno nulle, rispettivamente, la sola componente del campo elettrico o del campo magnetico lungo la direzione di propagazione.

Questi tre modi rappresentano i mattoni con i quali possiamo costruire un campo più complicato, di forma qualsiasi, sempre propagantesi lungo l'asse z : un teorema generale, infatti, consente di affermare che, sotto ipotesi non troppo restrittive, un generico campo elettromagnetico, indipendentemente dalla struttura guidante che lo supporta, può essere espresso come una sovrapposizione di questi tre modi.

Nel nostro studio delle linee di trasmissione supporremo sempre verificata l'ipotesi che lungo la linea si propaghi **solo il modo TEM**, anche detto fondamentale, cioè che si propaghi un'onda nella direzione z di Figura 3.12, le cui componenti di campo elettrico e magnetico siano nulle proprio secondo questa direzione. In generale, non è affatto detto che sia presente il modo TEM e che questo sia unico. Tuttavia, si dimostra che se i conduttori che costituiscono la linea sono ideali, o comunque dei buoni conduttori, e non vi sono, o comunque risultino trascurabili, le perdite nel dielettrico interposto tra essi, l'ipotesi fatta può essere considerata lecita, almeno per frequenze di esercizio al di sotto di una frequenza caratteristica, tipica di ogni struttura guidante, detta frequenza di taglio, o con terminologia anglosassone *cut off*. Nel caso delle linee in alta tensione possiamo stare sicuri che questa frequenza caratteristica è molto più grande della frequenza di lavoro di 50 Hz, tipica delle linee elettriche di energia.

In ogni caso, anche ammettendo che lungo la struttura viaggi il solo modo fondamentale, siamo in presenza di un campo elettromagnetico che varia nello

spazio e nel tempo e che, pertanto, non può considerarsi stazionario: ciò pone qualche legittimo interrogativo e qualche problema.

» Come si può, se si può, definire un potenziale che descriva la tensione lungo la linea? E come si definisce la corrente che passa attraverso i due conduttori?

Per inoltrarci nell'analisi delle linee di trasmissione risulta comodo partire dalla descrizione in termini di campo, considerando le equazioni di Maxwell, piuttosto che ricorrere ad una descrizione in termini di grandezze scalari, quali la tensione e la corrente. Cominciamo, però, a definire la tensione $v(z,t)$ e la corrente $i(z,t)$, in una certa ascissa z e in un istante generico t , lungo la linea. Facciamo riferimento alla Figura 3.13: essa rappresenta, per due volte, una sezione della linea perpendicolare alla direzione di propagazione (asse z uscente dal foglio), come ve ne sarete accorti considerando ciò che resta dei due conduttori, cioè i cerchi colorati.

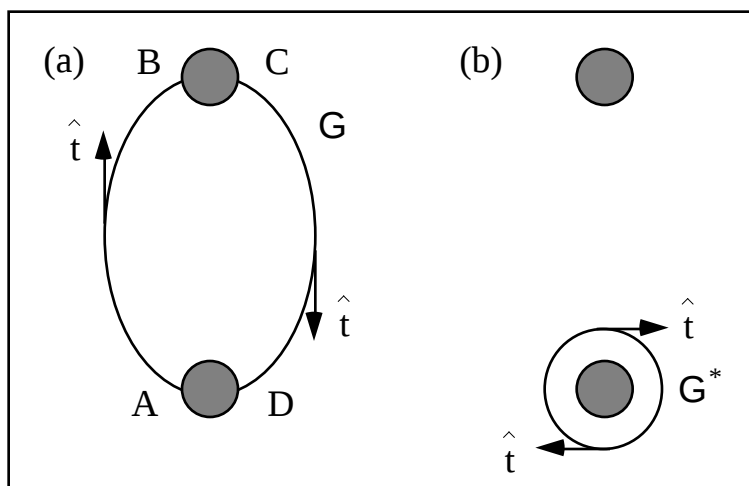


Figura 3.13: sezione trasversa di linea a due conduttori.

Partiamo dalla **tensione**. Con riferimento alla curva chiusa G di Figura 3.13a, composta dai due tratti di curva e da due tratti di conduttore, osserviamo che, avendo fatto l'ipotesi di conduttori ideali, la componente tangenziale del campo elettrico lungo i tratti di conduttore BC e DA è nulla e che il flusso del campo magnetico attraverso la superficie S (piana), che abbia G come orlo, è nullo in quanto, nell'ipotesi di propagazione del solo modo fondamentale, H_z è nullo. Utilizzando la legge di Faraday-Neumann

$$\oint_G \vec{E} \cdot \hat{t} \, dl = - \frac{d}{dt} \iint_S \vec{B} \cdot \hat{n} \, dS \quad \left[\text{nel caso in esame } \hat{n} \text{ coincide con } \hat{z} \right]$$

ed il fatto che il flusso del campo magnetico è nullo, possiamo concludere che la circuitazione del campo elettrico lungo la linea chiusa $ABCD$ deve essere nulla

$$\oint_G \vec{E} \cdot \hat{t} \, dl = \int_A^B \vec{E} \cdot \hat{t} \, dl + \int_C^D \vec{E} \cdot \hat{t} \, dl = 0 ,$$

dove $\hat{t}$ rappresenta il versore della curva G orientata, riportato in due diverse posizioni in Figura 3.13a. Dall'equazione appena scritta ricaviamo che, nel piano trasverso, possiamo definire una differenza di potenziale elettrico tra i due conduttori, per ogni ascissa z e per ogni istante t . Si ha, infatti:

$$\int_A^B \vec{E}(z,t) \cdot \hat{t} \, dl = - \int_C^D \vec{E}(z,t) \cdot \hat{t} \, dl = v(z,t) .$$

Non è possibile, dunque, definire una tensione tra due punti qualsiasi ma, se consideriamo una sezione trasversa, quale che sia l'ascissa considerata, è possibile considerare un integrale di linea del campo elettrico indipendente dal percorso e dipendente solo dal tempo e dall'ascissa ' z ' considerata, utile per definire la differenza di potenziale, o tensione, tra i due conduttori.

Occupiamoci, quindi, della **corrente**. Facendo riferimento alla Figura 3.13b, scriviamo l'equazione di Ampère-Maxwell per la linea G^* che racchiuda la superficie piana S^* :

$$\oint_{G^*} \vec{H}(z,t) \cdot \hat{t} \, dl = i(z,t) + \frac{d}{dt} \iint_{S^*} \vec{D} \cdot \hat{n} \, dS \quad [\text{anche ora } \hat{n} \text{ coincide con } \hat{z}] .$$

Ancora una volta il termine legato alla corrente di spostamento, legato al flusso del vettore $\vec{D}$, è nullo: ciò perché, nell'ipotesi di propagazione TEM e di giacitura di S^* nel piano trasverso, l'integrale superficiale è nullo. La corrente $i(z,t)$, definita dunque dal solo integrale di linea

$$\oint_{G^*} \vec{H}(z,t) \cdot \hat{t} \, dl = i(z,t) ,$$

è quella di conduzione che fluisce lungo la superficie laterale del conduttore, all'ascissa z e all'istante t . Supporremo, dunque, che i due conduttori veicolino le stesse correnti, ma in verso opposto.

In definitiva, pur avendo a che fare con un campo elettromagnetico variabile nel tempo, possiamo introdurre, in ogni sezione trasversa, una tensione ed una corrente che definiscono, istante per istante, lo stato elettrico della sezione di linea.

» È possibile rappresentare un tratto elementare della nostra linea, costituita da due conduttori elettrici perfetti, per mezzo di un modello a parametri concentrati?

Una volta che abbiamo definite la tensione e la corrente in ogni sezione della linea, tentiamo ora di ottenere le equazioni che descrivono il modo in cui tali grandezze evolvono nel tempo lungo la linea.

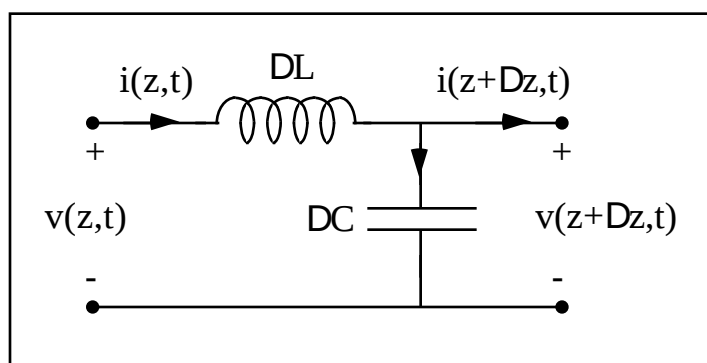


Figura 3.14: schema per la determinazione della prima equazione delle linee.

Per fare ciò introduciamo due parametri, L_D e C_D , detti, rispettivamente induttanza e capacità **per unità di lunghezza** del sistema costituito dai due conduttori. Non fatevi ingannare dai simboli o dalle maiuscole usate: per ottenere l'induttanza e la capacità di un tratto Dz di linea dovete fare i prodotti

$$\text{induttanza del tratto di linea } Dz \quad \text{AE} \quad DL = L_D Dz ,$$

$$\text{capacità del tratto di linea } Dz \quad \text{AE} \quad DC = C_D Dz .$$

I parametri L_D e C_D si misurano, rispettivamente, in henry e farad al metro, e tengono in conto dell'energia magnetica ed elettrica accumulata nel tratto di lunghezza Dz della linea. Per questo, un tratto elementare del circuito composto dai due conduttori si può schematizzare con il doppio bipolo mostrato in Figura 3.14. Ora, applicando le leggi di Kirchhoff alla maglia e al nodo, otteniamo il sistema di equazioni:

$$\begin{cases} -v(z,t) + L_D Dz \frac{\partial}{\partial t} i(z,t) + v(z+Dz,t) = 0 , \\ i(z,t) - C_D Dz \frac{\partial}{\partial t} v(z+Dz,t) - i(z+Dz,t) = 0 . \end{cases}$$

Badate bene, però, che ogni qual volta approssimate un tratto di linea con un circuito a costanti concentrate, per il quale valgono le usuali leggi di Kirchhoff, perdete, a rigore, la caratteristica fondamentale dei circuiti a parametri distribuiti, i quali si descrivono rigorosamente solo per mezzo delle equazioni di Maxwell: il ritardo introdotto dalla linea. Le relazioni scritte tornano ad essere delle uguaglianze esatte solo nel limite $Dz \rightarrow 0$, che discuteremo tra un momento.

Le derivate presenti nelle precedenti relazioni sono diventate parziali dato che sia le tensioni che le correnti dipendono tanto dalla componente spaziale z , quanto da quella temporale t . Riordinando e dividendo per Dz , riscriviamo le due equazioni del doppio bipolo nella forma

$$\frac{v(z+Dz,t) - v(z,t)}{Dz} = -L_D \frac{\partial}{\partial t} i(z,t), \quad \frac{i(z+Dz,t) - i(z,t)}{Dz} = -C_D \frac{\partial}{\partial t} v(z+Dz,t).$$

Il modello che abbiamo individuato consiste in due equazioni che nel limite di tratto infinitesimo di linea, cioè per $Dz \rightarrow 0$, diventano equazioni differenziali alle derivate parziali, rispetto allo spazio ed al tempo, del primo ordine, nelle incognite tensione e corrente lungo la linea. Queste equazioni, dette per motivi storici **equazioni dei telegrafisti**

$$\frac{\partial v(z,t)}{\partial z} = -L_D \frac{\partial i(z,t)}{\partial t}, \quad \frac{\partial i(z,t)}{\partial z} = -C_D \frac{\partial v(z,t)}{\partial t},$$

se da un lato contengono il ritardo scoperto per mezzo degli esperimenti numerici presentati nel paragrafo precedente, dall'altro rappresentano un problema matematico di difficile soluzione. Qui, dopo aver introdotto una soluzione che metterà in evidenza la natura viaggiante delle onde, mostreremo come si possa ottenere la soluzione di un circuito in cui siano presenti linee per mezzo del simulatore Spice.

Vale la pena concludere questo paragrafo dicendo che i parametri per unità di lunghezza, L e C , si possono calcolare, supponendo i conduttori ed i dielettrici ideali, in maniera analitica per alcune geometrie interessanti per le applicazioni. Consideriamo dapprima il caso di una linea, sinteticamente indicata come **linea bifilare**, composta da due fili rettilinei e paralleli, posti in aria, le cui caratteristiche elettromagnetiche sono assai simili al vuoto, ciascuno di raggio 'a' e posti a distanza 'd'. Si ha allora che

$$L_D = \frac{DL}{Dz} = \frac{\mu_0}{\rho} \operatorname{arcosh} \frac{d}{2a}, \quad C_D = \frac{DC}{Dz} = \frac{\rho \epsilon_0}{Dz \operatorname{arcosh} \frac{d}{2a}},$$

dove la funzione 'arcosh' rappresenta l'inversa della funzione coseno iperbolico. Più precisamente, usando la definizione del coseno iperbolico, si può scrivere che

$$\operatorname{arcosh} x = \ln \left(x + \sqrt{x^2 - 1} \right) \approx \ln(2x) \quad \text{se } x \gg 1 ,$$

in cui 'ln' indica il logaritmo neperiano, quello, per intenderci, in base 'e'. Qualora ricorra l'ipotesi, piuttosto frequente che i fili siano distanti e sottili, le precedenti relazioni si possono approssimare per mezzo delle più semplici relazioni

$$L_D \approx \frac{\mu_0}{p} \ln \frac{d}{a} , \quad C_D \approx \frac{pe_0}{\ln \frac{d}{a}} , \quad \text{se } \frac{d}{a} \gg 1 .$$

Nel caso, invece, di un **cavo coassiale**, costituito da un conduttore cilindrico di raggio 'a', detto anima, circondato da un conduttore, pure cilindrico di raggio più grande 'b', detto calza, si ha che

$$L_D = \frac{\mu}{2p} \ln \frac{b}{a} , \quad C_D = \frac{2pe}{\ln \frac{b}{a}} ,$$

in cui ϵ e μ sono, rispettivamente la costante dielettrica e la permeabilità magnetica del materiale isolante di cui è riempito lo spazio tra anima e calza.

» Come si presenta la soluzione fondamentale?

Consideriamo la generica funzione $y = F(z)$ rappresentata in Figura 3.15. Si tratta di una funzione che dipende da una sola variabile indipendente, che abbiamo indicato con 'z', e di durata limitata dato che assume valori diversi da zero solo su un certo intervallo finito della variabile dipendente.

Prendiamo in considerazione, poi, una nuova funzione, dipendente questa volta dalle due variabili 'z' e 't' (che, come al solito, indica un tempo):

$$y_1 = F(z - vt) ,$$

con 'v' costante assegnata.

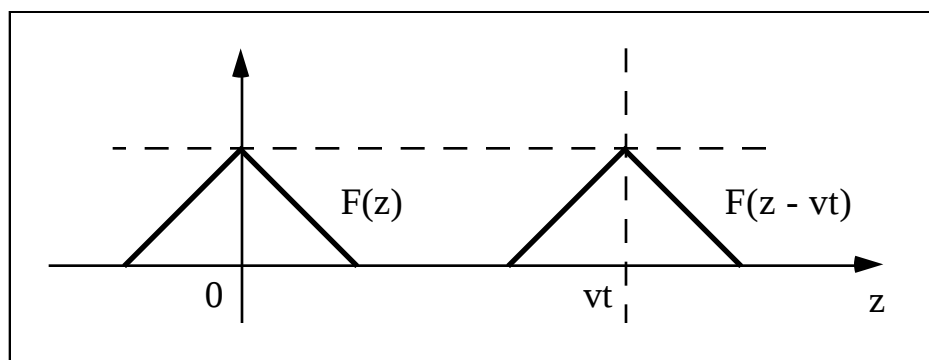


Figura 3.15: generica funzione di durata limitata che si propaga.

Cosa rappresenta la funzione y_1 è presto detto: essa è nient'altro che la precedente funzione 'y', riprodotta attorno al valore vt di z , che, cioè, si è spostata, alla velocità v , nella direzione positiva dell'asse z .

Dunque, per $t = 0$, i grafici di y e di y_1 coincidono, mentre per un generico tempo t la funzione y_1 rappresenta una replica della funzione y traslata, che assume valore massimo non più nell'origine ma in $z_M = vt$. Osservate il moto del valore massimo della funzione: in $t = 0$ il massimo si trova attorno a $z_M = 0$; poi, t secondi più tardi si trova in $z_M = vt$: esso si sposta alla velocità v , come d'altra parte fa l'intera funzione. In gergo, si dice che una funzione come y_1 rappresenta un'onda, o perturbazione, che viaggia nella direzione positiva dell'asse z : per questo è detta **onda progressiva**. Questa perturbazione, nel suo viaggio, resta sempre uguale a se stessa, ovvero non si attenua, né altera la sua durata, ma trasla rigidamente.

Considerazioni analoghe a quelle appena svolte permettono di concludere che una funzione del tipo

$$y_2 = G(z + vt) ,$$

rappresenta un'onda che si sposta, sempre con velocità v , ma nella direzione negativa dell'asse z , stavolta. Questa perturbazione viene anche detta **onda regressiva**.

Ebbene, la più generale soluzione dei telegrafisti può scriversi come somma di due onde viaggianti, la prima nella direzione positiva, la seconda nella direzione negativa dell'asse z . In formule, la tensione e la corrente possono essere espresse per mezzo di una combinazione di due generiche funzioni

$$v(z,t) = F(z - vt) + G(z + vt) , \quad i(z,t) = \frac{1}{R_0} [F(z - vt) - G(z + vt)] .$$

Le due funzioni generiche 'F' e 'G' dipendono dalle terminazioni su cui è chiusa la linea; inoltre, nell'espressione della corrente vi è un cambio di segno per l'onda regressiva e la quantità R_0 , detta 'impedenza caratteristica della linea', vale

$$R_0 = \sqrt{\frac{L_D}{C_D}} .$$

Questa impedenza, nel caso che stiamo considerando, è in realtà una resistenza, essendo un numero reale. Abbiamo preferito chiamarla impedenza caratteristica dato che, quando considereremo linee con perdite, vedrete che essa è proprio un'impedenza. Potete controllare per sostituzione nelle equazioni dei telegrafisti la soluzione generale riportata, in termini di tensione e corrente lungo la linea: scoprirete le queste due equazioni risultano identicamente soddisfatte.

Lungo una linea, in definitiva, vi sono onde che si propagano. Ad esempio, un'onda progressiva, prodotta da un generatore, percorre un tratto di linea; non appena raggiunge l'altra estremità della linea, l'energia da essa trasportata viene in parte assorbita dal carico presente, in parte riflessa e ripercorre la linea in senso opposto, cioè come onda regressiva. In altri termini, le onde progressive e regressive, sono nient'altro che onde che si riflettono sulle terminazioni della linea e che la percorrono, in un senso oppure nell'altro, fin quando non si attenuano completamente. L'attenuazione è dovuta soltanto ai carichi presenti alle terminazioni, dato che le linee prese in esame sono costituite da due conduttori elettrici perfetti e, pertanto, sono prive di perdite.

Abbiamo introdotto la soluzione fondamentale in termini di onda progressiva e regressiva solo per farvi comprendere meglio le simulazioni che stiamo per proporre. E per capire come ciò si possa realizzare, consideriamo la seguente istruzione Spice

T1 1 0 2 0 Z0=300 TD=2ms .

Essa specifica una linea di trasmissione di nome T1, d'altra parte tutti i nomi delle linee devono cominciare con la lettera T, la cui porta d'ingresso è individuata dai nodi 1 e 0 e la porta di uscita dai nodi 2 e 0, come mostrato in Figura 3.16, la cui impedenza caratteristica è pari a 300 W (nel simbolo Z0 si può usare sia lo 'zero' che la lettera 'O') e caratterizzata da un ritardo di 2 ms.

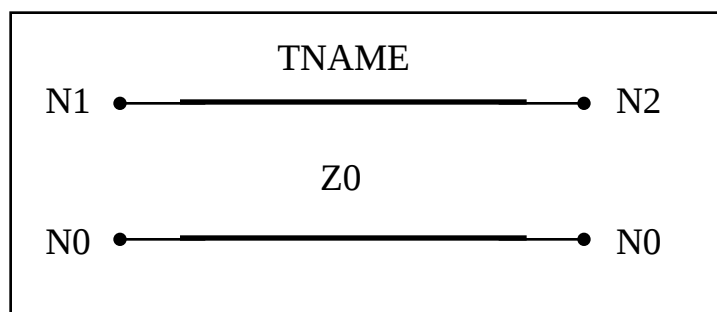


Figura 3.16: linea di trasmissione ideale

La forma generale per l'istruzione che specifica una linea di trasmissione ideale in Spice è

TNAME N1 N0 N2 N0 Z0=VAL TD=VAL ,

in cui il nome inizia obbligatoriamente con la lettera T, N1 ed N0 sono i nodi della porta d'ingresso, N2 ed N0 quelli della porta d'uscita, Z0 rappresenta l'impedenza caratteristica della linea ed è un'informazione necessaria per il simulatore. Infine, bisogna specificare il tempo di ritardo TD introdotto dalla linea.

Consideriamo, allora, un semplice esempio costituito da una linea bifilare di trasmissione: ciascuno dei due conduttori abbia raggio $a = 1$ cm, la loro distanza relativa sia $d = 12$ m. in queste ipotesi, l'impedenza caratteristica vale

$$R_0 = \sqrt{\frac{L_D}{C_D}} = 120 \ln \frac{d}{a} @850 \text{ W},$$

Supponiamo ancora che la linea in esame sia lunga 3 km, imponendo, pertanto, un tempo di ritardo pari a

$$T_D = \frac{3 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^8} \text{ s} = 10 \text{ ns},$$

e che la porta primaria sia chiusa su un generatore ideale di tensione, le cui caratteristiche saranno chiare tra un momento.

Cominciamo a studiare il caso in cui la porta secondaria, invece, sia chiusa su un **carico adattato**: la parola adattato informa che il carico è tale da assorbire completamente l'onda di tensione in arrivo e non generare alcuna onda riflessa; un tale carico è, per una linea senza perdite, proprio un resistore di valore

$$R_1 = R_0 = \sqrt{\frac{L_D}{C_D}} = 120 \ln \frac{d}{a} @850 \text{ W},$$

cioè caratterizzato da un valore di resistenza coincidente con la resistenza caratteristica della linea.

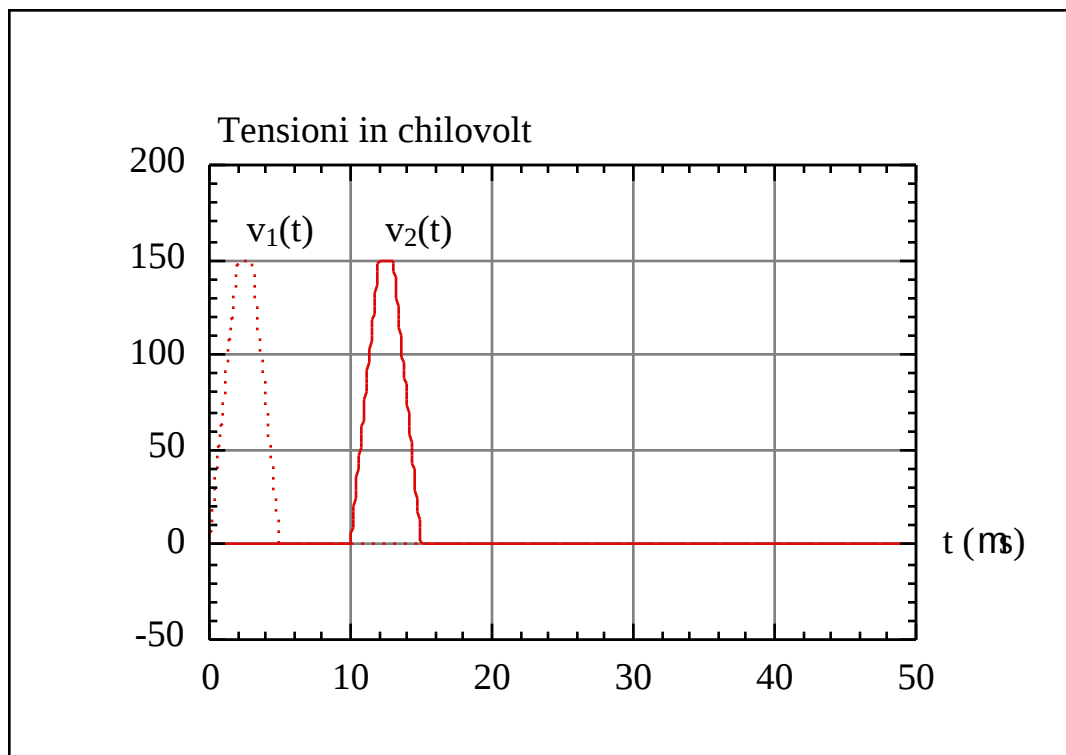


Figura 3.17: linea terminata su un carico adattato

Per scoprire come funziona un tale circuito, si utilizzi il listato Spice che segue, nel quale abbiamo utilizzato in ingresso alla linea un generatore di tensione lineare a tratti con un valore massimo di 150 kV di durata 5 ns, con tempi di salita e di discesa uguali e pari a 1 ns. La linea è terminata con un resistore di 850 Ω . L'istruzione '.IC' stabilisce le condizioni iniziali per i nodi del circuito: in questo caso ci siamo assicurati che la linea fosse 'scarica' all'istante iniziale.

```
Esempio 3.2
* Linea di trasmissione terminata su un carico adattato
V1      1    0    PWL(0 0 2u 150k 3u 150k 5u 0)
T1      1    0    2    0    Z0=850    TD=10u
R1      2    0    850
.IC      V(2)=0
.TRAN   0.05u    50u    0    0.05u    UIC
.PROBE
.END
```

Si noti che, nella analisi in transitorio con le linee di trasmissione, la costante di tempo interna per il calcolo è sempre minore oppure uguale della metà del più piccolo tempo di ritardo delle linee presenti nel circuito: questo vuol dire che linee di trasmissione molto piccole provocheranno un notevole incremento del tempo di calcolo. Inoltre, se si vuole che siano rispettati i tempi di salita e di discesa

dell'onda, bisogna che la costante di tempo per il calcolo del transitorio sia più piccola di essi: questo problema si risolve imponendo l'estensione TMAX durante il calcolo del transitorio.

Dato che la linea è senza perdite e la sua resistenza caratteristica coincide proprio con la resistenza R1 su cui è terminata, essa è adattata: l'onda di tensione prodotta dal generatore impiega 10 ns per transitare lungo la linea ed, una volta arrivata all'altra estremità, non viene più riflessa. Questo è il significato della parola 'adattamento'. Notate che per la prima volta, almeno in questo libro, si sta prendendo in esame un circuito a costanti distribuite, un circuito nel quale la propagazione dei segnali non è istantanea.

Facciamo un passo in avanti: terminiamo la linea su un resistore di resistenza diversa dalla quella caratteristica, che, in generale, viene detto **carico disadattato**.

```
Esempio 3.3
* Linea terminata su un carico non adattato
V1      1      0      PWL(0 0 2u 150k 3u 150k 5u 0)
T1      1      0      2      0      Z0=850      TD=10u
R1      2      0      1.5k
.IC      V(2)=0
.TRAN      0.05u      50u      0      0.05u      UIC
.PROBE
.END
```

Notate che la tensione sul carico, cioè in corrispondenza della porta secondaria, è non nulla ogni 20 ns, il tempo che impiega la perturbazione per andare e tornare dalla stessa terminazione, eccezion fatta per la prima onda che transita dal generatore al carico in 10 ns. La prima onda sul carico è più grande di quella prodotta dal generatore: in realtà, si tratta di due onde che si sovrappongono, quella diretta e quella riflessa, come approfondiremo tra un momento. Tuttavia la seconda onda sul carico è attenuata rispetto alla prima a causa della potenza irreversibilmente assorbita ad ogni passaggio sul resistore R1. A differenza del carico adattato, che consentiva un solo passaggio dell'onda, stavolta la tensione va avanti ed indietro lungo la linea, venendo riflessa anche dal generatore di tensione che, dopo aver nei primi 10 ns erogato la tensione $v_1(t)$, diventa un cortocircuito ideale, che riflette tutta l'energia di cui è investito senza assorbirne alcuna parte, ma cambiandone il segno. La durata di tutti gli impulsi di tensione viaggiante è quella fissata in origine dal generatore, cioè 5 ns, e tale resta durante tutta la fase di propagazione lungo la linea.

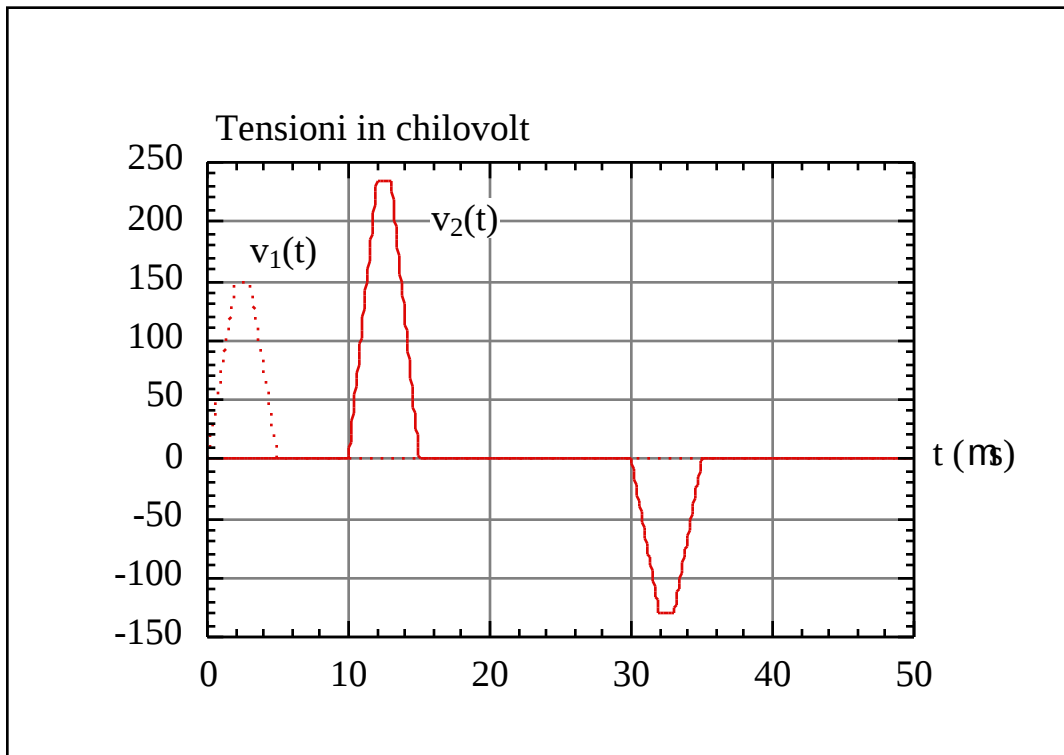


Figura 3.18: linea terminata su un carico disadattato.

Proviamo ora il caso in cui la linea è terminata in **circuito aperto**, ovvero su un resistore di valore molto elevato rispetto alla resistenza della linea, ad esempio di 1 MW. Ancora una volta, si noti il cambio di segno dell'onda di tensione che viene riflessa dal generatore ideale di tensione, quando questo è diventato equivalente ad un cortocircuito.

Esempio 3.4

* Linea terminata su un circuito aperto

V1 1 0 PWL(0 0 2u 150k 3u 150k 5u 0)

T1 1 0 2 0 Z0=850 TD=10u

R1 2 0 1meg

.IC V(2)=0

.TRAN 0.05u 50u 0 0.05u UIC

.PROBE

.END

Prestate attenzione alla figura: questa volta la tensione alla seconda porta, non solo va e torna a intervalli di 20 ms, ma ha raddoppiato il suo valore massimo che è passato dai 150 kV del generatore in ingresso ai ben 300 kV sulla terminazione. Come è possibile ciò? L'onda di ampiezza 300 kV è il risultato della composizione dell'onda di 150 kV in arrivo dal generatore e dell'onda riflessa dal 'quasi' circuito aperto. Inoltre le onde che viaggiano sulla linea, stavolta, non sono affatto attenuate:

infatti, la resistenza elevata che simula un circuito aperto dissipa ad ogni passaggio solo una frazione non apprezzabile dell'onda stessa.

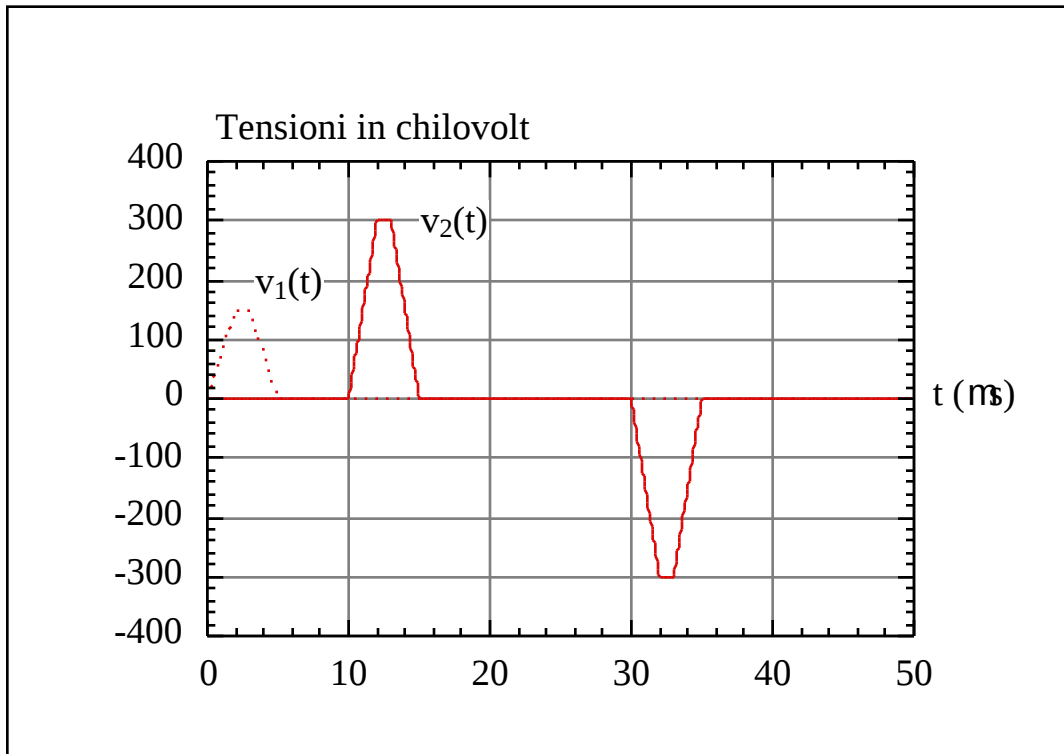


Figura 3.19: linea terminata su un circuito aperto.

Studiamo ancora un altro caso: quello della linea terminata su un cortocircuito.

```
Esempio 3.5
* Linea terminata su un cortocircuito
V1      1    0    PWL(0 0 2u 150k 3u 150k 5u 0)
T1      1    0    2    0    Z0=850    TD=10u
R1      2    0    1u
.IC     V(2)=0
.TRAN   0.05u    50u    0    0.05u    UIC
.PROBE
.END
```

Stavolta riporteremo in grafico la corrente che scorre nel cortocircuito, in quanto le tensioni sono, per definizione, nulle. L'impulso di corrente che parte dal generatore ha ampiezza massima

$$\frac{150 \text{ kV}}{850 \text{ W}} @ 0.176 \text{ kA} ,$$

poiché sappiamo che la linea equivale ad un carico uguale alla sua resistenza caratteristica. Invece, l'onda di corrente sul cortocircuito ha ampiezza doppia perché si sommano in fase i due contributi dell'onda incidente e dell'onda riflessa.

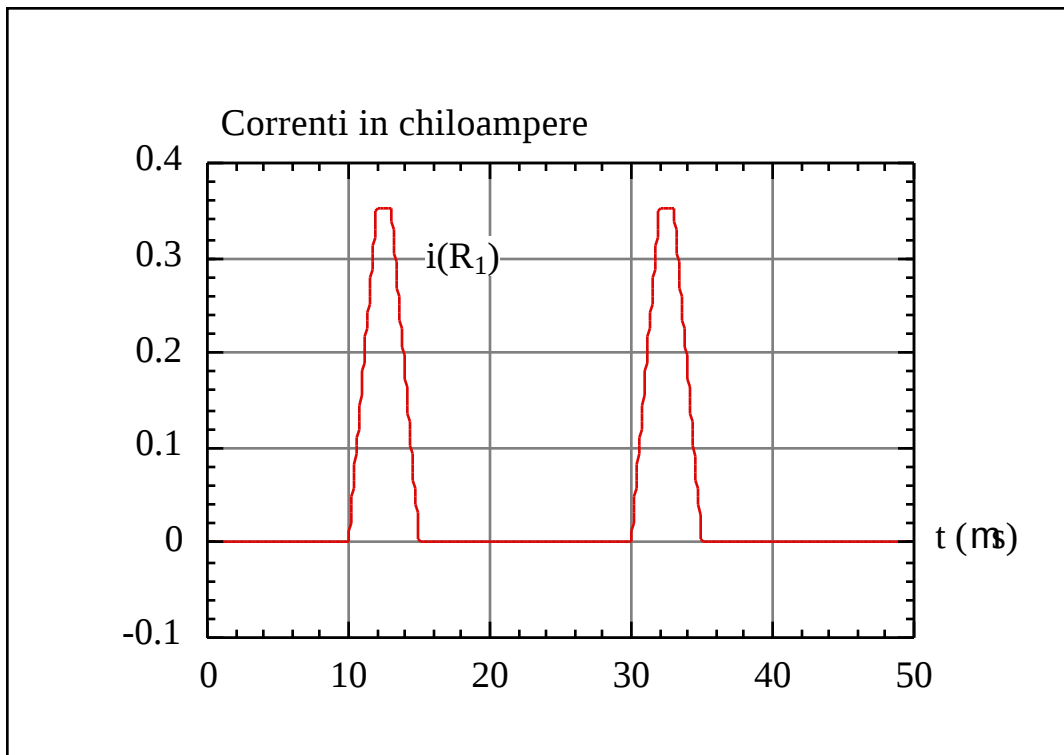


Figura 3.20: corrente in una linea terminata in cortocircuito.

Cosa accade se la linea è terminata con dei bipoli a memoria? La risposta completa non è semplice ed esula dai limiti che ci siamo imposti; tuttavia, per farvi intuire le dinamiche nuove che si possono innescare, vi proponiamo di chiudere la linea su un condensatore.

```
Esempio 3.6
* Linea terminata su un condensatore
V1      1      0      PWL(0 0 2u 150k 3u 150k 5u 0)
T1      1      0      2      0      Z0=850      TD=10u
C1      2      0      1u
.IC      V(2)=0
.TRAN      0.05u      50u      0      0.05u      UIC
.PROBE
.END
```

Si noti quanto sia diventata complessa la dinamica della tensione sul condensatore: durante il primo passaggio riconoscete i fenomeni di carica e di scarica della capacità, poi le riflessioni multiple complicano ... maledettamente la dinamica. Una

cosa, però, resta vera: durante il transitorio la tensione ai capi del condensatore resta continua.

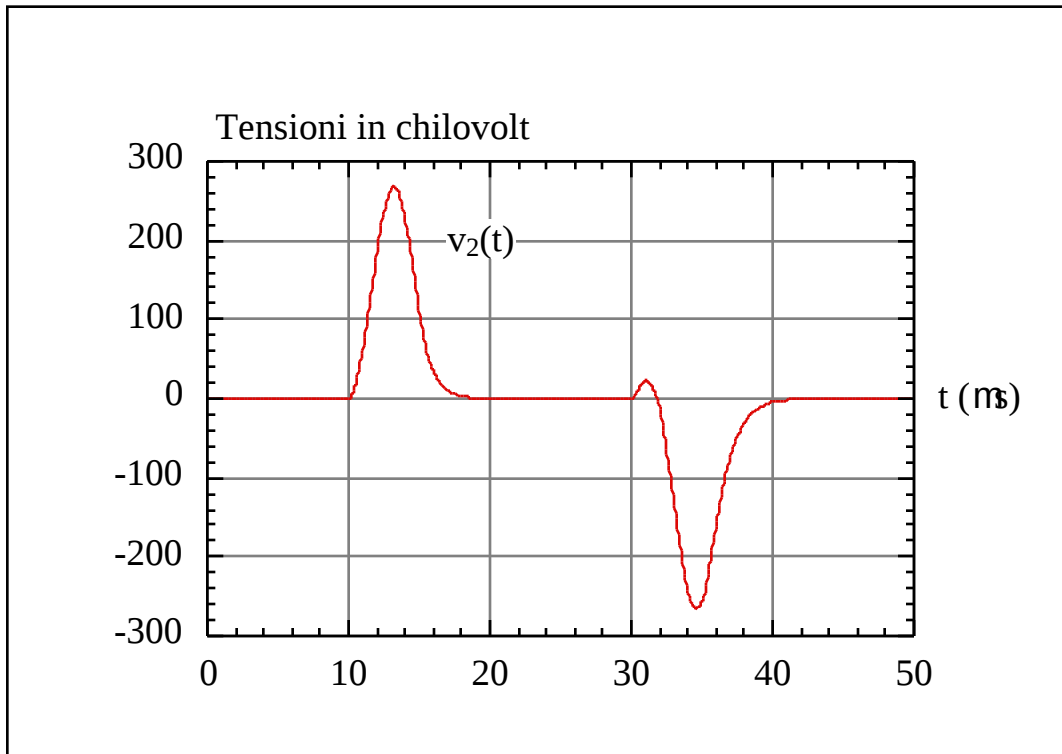


Figura 3.21: dinamiche della tensione su un condensatore terminante una linea.

Considerazioni analoghe si possono sviluppare per la corrente che attraversa un induttore che termina la linea e, pertanto, riteniamo che questo possa bastare per simulare le linee di trasmissione senza perdite con Spice.

• Linea con perdite

Sottolineiamo ancora una volta che, per ottenere il sistema che descrive l'andamento della tensione e della corrente lungo una linea senza perdite, non si è considerato che all'interno conduttore e del dielettrico, che circonda i due cavi, vi siano perdite per effetto Joule. Nel caso in cui si voglia dare una descrizione più realistica della linea, questi due fenomeni devono essere tenuti in debito conto. Venendo meno l'ipotesi di solo modo TEM, sarebbe necessaria un'analisi più accurata che prenda in considerazione anche degli altri modi di propagazione; tuttavia, se le perdite introdotte sono sufficientemente piccole possiamo continuare a supporre l'esistenza e l'unicità del modo TEM, salvo poi aggiungere una piccola componente longitudinale dei campi che non modifica la struttura TEM: una tale approssimazione viene detta 'quasi TEM'. In tale modello approssimato le perdite si schematizzano con l'introduzione di parametri resistivi lungo la linea e tra i due conduttori. Introdotte, pertanto, una resistenza R_D ed una conduttanza G_D **per**

unità di lunghezza, si può facilmente dimostrare che il sistema si modifica nel modo seguente:

$$\frac{\partial v(z,t)}{\partial z} = -L_D \frac{\partial i(z,t)}{\partial t} - R_D i(z,t), \quad \frac{\partial i(z,t)}{\partial z} = -C_D \frac{\partial v(z,t)}{\partial t} - G_D v(z,t).$$

Questo nuovo sistema può essere ‘letto’ facilmente in termini circuitali: si tratta di introdurre nella cella elementare di Figura 3.14 le perdite appena descritte. Provate da soli a riottenere questo sistema usando il tratto elementare mostrato in Figura 3.22, facendo poi il limite per $Dz \rightarrow 0$ delle equazioni ottenute adoperando le due leggi di Kirchhoff.

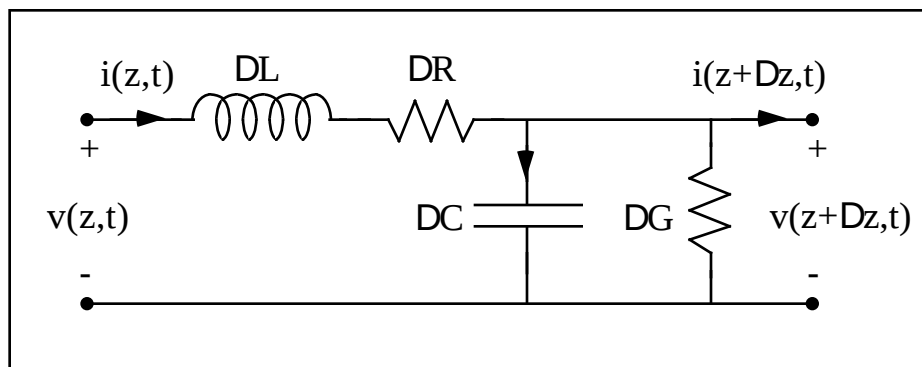


Figura 3.22: tratto elementare di una linea con perdite.

La resistenza per unità di lunghezza di un cavo di resistività r , lungo Dz e di sezione S si può calcolare per mezzo della formula

$$R_D = \frac{DR}{Dz} = k \frac{r}{S},$$

in cui k è un coefficiente di maggiorazione, variabile tra 1.01 ed 1.04, che tiene conto essenzialmente dell’effetto di cordatura e della disuniforme distribuzione della corrente nella sezione. In pratica, i valori chilometrici della resistenza sono riportati per tutte le sezioni commerciali, alla temperatura di 20 °C, nelle tabelle CEI-UNEL.

La conduttanza di dispersione dipende dall’isolamento della linea rispetto alla terra e tiene conto delle perdite sia per effetto corona che per dispersione attraverso gli isolatori. Essa si può determinare per mezzo della relazione

$$G_D = \frac{DG}{Dz} = \frac{p}{E^2},$$

in cui p (W/m) rappresenta le perdite per unità di lunghezza per effetto corona e di dispersione ed E il valore della tensione di fase. Le correnti di dispersione agli isolatori sono influenzate in modo determinante dalle condizioni atmosferiche e dalla tensione; le perdite conseguenti vengono valutate, per i normali isolatori a sospensione, in $(1 \div 3)$ W con il tempo sereno ed in $(5 \div 20)$ W con il tempo piovoso per ciascun elemento.

Il simulatore Spice consente la simulazione di circuiti elettrici contenenti linee di trasmissione con perdite. Le caratteristiche della linea vengono immesse mediante l'uso dei parametri primari R_D , L_D , G_D , C_D . Notiamo che nel caso in cui siano nulli i parametri R_D e G_D ricadiamo nel modello di linea senza perdite, esaminato nel paragrafo precedente. Il modello utilizzato da Spice per simulare la linea di trasmissione con perdite è simile a quello ideale ma le tensioni e le correnti, oltre ad essere ritardate per effetto della propagazione lungo la linea, devono essere attenuate a causa delle perdite proprie della linea. Cominciamo, come al solito, con un esempio

```
T1 1 0 2 0 LEN=3k R=50u L=3u G=4n C=4p .
```

In tal caso abbiamo comunicato al simulatore che vogliamo lavorare con una linea lunga tre chilometri ($LEN=3k$), definita dai parametri assegnati; la prima lettera contraddistingue, come d'abitudine, il nome della linea è sempre la T, mentre ai parametri tocca il compito di indicare se la linea è con perdite o meno.

Per esaminare come l'istruzione introdotta consenta di simulare le linee di trasmissione con perdite, eccovi un esempio.

Esempio 3.7

* Simulazione di una linea con perdite cortocircuitata

```
V1 1 0 PWL(0 0 2u 150k 3u 150k 5u 0)
```

```
T1 1 0 2 0 LEN=3k R=50u L=3u G=40n C=4p
```

```
R1 2 0 1e-6
```

```
.IC V(2)=0
```

```
.TRAN 0.05u 50u 0 0.05u UIC
```

```
.PROBE
```

```
.END
```

Questa volta l'onda di tensione viene attenuata, pian piano, dalle perdite presenti lungo la linea e non da eventuali resistori presenti alle terminazioni, dato che la linea è stata chiusa su un cortocircuito. Esaminiamo cosa accade variando la conduttanza specifica, la quale può aumentare, ad esempio, per l'effetto corona: già

dal primo passaggio si nota una certa attenuazione nella corrente, cioè una notevole degradazione del segnale dovuta all'aumento di conduttanza.

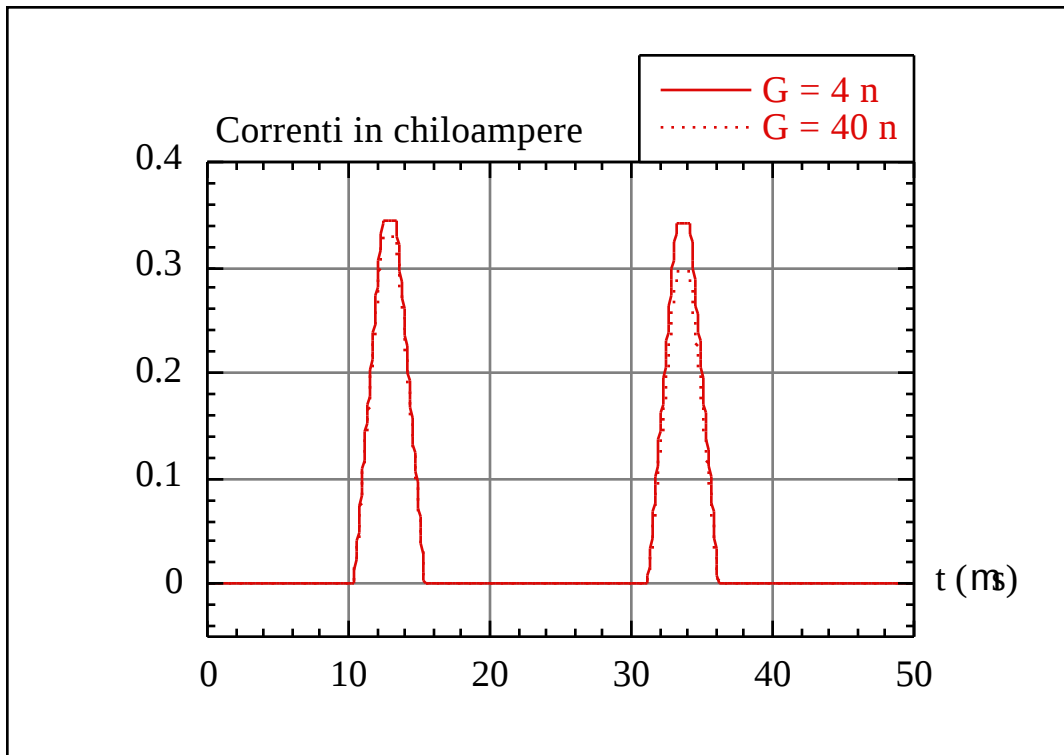


Figura 3.23: tensione su un resistore che termina una linea con perdite.

Un'altra caratteristica delle linee con perdite è la durata del segnale che può non rimanere la stessa di quella imposta dal generatore. Essa comincia ad aumentare e non si può più dire, come nel caso di linea senza perdite, dove l'onda è presente e dove è assente, proprio perché la durata del segnale varia durante la propagazione. L'allungamento della durata dell'impulso si può evitare solo usando linee per le quali vale la **condizione di Heaviside**:

$$\frac{R_D}{L_D} = \frac{G_D}{C_D}.$$

Questo tipo di linea viene detto senza distorsione e lungo essa l'onda si attenua, per la presenza delle perdite, ma non altera la sua durata.

• Fune di guardia

La fune di guardia svolge, essenzialmente, il ruolo di un parafulmine: nel caso in cui un fulmine colpisca (o tenti di colpire) direttamente la nostra linea, la fune di guardia sarà, nella maggior parte dei casi, il conduttore colpito, preservando in tal modo i conduttori di energia. Essa si sacrifica per salvare la vera e propria linea elettrica, e per questo motivo viene posta più in alto rispetto agli altri conduttori per creare un angolo solido di protezione ai sottostanti conduttori di apertura di

circa 60°. Questa rudimentale gabbia di Faraday svolge, dunque, la funzione di esercitare una schermatura protettiva dei cavi sottostanti nei confronti di eventuali fulminazioni dirette.



Figura 3.24: un esempio di fune di guardia.

La fune di guardia viene metallicamente connessa ai tralicci, apportando il benefico effetto di abbassare la resistenza di terra complessiva dei singoli tralicci, collegati, in tal modo, in parallelo verso terra. Essa viene generalmente costituita da corde in acciaio zincato o *copperweld* (rame-acciaio), un conduttore con anima in acciaio e strato esterno in rame, tese parallelamente ai conduttori di linea sulla sommità dei sostegni e poste in buon contatto elettrico con la terra attraverso i sostegni stessi, se metallici, o mediante appositi conduttori scendenti lungo i pali non metallici.

In qualche caso, la fune di guardia viene messa in evidenza per mezzo di segnalatori visivi, anche attivi, aventi la forma di grosse palle colorate, che servono a indicare la presenza di linee elettriche ai velivoli.

3.3 Novità rispetto ai sistemi trifasi

Dopo aver appreso alcune utili informazioni riguardanti la propagazione dei segnali elettrici lungo le linee, è interessante sottolineare le sostanziali novità rispetto ai sistemi trifasi, introdotti nei vostri studi di Elettrotecnica. In generale, quando si

studiano i trifasi, il generatore è collegato direttamente, al più tramite un'impedenza ohmico-induttiva, al carico. Ora sapete che, quando il collegamento è sufficientemente lungo, una tale schematizzazione può portare a risultati sbagliati. Le linee lunghe, infatti, introducono ritardi dovuti alla propagazione dei segnali elettrici, effetto che non si può modellare con circuiti a parametri 'concentrati', come suggerito in Figura 3.25. Tuttavia è bene sottolineare che un esame completo delle linee trifasi non è affatto semplice; a differenza delle linee bifilari introdotte, in quelle trifasi vi è un accoppiamento elettrico e magnetico tra i diversi conduttori, cosa che rende difficile la simulazione. I limiti impostici in questa trattazione introduttiva ci impediscono di approfondire il problema della simulazione delle linee multiconduttrici, un soggetto che da solo potrebbe costituire materia per un libro.

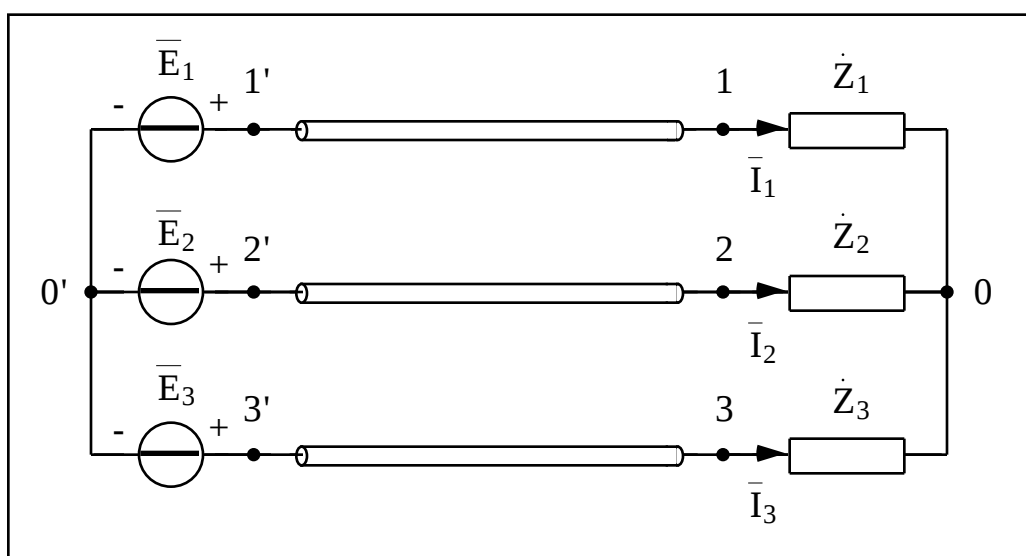


Figura 3.25: generatore trifase connesso, mediante linea di trasmissione, a un carico.

Quello che ci preme mettere in evidenza è che la presenza di linee di trasmissione dell'energia elettrica tra generatore e carico innesca fenomeni di ritardo e accoppiamento elettrico e magnetico, imprevedibili in uno schema che consideri un conduttore di collegamento schematizzabile solo per mezzo di un resistore o, magari, di un resistore e di un induttore. Quando introdurremo gli impianti in media tensione, caratterizzati da linee non molto lunghe, scopriremo che un'impedenza di tipo ohmico-induttiva può essere considerata un modello buono ed efficiente per modellare le linee in MT.

3.4 Apparecchiature di protezione e manovra

I sistemi e le apparecchiature elettriche di potenza sono costituiti da una grande varietà di componenti, i più importanti dei quali, generatori, trasformatori, motori

e linee, li conoscete già oppure state imparando a conoscerli. Esistono, tuttavia, altri componenti necessari al funzionamento in condizioni di normale esercizio ed altri ancora necessari alla protezione in caso di guasto che descriveremo in questo paragrafo. Prima di passare alla descrizione delle principali apparecchiature di protezione e manovra in alta tensione, è bene premettere alcune considerazioni generali e descrivere il fenomeno dell'arco elettrico.

• Sovratensioni

In un sistema elettrico possono manifestarsi tensioni superiori a quelle normali di esercizio, dette **sovratensioni**, che vengono tradizionalmente distinte secondo lo schema che segue.

» Sovratensioni di origine interna

Sono dovute a manovre di chiusura e apertura di circuiti e, per questo, vengono anche dette sovratensioni di manovra. Possono essere anche determinate da rapide variazioni di carico oppure da fenomeni di risonanza. Pensate, ad esempio, ad una linea che, come sapete, ha un carattere prevalentemente ohmico-induttivo; se la linea è terminata con un carico capacitivo, possono scaturirne fenomeni di risonanza capaci di sostenere elevate sovratensioni. Infine, le sovratensioni possono essere causate da guasti, quali contatti accidentali e perdite dell'isolamento: queste sovratensioni possono superare di alcune volte le tensioni nominali e hanno, di norma, tempi caratteristici di evoluzione dell'ordine dei millisecondi.

» Sovratensioni di origine esterna

Sono dovute a fenomeni di induzione o a fulminazioni dirette che determinano le cosiddette sovratensioni di origine atmosferica. Possono presentare intensità maggiori delle tensioni nominali e fronti assai ripidi, con tempi di salita dell'ordine del microsecondo (o anche meno) e tempi di discesa di qualche decina di microsecondi.

Il danno maggiore che possono produrre le sovratensioni è il cedimento degli isolamenti di uno o più componenti, cedimento che risulta particolarmente grave se si tratta di isolamenti solidi che vengono irreversibilmente danneggiati. La perdita di isolamento è grave in quanto può produrre dei cortocircuiti nei quali viene dissipata una grande quantità di energia elettrica che, a volte, può portare a delle vere e proprie esplosioni. Per evitare che gli isolamenti dei componenti elettrici possano essere danneggiati, essi vengono dimensionati per tensioni parecchie volte più grandi di quelle nominali, allo scopo di garantirsi un elevato margine di sicurezza.

• Sovracorrenti

In un sistema elettrico possono manifestarsi correnti superiori a quelle normali di esercizio, dette **sovracorrenti**, che vengono tradizionalmente distinte in alcune categorie. Prima, però, di addentrarci nella loro distinzione, è utile conoscere alcune definizioni prese dalle norme (pubblicazione IEC 157 - 1 o norma CEI 17 - 5).

Pubblicazione IEC 157 - 1 (Norme CEI 17 - 5)

2.1.4. Interruttore automatico (meccanico)

Apparecchio meccanico di manovra capace di stabilire, portare ed interrompere correnti in condizioni normali del circuito ed inoltre di stabilire, portare per una durata specificata e interrompere correnti in condizioni anormali specificate del circuito, ad esempio quelle i corto circuito.

2.1.5. Interruttore con fusibili incorporati

Combinazione di interruttore automatico e fusibili in un assieme unico, con un fusibile serie ad ogni polo destinato ad essere connesso ad un conduttore di fase.

2.2.1. Sovracorrente

Qualunque corrente che superi la corrente nominale.

2.2.2. Sovraccarico

Condizioni di funzionamento di un circuito elettrico non danneggiato, che danno origine ad una sovracorrente.

2.2.15. Corrente di cortocircuito

Sovracorrente risultante da un cortocircuito dovuto a guasto o ad una connessione non corretta in un circuito elettrico.

» Sovracorrenti dovute a sovraccarico transitorio

Sono principalmente dovute a manovre quali l'avviamento di motori asincroni, che comporta correnti di spunto fino a una decina di volte superiori di quelle nominali e della durata di pochi secondi, oppure l'inserzione di trasformatori a vuoto, che può comportare correnti fino a tre volte più grandi di quelle nominali e che si esaurisce in breve tempo. Essendo entrambe queste due cause di sovracorrente legate a fenomeni transitori, non è opportuno adottare delle protezioni per l'impianto che portino all'apertura dei circuito in cui circola la sovracorrente; anzi, una tale operazione sarebbe dannosa, in quanto causa di un inutile fuori servizio.

» Sovracorrenti dovute a sovraccarico permanente

Si verificano ogni volta che inseriamo carichi che assorbono una potenza superiore a quella per cui l'impianto è stato dimensionato. Esse comportano un lento riscaldamento dei conduttori e, quando questo sovraccarico termico si prolunga per molto tempo, è necessario interrompere il circuito.

Per approfondire quanto detto, consideriamo l'esperimento proposto in Figura 3.26. Il trasformatore presenta la porta secondaria a vuoto, realizzando un induttore non lineare. I trasduttori di corrente e tensione presenti nello schema sono dispositivi elettronici che convertono i valori istantanei di corrente e tensione in segnali comprensibili dall'elaboratore elettronico, il personal computer. La presenza di un PC rappresenta una gran comodità dato che in tal modo possiamo agevolmente rappresentare sullo schermo le forme d'onda della corrente e della tensione.

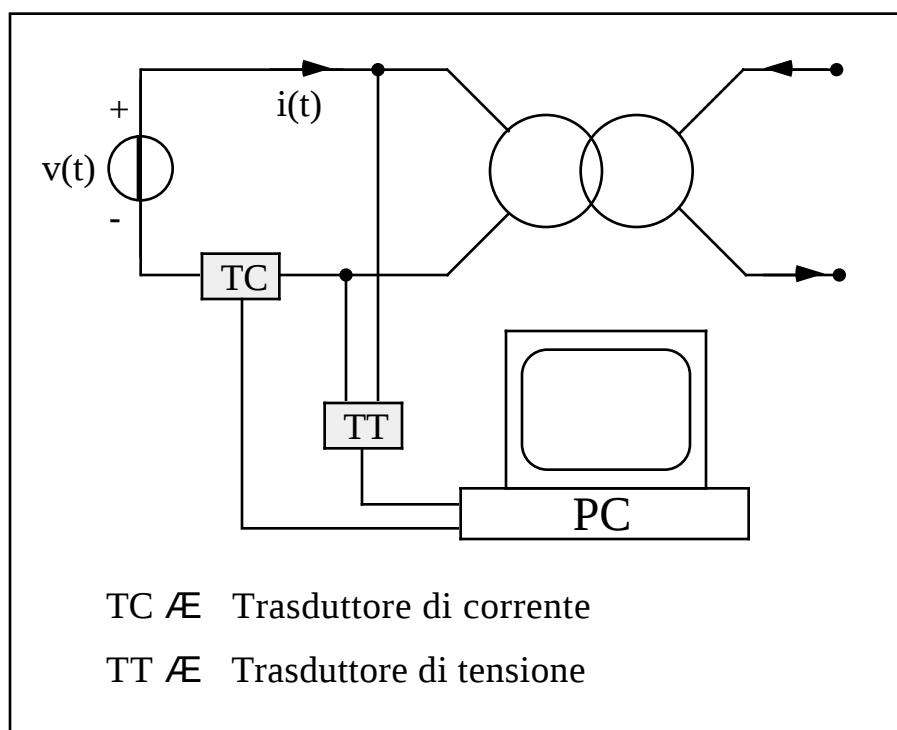


Figura 3.26: inserimento di un trasformatore funzionante a vuoto.

Nella Figura 3.27 sono riportate le tracce di corrente, visibili sul calcolatore, nel caso in cui la tensione sia una funzione sinusoidale, del tipo

$$v(t) = V_M \sin(\omega t) ,$$

la frequenza sia fissa e l'ampiezza assuma i tre valori $V_M = (0.5 , 1 , 1.2) \text{ V}$.

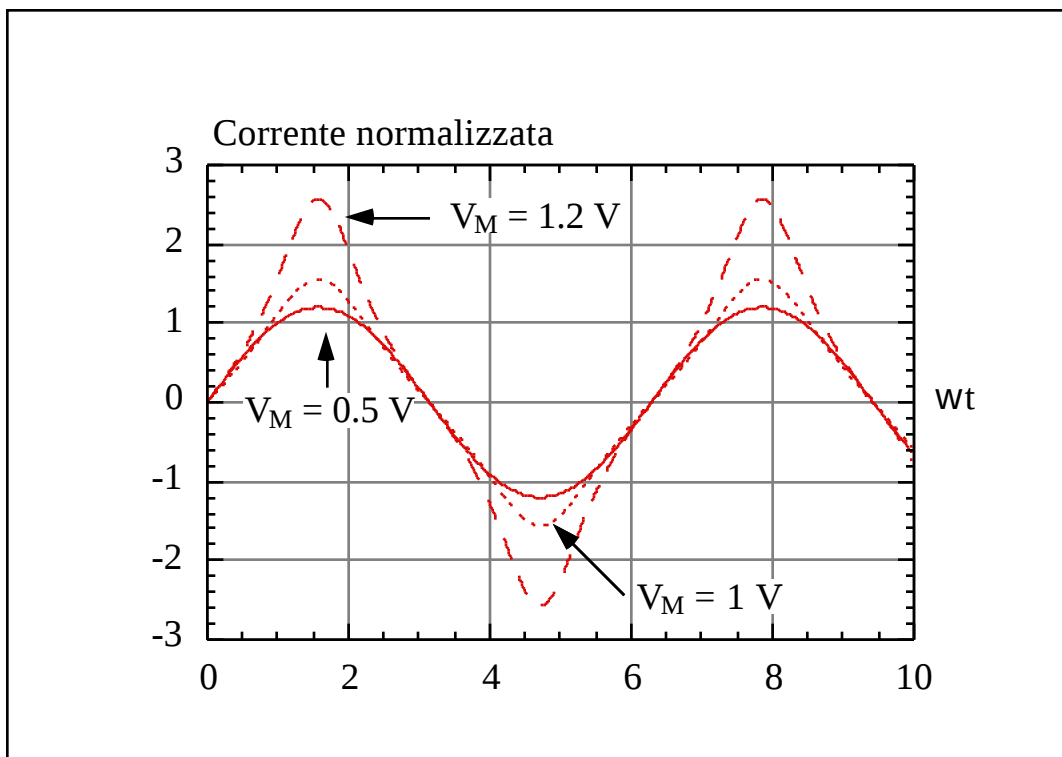


Figura 3.27: uscite non lineari.

Cosa deduciamo da questi grafici?

Osservando con attenzione la figura riportata, si comprende che, fino a quando il valore massimo della tensione è piccolo, la corrente ha un andamento che è molto somigliante ad una funzione sinusoidale. Ma, appena il valore massimo aumenta, la forma d'onda che rappresenta la corrente non è nemmeno lontanamente somigliante ad una sinusoide e presenta un valore massimo che tende sempre più ad aumentare. Più precisamente, per descrivere la corrente, avremmo bisogno non più di una sola funzione sinusoidale ma di più sinusoidi, le cui frequenze sono multipli interi della frequenza del generatore. In altri termini, la corrente è del tipo

$$i(t) = I_1 \sin(\omega t) + I_2 \sin(2\omega t) + I_3 \sin(3\omega t) + \dots,$$

cioè una combinazione lineare di funzioni sinusoidali di valori massimi I_1 , I_2 , I_3 e pulsazioni ω , 2ω , 3ω (a dir proprio tutta la verità, nel caso del trasformatore l'ampiezza I_2 è nulla: ma questo è un inutile dettaglio e, per questo, lo trascuriamo). E proprio questa era la proprietà dei sistemi non lineari che ci premeva mettere in luce: pur essendo la tensione di ingresso una funzione sinusoidale di assegnata pulsazione, la corrente presenta più (al limite anche infinite) sinusoidi di pulsazioni diverse. Potremmo dire che un sistema non lineare 'crea' frequenze diverse (multiple) da quella del segnale di ingresso.

Dal punto di vista del sistema elettrico in generale questa creazione di frequenze è un fenomeno indesiderato che va sotto il nome di inquinamento armonico e che può

creare non pochi problemi alle linee di trasmissione cui il trasformatore viene collegato. Lo studio dettagliato di questi fenomeni, comunque, esula dai limiti impostici, pur rappresentando uno dei più bei capitoli della Matematica, conosciuto come studio delle serie di Fourier.

» Sovracorrenti di guasto

Si manifestano allorché tra due elementi, normalmente a diverso potenziale, si stabilisce un accidentale collegamento elettrico che crea una maglia a bassa impedenza, detta **anello di guasto**, ove si instaura, per tempi molti brevi, la corrente di guasto (o di cortocircuito), di valore efficace molto più grande di quello nominale. Normalmente un cortocircuito può prodursi per difetto di isolamento causato da contatti accidentali, dalla pioggia, da surriscaldamenti provocati da sovraccarichi prolungati, ma, più frequentemente, da sovratensioni che determinano l'innesco di archi fra punti a potenziale differente. Lo studio del fenomeno è di fondamentale importanza per la scelta dei vari elementi dell'impianto, ma spesso incontra difficoltà quasi insormontabili: in questi casi si ricorre a metodi sperimentali sulle reti effettive o su adeguati modelli.

Nello schema mostrato in Figura 3.28, abbiamo indicato con $\bar{E}$ un generatore equivalente di f.e.m. di impedenza interna $\dot{Z}_0$, collegato al carico $\dot{Z}_C$ per mezzo di un'impedenza di linea $\dot{Z}$. Prima del guasto la corrente che circola nella maglia è pari a

$$\bar{I} = \frac{\bar{E}}{\dot{Z}_0 + \dot{Z} + \dot{Z}_C},$$

mentre la corrente dopo il guasto vale

$$\bar{I}_G = \frac{\bar{E}}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}},$$

in quanto l'impedenza di carico $\dot{Z}_C$ è stata cortocircuitata.

Ebbene, la corrente di guasto è, in valore efficace, molto più grande di quella circolante prima del guasto dato che, normalmente, è

$$|\dot{Z}_0 + \dot{Z}| \ll |\dot{Z}_C|.$$

Durante il guasto i conduttori subiscono un rapido innalzamento della temperatura, che può portare alla fusione del componente, ed intense sollecitazioni elettrodinamiche, che possono portare al cedimento meccanico. È evidente che, in

questo caso, solo una tempestiva apertura del circuito può salvare i diversi componenti.

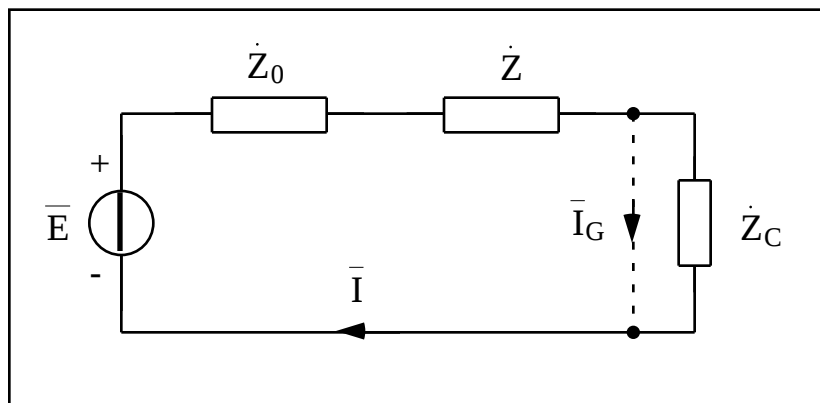


Figura 3.28: insorgenza di un anello di guasto.

Per proteggere i circuiti elettrici dalle sovracorrenti sono, pertanto, necessari dispositivi capaci di aprirli in maniera selettiva, discriminando le entità e le durate del sovraccarico. Questi dispositivi sono gli interruttori e che nel seguito verranno descritti in qualche dettaglio.

• Sovratensioni

In maniera complementare, in un sistema elettrico possono manifestarsi tensioni superiori a quelle normali di esercizio, dette **sovratensioni**, che vengono tradizionalmente distinte secondo lo schema che segue.

» Sovratensioni di origine interna

Sono dovute a manovre di chiusura e apertura di circuiti e, per questo, vengono anche dette sovratensioni di manovra. Possono essere anche determinate da rapide variazioni di carico oppure da fenomeni di risonanza. Pensate, ad esempio, ad una linea che, come sapete, ha un carattere prevalentemente ohmico-induttivo; se la linea è terminata con un carico capacitivo, possono scaturirne fenomeni di risonanza capaci di sostenere elevate sovratensioni. Infine, le sovratensioni possono essere causate da guasti, quali contatti accidentali e perdite dell'isolamento: queste sovratensioni possono superare di alcune volte le tensioni nominali e hanno, di norma, tempi caratteristici di evoluzione dell'ordine dei millisecondi.

» Sovratensioni di origine esterna

Sono dovute a fenomeni di induzione o a fulminazioni dirette che determinano le cosiddette sovratensioni di origine atmosferica. Possono presentare intensità maggiori delle tensioni nominali e fronti assai ripidi, con tempi di salita dell'ordine del microsecondo (o anche meno) e tempi di discesa di qualche decina di microsecondi.

Il danno maggiore che possono produrre le sovratensioni è il cedimento degli isolamenti di uno o più componenti, cedimento che risulta particolarmente grave se si tratta di isolamenti solidi che vengono irreversibilmente danneggiati. La perdita di isolamento è grave in quanto può produrre dei cortocircuiti nei quali viene dissipata una grande quantità di energia elettrica che, a volte, può portare a delle vere e proprie esplosioni. Per evitare che gli isolamenti dei componenti elettrici possano essere danneggiati, essi vengono dimensionati per tensioni parecchie volte più grandi di quelle nominali, allo scopo di garantirsi un elevato margine di sicurezza.

È interessante sottolineare, infine, che sovracorrenti e sovratensioni sono spesso correlate, essendo due facce della stessa medaglia. Una sovratensione, ad esempio, può causare il cedimento dell'isolamento innescando, in tal modo, un cortocircuito che diviene a sua volta causa di una sovracorrente.

• **Arco elettrico**

L'apertura e la chiusura di una linea, o più in generale di un qualsiasi circuito elettrico, possono avvenire o quando non circola corrente (a vuoto) oppure quando circola una corrente circa uguale alla corrente nominale (sotto carico). Tuttavia la condizione peggiore di interruzione si ha quando nella linea circola una sovracorrente, maggiore di quella nominale.

L'apertura viene realizzata per mezzo dei **sezionatori** e degli **interruttori**, dispositivi che realizzano la separazione di due elettrodi, o poli, inizialmente a contatto. Si tratta di dispositivi di apertura reversibili i quali realizzano la separazione dei due elettrodi che, fortemente premuti l'uno sull'altro, devono essere separati e allontanati.

Tra i due elettrodi separati si interpone un mezzo dielettrico, in genere fluido, capace di sopportare la tensione residua a circuito aperto. Per i dispositivi destinati a funzionare nelle più severe condizioni, come quelli in alta tensione, gli elettrodi e il mezzo dielettrico sono contenuti all'interno di una camera di interruzione, come mostrato in Figura 3.29.

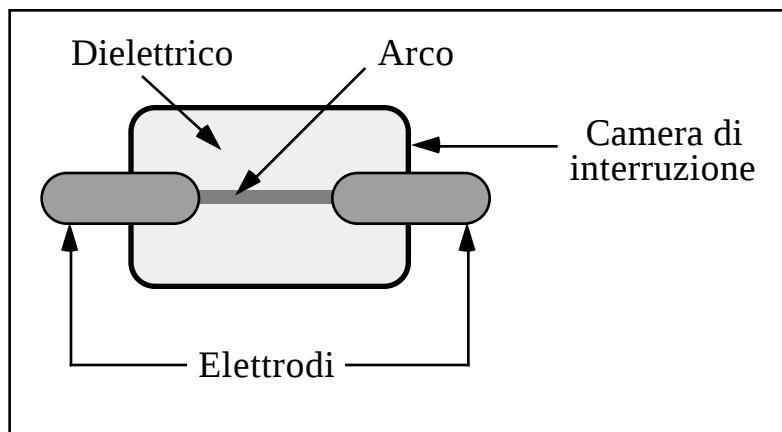


Figura 3.29: schematica rappresentazione di un arco elettrico.

È evidente, poi, che questi stessi dispositivi realizzeranno pure la chiusura della linea, che può avvenire in assenza oppure in presenza di tensione. Spesso, viene effettuata da un dispositivo reversibile, cioè capace di eseguire anche l'apertura, che porta in contatto gli elettrodi inizialmente separati. La tensione tra gli elettrodi in avvicinamento, se sufficientemente elevata, può causare l'innescò di un arco, nel quale si instaura una corrente elettrica; l'arco si estingue automaticamente al contatto, cosicché per evitare conseguenze distruttive, è sufficiente che esso sia di breve durata. Quindi, la chiusura deve essere rapida.

Quando avviene l'apertura in presenza di corrente, invece, questa non si interrompe istantaneamente al cessare del contatto elettrico tra i due poli, ma permane per un certo tempo attraverso un arco elettrico. Ma come si forma un arco elettrico?

Man mano che i due elettrodi si distaccano la superficie di contatto diminuisce e si assiste alla creazione di zone piccole, interessate da una intensa corrente, che, pertanto, si riscaldano. Appena il distacco è completato, queste zone più calde rilasciano elettroni per emissione termoionica che vengono accelerati dall'intenso campo elettrico ancora presente tra i due poli: sono proprio questi elettroni accelerati che urtando contro le molecole del fluido dielettrico finiscono per ionizzarle, dando così origine ad un arco elettrico che consente il perdurare della corrente.

Da un punto di vista elettrico, l'arco si comporta come un resistore non lineare, la cui caratteristica è qualitativamente mostrata in Figura 3.30. Se l'arco permane troppo a lungo, si può verificare la rapida usura degli elettrodi e persino l'esplosione del dispositivo. Se si verifica che il fluido dielettrico è ben deionizzato, che la distanza tra gli elettrodi è grande, che la temperatura si mantiene bassa, allora è più difficile che l'arco si inneschi, ovvero è facilitata l'estinzione.

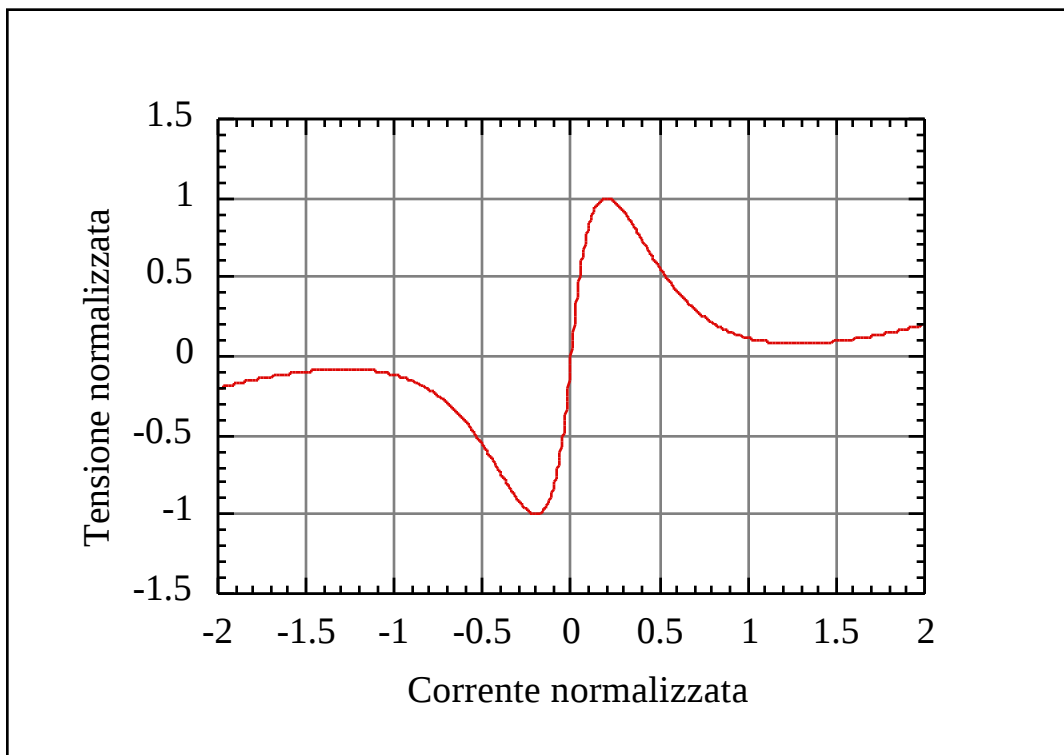


Figura 3.30: caratteristica statica di un arco elettrico.

Una volta neutralizzato l'arco, esso si innesca di nuovo se la tensione applicata dal circuito esterno supera quella di ionizzazione del dielettrico, che viene detta **tensione di ripresa**. Anche questa tensione cresce al crescere della distanza tra gli elettrodi e se si raffredda il fluido.

In regime sinusoidale, l'arco elettrico si spegne spontaneamente al passaggio per lo zero della corrente, che avviene due volte in ogni periodo; in caso di nuovo innesco dopo il primo azzeramento, l'arco si spegne di nuovo al successivo zero della corrente ed un ulteriore reinnesco risulta meno probabile, dato che, nel frattempo, la tensione di ripresa è aumentata.

In regime stazionario, contrariamente a quello sinusoidale, la corrente non si annulla spontaneamente e, quindi, per interromperla si deve fare affidamento sull'incremento della tensione d'arco, ottenuta mediante il suo allungamento e raffreddamento.

• Interruzione in Alta Tensione

Da quanto finora detto, si evince che un interruttore di potenza è un componente reversibile di manovra e protezione, capace di aprire e chiudere un circuito, allontanando oppure avvicinando gli elettrodi. L'apertura può avvenire anche in condizioni di cortocircuito, quando la corrente supera di molto il valore normale di esercizio. Precisamente la norma CEI 17 - 5 definisce l'interruttore automatico (meccanico) come l'apparecchio meccanico di manovra capace di stabilire, portare ed interrompere correnti in condizioni normali del circuito ed inoltre di stabilire,

portare per una durata specificata e interrompere correnti in condizioni anormali specificate del circuito, ad esempio quelle di cortocircuito.

Gli interruttori possono essere unipolari, quando una sola coppia di elettrodi apre il circuito, multipolari quando, azionati da un unico attuatore meccanico, aprono più coppie di elettrodi. La manovra può essere sia manuale, comandata da un operatore, sia automatica, asservita ad un dispositivo, detto relè, che interviene ogni volta che vengono rilevate condizioni anomale di funzionamento. L'automatismo, però, può essere anche utilizzato per normali operazioni di esercizio, non necessariamente collegate ad anomale condizioni di funzionamento.

I più importanti parametri che caratterizzano il comportamento di un interruttore e che vengono dichiarati dal costruttore e certificati per mezzo di prove eseguite in laboratori accreditati, sono i seguenti:

- la **tensione nominale di esercizio** rappresenta la tensione alla quale vengono riferite le prestazioni dell'apparecchio, sia nelle normali operazioni di apertura e chiusura, sia in condizioni di cortocircuito (nel caso dei sistemi trifasi rappresenta la tensione concatenata);
- la **tensione nominale di isolamento** è il valore di tensione che garantisce l'isolamento dell'apparecchio o di un suo componente accessorio;
- la **corrente nominale** costituisce la più grande corrente di regime che l'interruttore può sopportare quando è chiuso;
- il **potere nominale di interruzione** rappresenta, invece, la massima corrente, certamente più grande di quella nominale, che l'interruttore, operando con grande rapidità, è in grado di interrompere.

Due sono le principali tecniche per realizzare un rapido spegnimento dell'arco.

La prima consiste nell'allungamento dell'arco. Esso viene ottenuto allontanando rapidamente l'elettrodo mobile da quello fisso e, per ottenere la necessaria rapidità di azione, si utilizzano dei meccanismi a scatto che fanno uso di molle precaricate. Tuttavia, un efficace allungamento dell'arco può essere ottenuto mediante soffiatura che può essere pneumatica, quando utilizziamo un robusto getto di fluido, o magnetica, quando sfruttiamo il campo magnetico creato da una corrente che circola in una spira.

La seconda sfrutta il raffreddamento del fluido che si ottiene rimescolandolo e favorendo lo scambio termico con le pareti della camera di interruzione. A tal fine, un ruolo fondamentale è sia dal tipo di fluido, sia dalla geometria della camera.

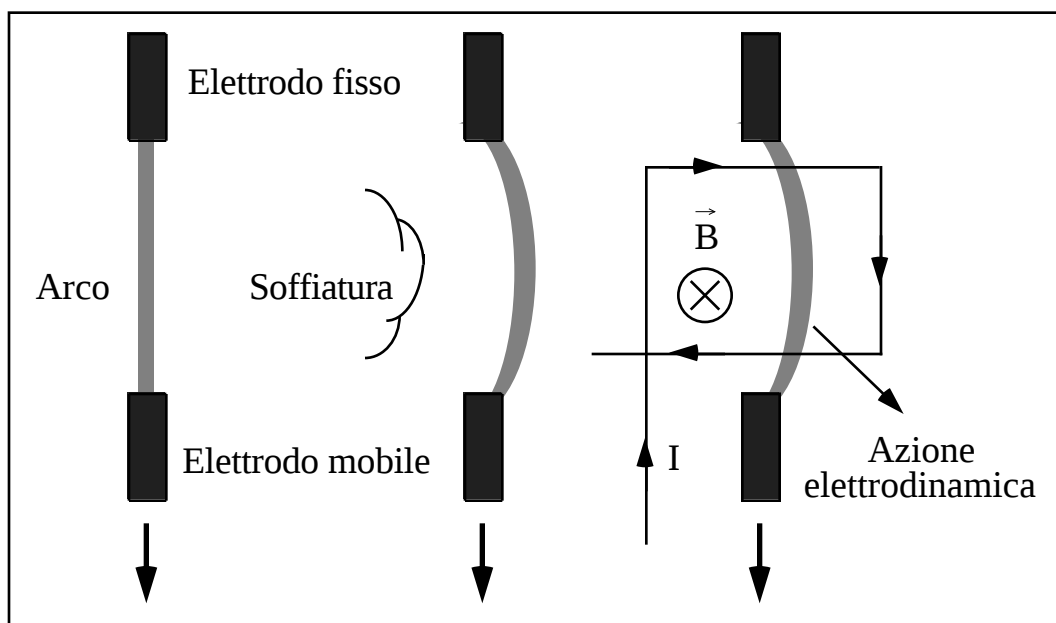


Figura 3.31: varie tecniche di allungamento dell'arco.

La necessità di far fronte a sollecitazioni meccaniche e termiche anche molto gravose rende, in conclusione, gli interruttori molto ingombranti, pesanti e costosi. Il fluido generalmente adoperato negli interruttori per alta tensione è l'esafluoruro di zolfo, simbolo chimico SF_6 . Questo gas, adoperato come fluido dielettrico contenuto nella camera di interruzione, presenta una bassa tensione d'arco che, per una data corrente, comporta una potenza dissipata modesta e, quindi, una bassa erosione degli elettrodi. L'esafluoruro di zolfo è costituito da molecole cinque volte più pesanti dell'aria e possiede un'ottima attitudine refrigerante. A temperature elevate le sue molecole si decompongono in atomo di zolfo e fluoro, dotato di marcata attitudine alla cattura degli elettroni liberi, i principali responsabili della conduzione dell'arco. Questi fattori favoriscono un rapido annullarsi della corrente.

• Sezionatori

I sezionatori sono dispositivi destinati ad interrompere la continuità elettrica per le sole linee a vuoto (norme CEI 17 - 4 e 17 - 11). I loro contatti, spesso del tipo a coltello, sono generalmente visibili e forniscono, in tal modo, una sorta di assicurazione visiva sullo stato di apertura della linea.

I sezionatori a semplice interruzione sono costruiti secondo lo schema di principio di Figura 3.32a: nella posizione di circuito chiuso, il conduttore a lama L, incernierato ad una estremità, viene mantenuto fra le espansioni del morsetto fisso di sinistra, collegando, in tal modo, i due conduttori C. La rotazione della lama L interrompe la continuità ohmica dei contatti C. Entrambi i blocchi sono supportati da isolatori, il cui dimensionamento va riferito alla tensione fra i contatti a circuito aperto.

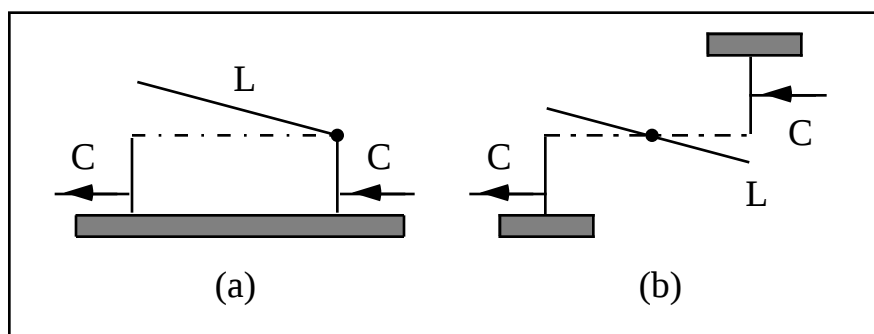


Figura 3.32: (a) a semplice interruzione e (b) a doppia interruzione.

Nel sezionatore a doppia interruzione, mostrato in Figura 3.32b, la rotazione della lama produce, come è evidente, una duplice interruzione per ogni linea.

La manovra dei sezionatori può essere effettuata a mano o con l'ausilio di azionamenti elettrici e meccanici: è importante, in ogni caso, che rimanga rigorosamente subordinata a quella degli interruttori, in modo che i sezionatori operino sempre a vuoto. Nella fase di interruzione del circuito, si apre prima l'interruttore e poi il sezionatore; in quella di ripristino della continuità, invece, si richiude prima il sezionatore e poi l'interruttore.

3.5 Campi in prossimità di una linea di alta tensione

Quando si parla degli elettrodotti per il trasporto e la distribuzione dell'energia elettrica, date le elevate tensioni e correnti in gioco, non si può non pensare alle elevate intensità di campo elettrico e magnetico da essi generati. Tuttavia, oltre alle linee ad alta tensione, di cui ci occuperemo in questo paragrafo, ci sono numerose altre sorgenti di campo elettromagnetico alla frequenza di 50 Hz: in particolare, intendiamo far riferimento a tutte quelle apparecchiature di uso quotidiano che funzionano a corrente alternata. Esamineremo queste ultime in un capitolo successivo, descrivendo le loro caratteristiche quali generatori di campi elettrici e magnetici.

• Andamento dei campi

Alla frequenza di 50 Hz, le componenti del campo magnetico ed elettrico possono essere considerate separatamente. Esaminiamo, allora, distintamente.

Il **campo elettrico** è legato in maniera direttamente proporzionale alla tensione della linea e si attenua, allontanandosi da essa, come l'inverso della distanza dai conduttori. Contrariamente alle correnti, i valori efficaci delle tensioni sulle linee non variano in maniera apprezzabile nel tempo: l'intensità del campo elettrico può considerarsi, quindi, praticamente costante. La configurazione della linea, se a singola oppure a doppia terna, influenza il campo così come, nelle linee a doppia

terna, la disposizione delle fasi di ciascuna terna. La presenza di alberi, oggetti oppure edifici in prossimità delle linee riduce l'intensità del campo; in particolare, all'interno degli edifici, si possono misurare intensità di campo elettrico fino a 10 (anche 100) volte inferiori a quelle rilevabili all'esterno.

Il campo elettrico è la somma di tre contributi sfasati tra loro di 120° e, tenuto presente che i conduttori sono collegati tra due tralicci in modo da formare una catenaria, l'intensità maggiore del campo elettrico non si misura in prossimità dei sostegni, ma al centro della campata, ossia nel punto in cui i cavi, così disposti, si trovano alla minore distanza dal suolo. L'andamento ed il valore massimo delle intensità dei campi dipenderà anche dalla disposizione e dalle distanze tra i conduttori della linea.

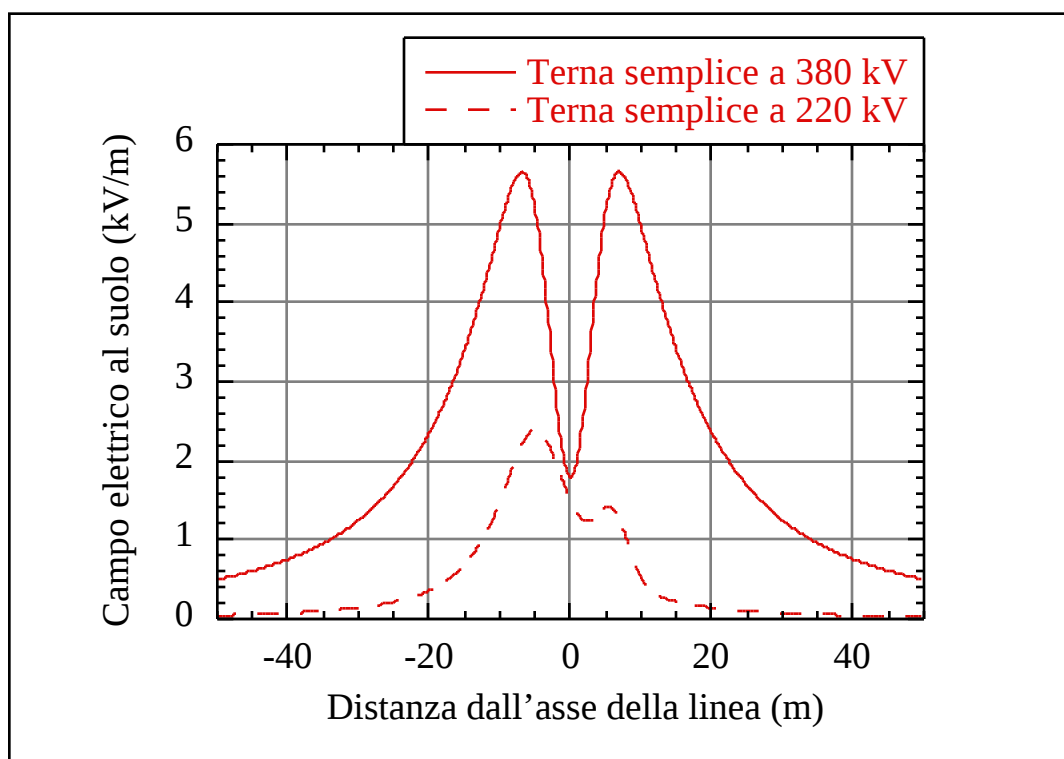


Figura 3.33: campo elettrico al suolo per due tipologie di elettrodotti.

Gli andamenti del campo elettrico, per due diversi tipi di elettrodotti, sono rappresentati in Figura 3.33, dove riportiamo l'andamento del valore del campo elettrico al suolo, in funzione della distanza dall'asse del traliccio, in corrispondenza del centro della campata, nella sezione trasversale alla linea. Da questa figura si deduce come la disposizione dei conduttori influenzi l'andamento ed il valore massimo del campo elettrico.

Per calcolare questi campi abbiamo supposto che il suolo sia piano e si comporti come un conduttore elettrico perfetto, che i conduttori sulla linea siano rettilinei, orizzontali e di lunghezza infinita, che le correnti e le tensioni siano in fase tra loro;

si è trascurata la presenza di edifici, vegetazione e di altri oggetti presenti nelle vicinanze della linea, nonché dei tralicci di sostegno.

	150 kV	220 kV	380 kV
I = 600 A (terna semplice)	2550 V/m	-	-
I = 600 A (terna doppia)	3950 V/m	-	-
I = 920 A (terna semplice)	2750 V/m	4300 V/m	-
I = 920 A (terna doppia)	4200 V/m	5600 V/m	-
I = 1.5 kA (terna semplice)	-	-	5000 V/m
I = 1.5 kA (terna doppia)	-	-	7800 V/m

La tabella precedente, invece, riassume i valori massimi di campo elettrico al suolo per diversi tipi di linea, semplice e doppia, supposte attraversate dalla corrente indicata.

Anche il **campo magnetico**, così come il campo elettrico, è dato dalla risultante di tre contributi, in questo caso, le tre correnti del sistema trifase. Dall'intensità di tali correnti e dall'ordine delle fasi dipenderà l'ampiezza del campo magnetico che si va a misurare. Si è notato, però, che durante il giorno la richiesta di energia può variare anche in maniera considerevole e con essa le intensità delle correnti sulle linee. Di conseguenza, il campo magnetico non sarà costante durante la giornata, ma negli andamenti temporali sarà possibile individuare dei valori minimi, in genere nelle ore notturne, e dei valori massimi, in corrispondenza delle ore di maggior carico, oltre ad una periodicità giorno/notte e settimanale.

Rispetto a quanto visto per il campo elettrico, il campo magnetico assume il valore massimo in corrispondenza della minima distanza dei conduttori dal suolo, ossia al centro della campata, e decade molto rapidamente allontanandosi dalle linee. In tal caso, però, non c'è alcun effetto schermante da parte di edifici, alberi oppure altri oggetti vicini alla linea. Quindi, anche all'interno delle abitazioni si può misurare un campo magnetico di intensità comparabile a quello esterno.

In Figura 3.34 sono riportati gli andamenti del campo di induzione magnetica, calcolati per due tipi di linea nelle condizioni di massimo carico ammissibile e nelle ipotesi precedentemente descritte.

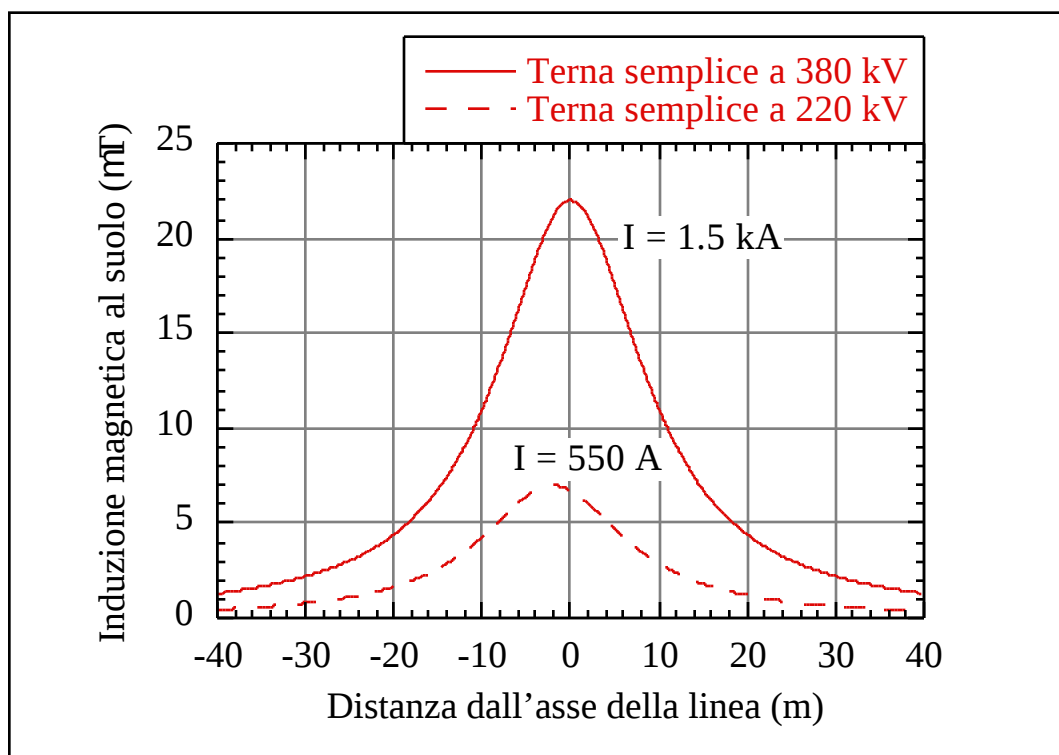


Figura 3.34: induzione magnetica al suolo per due tipi di elettrodotto.

Nella tabella, infine, sono evidenziati i valori massimi di induzione magnetica calcolati per tre tipi di linee in condizioni di massimo carico. Tali condizioni sono del tutto occasionali e vengono raggiunte al più un paio di volte all'anno. Anche in questo caso, a causa della particolare disposizione dei conduttori sulla linea, può accadere che i valori di massima intensità non si abbiano in corrispondenza dell'asse delle linee.

	150 kV	220 kV	380 kV
I = 600 A (terna semplice)	12 mT	-	-
I = 600 A (terna doppia)	13.2 mT	-	-
I = 920 A (terna semplice)	18.3 mT	18.3 mT	-
I = 920 A (terna doppia)	19.8 mT	19 mT	-
I = 1.5 kA (terna semplice)	-	-	22 mT
I = 1.5 kA (terna doppia)	-	-	20.7 mT

• Le linee compatte ed i cavi interrati

Un metodo per ridurre l'intensità dei campi può essere quello di allontanare i cavi dell'elettrodotto dal suolo, elevando in altezza i sostegni, vista la dipendenza del campo elettrico e magnetico dall'altezza della linee dal suolo. Ma, come facilmente intuibile, l'elevazione dei tralicci di sostegno delle linee non è una soluzione attuabile su larga scala, ma solo in casi particolari e per situazioni eccezionali.

Attualmente le soluzioni più comunemente utilizzate per ridurre le intensità dei campi sono le linee aeree compatte ed, in misura molto minore, i cavi interrati.

Una **linea aerea compatta** è caratterizzata da una ridotta occupazione di spazio, in quanto necessita di campate corte e, di conseguenza, di sostegni più bassi. Il sostegno è di tipo a cavalletto, come mostrato in Figura 3.35, caratterizzato da un ridotto ingombro al suolo. Inoltre, evoluti sistemi di isolatori, non di tipo a catena, ma costituiti da mensole isolanti, permettono di ridurre la dimensione della parte superiore del supporto. La possibilità di poter avvicinare i conduttori consente di ridurre l'intensità del campo elettrico e magnetico rispetto alle linee tradizionali. La riduzione delle distanze tra le fasi dei singoli conduttori comporta problemi di natura meccanica e di natura elettrica che non consentono un uso esteso di tali linee, in completa sostituzione della tecnologia tradizionale. A ciò si aggiunga il fatto che le attuali procedure di manutenzione sotto tensione delle linee elettriche non sono applicabili alle linee compatte. Inoltre, lungo il tracciato della linea, non è possibile fare gli stessi angoli che si possono fare con le linee tradizionali, a causa della ridotta distanza tra i conduttori.

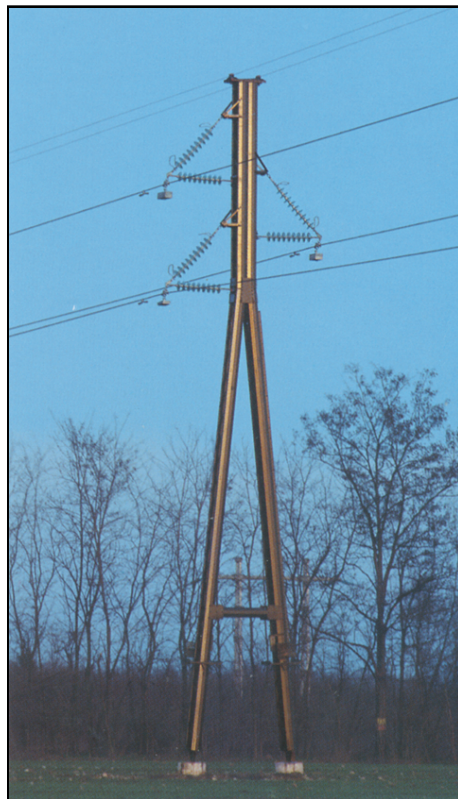


Figura 3.35: linea aerea di tipo compatto con sostegno a cavalletto.

La riduzione dell'intensità del campo magnetico dipende però anche dal verso delle correnti, in quanto, a volte, come nel caso di una linea a doppia terna di cui una entrante e l'altra uscente da una stazione di trasformazione, le due terne portano correnti di verso discorde, per cui la trasposizione delle fasi non porta alcun

beneficio. L'utilizzo delle linee compatte, per il loro minor impatto sull'ambiente, è frequente in situazioni particolari, in cui occorre salvaguardare il paesaggio e aree di particolare pregio ed interesse storico.

Un'alternativa alle linee aeree è l'utilizzo di **cavi interrati**. Le linee interrate sono formate da terne trifasi in cavo, disposte linearmente sullo stesso piano, secondo una disposizione detta a terna piana, oppure a triangolo, secondo una disposizione detta a trifoglio. Per la trasmissione di energia elettrica ad alte tensioni viene utilizzato un cavo isolato con polietilene reticolato (XLPE) che può trasportare tensioni fino a 400 kV.

Nelle Figure 3.36 e 3.37, rispettivamente, sono riportati gli andamenti teorici del campo di induzione magnetica al suolo, relativi ad una terna piana ed a triangolo di cavi, interrati alla profondità di 1.5 m dal suolo. Il cavo utilizzato è in XLPE, con diametro esterno di 13.4 cm, funzionante alla tensione di 380 kV. Il campo elettrico, non riportato nelle figure, risulta ridotto in maniera significativa data la possibilità di avvicinare i cavi e per l'effetto schermante dovuto alla guaina metallica ed al terreno.

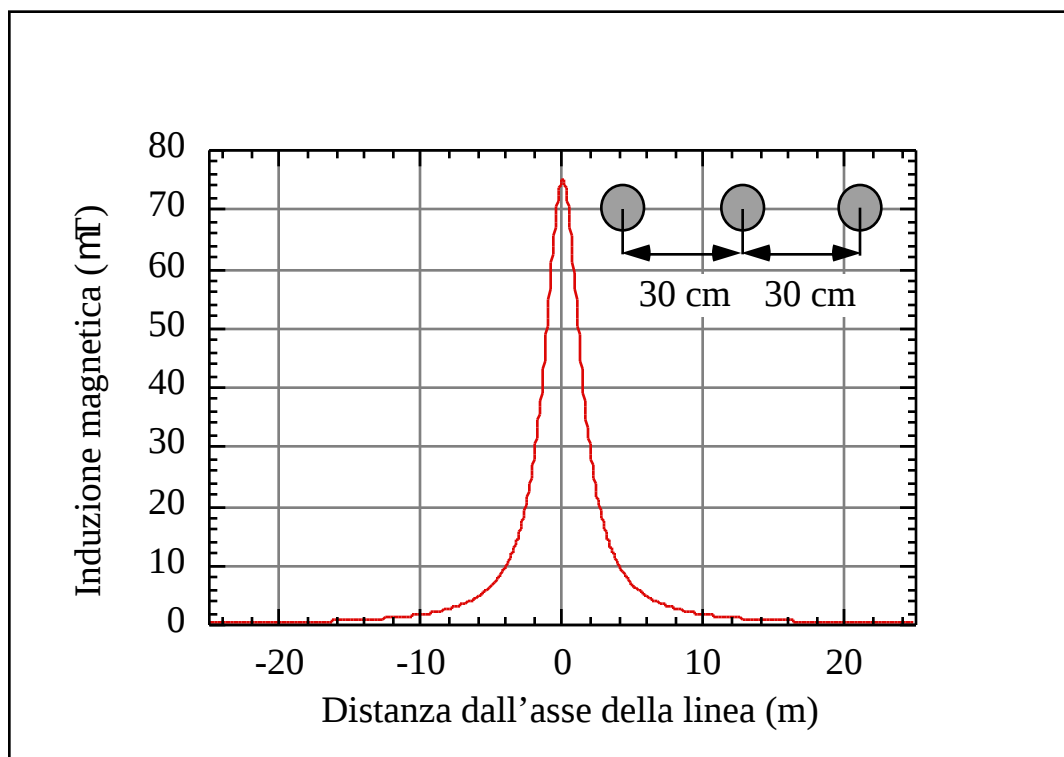


Figura 3.36: induzione magnetica al suolo generata da tre cavi a terna piana.

La riduzione del campo elettrico, operata grazie all'effetto combinato dell'azione schermante del terreno e dalla maggior prossimità reciproca tra i conduttori della linea, è in parte annullata dalla possibilità, per gli individui, di avvicinarsi maggiormente ai conduttori stessi, che sono di solito interrati a soli 1.5 m di profondità.

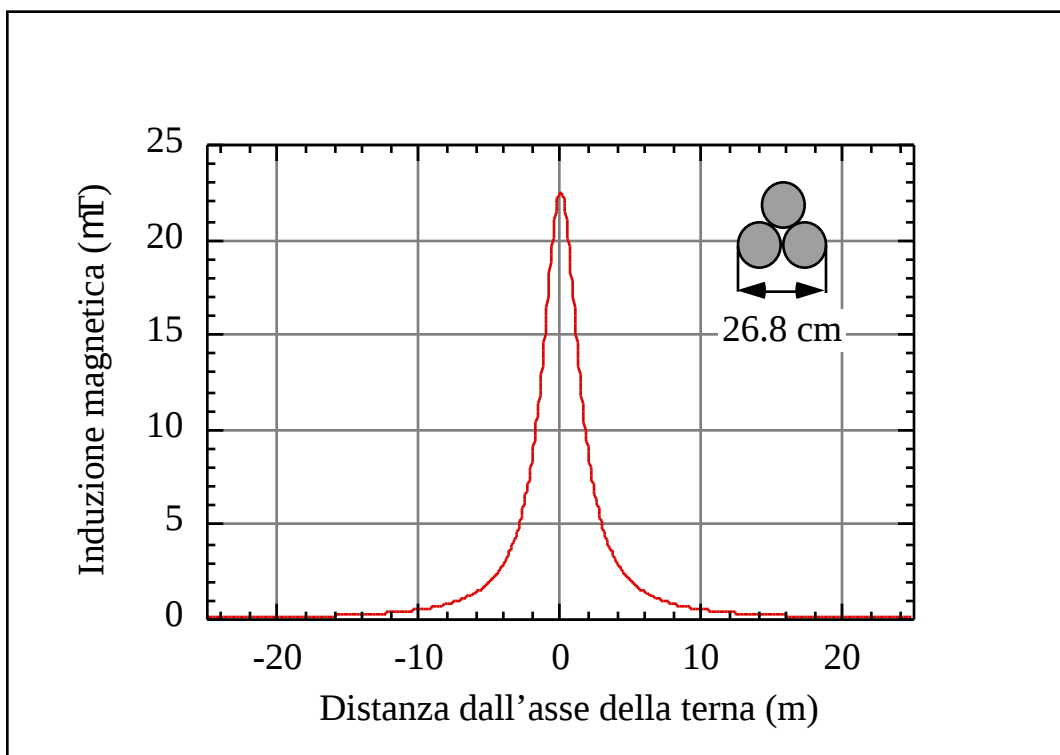


Figura 3.37: induzione magnetica al suolo generata da tre cavi a trifoglio.

Al contrario, il campo magnetico non risente di questi effetti schermanti ed in particolare sull'asse di una terna interrata assume un valore massimo più elevato di quello prodotto da una linea aerea che trasporta la stessa potenza. Dalla Figura 3.38, confrontando il campo magnetico generato da linee aeree con quello generato da cavi interrati, si può notare come per questi ultimi l'intensità massima del campo è più elevata, a causa della ridotta distanza tra le fasi, ma presenta un'attenuazione trasversale più pronunciata.

L'utilizzazione di linee in cavo interrato non è molto diffusa in quanto, pur offrendo un impatto visivo praticamente nullo, una volta installate, presentano grandi difficoltà di ordine pratico, al momento della posa nei centri abitati, e di ordine economico per i costi di installazione e manutenzione.

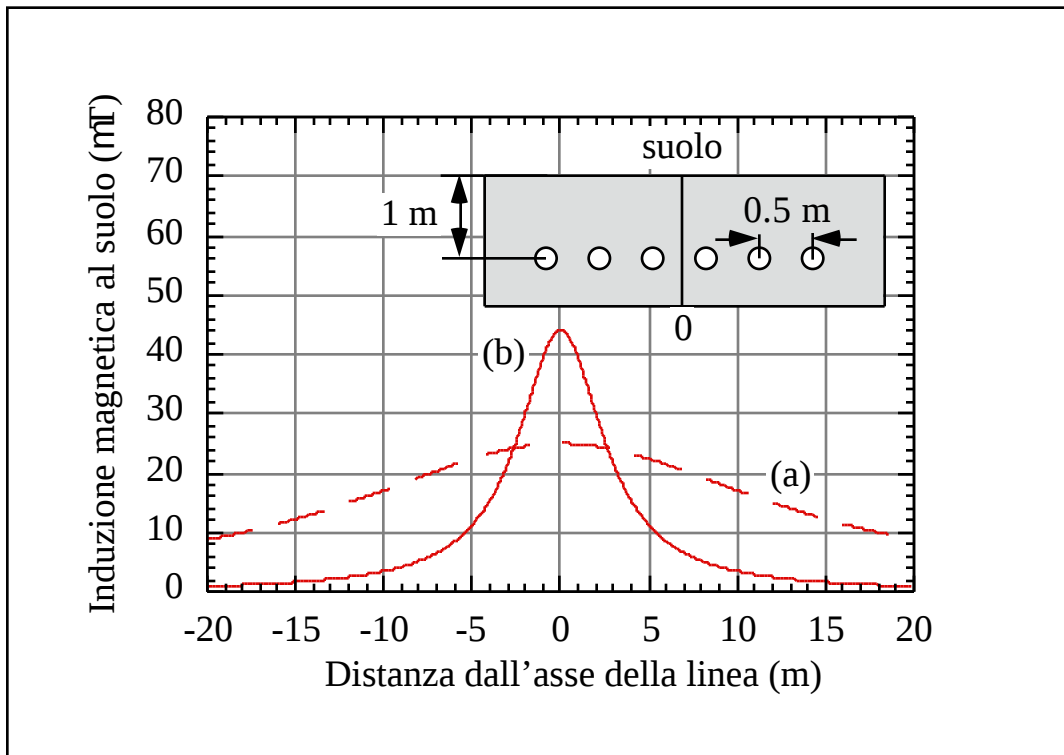


Figura 3.38: induzione magnetica generata (a) da una linea aerea a fusto a Y e terna semplice, a 380 kV ($I = 1.5$ kA, $A = 1$ GVA) e (b) da due terne di cavi, interrate a un metro di profondità, a 380 kV ($I = 750$ A, $A = 1$ GVA).

Oltre ai materiali plastici sintetici, per l'isolamento si utilizzano cavi raffreddati a liquido che, dati i costi ed i problemi tecnici di installazione ed esercizio, vengono utilizzati solo per brevi tratte ed in casi particolari, quale ad esempio l'attraversamento dello stretto di Messina.

Senza voler entrare in merito alla parte tecnologica e costruttiva dei cavi, ci riferiamo qui sostanzialmente al problema della determinazione dei conduttori, costituenti il cavo: questa determinazione si effettua in base al riscaldamento del cavo, dipendente dalle condizioni di posa. I principali metodi di posa dei cavi vengono di seguito passati in rassegna.

- Posa diretta nel terreno: il cavo viene steso in un piccolo solco, che viene riempito o con la stessa massa di terra o con materiale di altra provenienza, con resistività termica inferiore.
- Posa in cunicoli, ad esempio, di terracotta: il cavo viene posato in cunicoli aperti, che vengono riempiti con materiale misto e ricoperti con piastrelle come chiusura.
- Posa in appositi cunicoli circolari oppure in tubi (di cemento, di plastica): i cavi sono infilati e tirati. Questo metodo offre il vantaggio di rendere possibile la posa di altri cavi, qualora l'ingombro lo permetta, senza ulteriori lavori di sterro.
- Posa in cunicoli già costruiti per altri scopi. Questo metodo viene adottato ove sia possibile farlo.

Stabilito il tipo di cavo, in relazione alla sua ‘portata’, cioè all’intensità di corrente massima ammissibile in servizio continuativo, la scelta è facilitata da tabelle fornite dalle ditte costruttrici, che indicano, in base alla sezione dei conduttori del cavo, le portate sia con posa interrata, sia con posa in aria. Qualora più cavi siano raggruppati, la portata è ridotta tanto più, quanto maggiore è il numero dei cavi del raggruppamento; questa eventualità viene tenuta in conto dai ‘coefficienti di riduzione’ della portata.

• Fondo elettromagnetico ambientale

In ambiente urbano, maggiormente nelle grandi città, i campi elettrici e magnetici originati dall’utilizzo di energia elettrica hanno determinato un fondo elettromagnetico artificiale che, a volte, può raggiungere intensità significative, anche per la presenza di sorgenti di campo operanti su bande diverse. Nel caso di nuove installazioni, quindi, è importante valutare la situazione espositiva esistente per poter controllare l’incremento di inquinamento ambientale originato dalle nuove sorgenti. In mancanza di dati in letteratura, le varie Agenzie Regionali per la Protezione dell’Ambiente (ARPA) dovrebbero provvedere a realizzare, nelle diverse città del nostro paese, campagne di misura del fondo elettromagnetico. Così ha già fatto il Dipartimento di Ivrea dell’ARPA della regione Piemonte, uno dei più attivi in questo campo, che ha misurato i livelli del fondo elettromagnetico in centri piccoli e grande della regione. Individuato un certo percorso nell’area in esame, i ricercatori dell’ARPA hanno riscontrato che i valori di campo misurati non dipendono solo dalla variabilità spaziale, ma anche da quella temporale, in quanto occorre un certo periodo (circa due ore) per completare l’intero percorso di misura. Per tale motivo, le misure lungo lo stesso percorso sono state ripetute in tre momenti diversi della giornata ed in aggiunta si è provveduto ad una misura, durata tutta una giornata, in una posizione fissa. Mettendo in correlazione i livelli di campo magnetico misurati con altri parametri, quali la densità abitativa, è possibile ricavare una prima indicazione quantitativa del livello di esposizione presente in ambiente urbano. Nella tabella che segue sono riportati i valori medi e massimi del campo magnetico misurati in tre città piemontesi con differente numero di abitanti. I valori medi sono stati ottenuti tenendo conto della variabilità spaziale dei valori di campo, mentre per valutare l’evoluzione temporale del campo si è ripetuta la misura in varie ore della giornata su una particolare zona della città.

	B _{MEDIO} (mT)	B _{MASSIMO} (mT)
Città di 1.000.000 di abitanti	0.19	5.73
Città di 60.000 abitanti	0.18	2.53

Cittadina di 34.000 abitanti	0.11	2.51
------------------------------	------	------

È interessante notare come, soprattutto nelle grandi città, i valori medi del campo magnetico siano dello stesso ordine (0.2 mT) di quelli adottati in vari studi epidemiologici quali livelli di soglia. Infatti, alcuni studiosi hanno cercato di individuare, in maniera deduttiva, dai valori tipici di campo magnetico in prossimità delle linee elettriche, una soglia tra livelli sicuri e pericolosi per le esposizioni croniche e hanno fissato tale valore, detto **soglia di attenzione epidemiologica**, a circa 0.2 mT, oltre il quale sembrerebbe dimostrata la correlazione tra esposizione cronica ed insorgenza di gravi malattie nell'uomo. Pertanto, visti i valori misurati, tutti gli abitanti delle grandi città risulterebbero esposti a valori di campo magnetico prossimi alla soglia di attenzione epidemiologica.

In ambiente domestico, si misura un fondo ambientale costituito non solo dalle fonti esterne ma anche da quelle interne, quale ad esempio il cablaggio dell'impianto elettrico all'interno degli appartamenti. Pertanto, quando si parla di esposizione domestica ai campi, si è soliti distinguere il contributo fornito dalle sorgenti individuabili da quello del fondo ambientale. In sede di misura, si è notato come i campi magnetici misurati all'interno di un'abitazione presentino un'evidente periodicità giorno/notte ed un'intensità minore nelle abitazioni singole rispetto agli appartamenti condominiali, poiché in questi ultimi c'è da considerare anche il contributo apportato dagli appartamenti confinanti.

3.6 Misure del campo elettrico e magnetico

Nel presente paragrafo verranno brevemente illustrate le tecniche e le strumentazioni utilizzate nella rivelazione del campo elettrico e magnetico in prossimità di una linea elettrica, rimandando a pubblicazioni più specialistiche o ai manuali di riferimento dei diversi strumenti chi volesse approfondire il soggetto.

Il *campo elettrico* (che, come è ben noto, si misura in volt/metro) è sostenuto dalle cariche elettriche sui conduttori e può essere rappresentato da linee di forza che si originano dal conduttore e terminano al suolo. Nel caso in esame, essendo il campo generato da una sorgente trifase, si potrebbe dimostrare che il vettore che lo descrive ruota nello spazio descrivendo un'ellisse, il cui semiasse maggiore rappresenta l'ampiezza e la direzione di massimo, mentre il semiasse minore l'ampiezza e la direzione di minimo. Sulla superficie del suolo, assunto per semplicità perfettamente conduttore, il vettore campo elettrico è invece oscillante e perpendicolare al suolo. Le misure vengono effettuate sotto i conduttori ad un'altezza compresa tra il livello del suolo e due metri, dato che, in tale zona, è

trascurabile la componente orizzontale del campo elettrico, mentre la componente verticale varia sul piano orizzontale e rimane pressoché costante con l'altezza.

Una più completa indicazione sui valori assunti dal campo elettrico nella zona oggetto di misura può essere fornita mediante l'indicazione dei valori minimi e massimi e delle rispettive direzioni sul piano dell'ellisse del campo. Facendo l'ipotesi di considerare le linee orizzontali ed il terreno sottostante perfettamente pianeggiante e sgombro da oggetti, si ha che il piano dell'ellisse, descritta dal vettore ruotante, è perpendicolare ai conduttori.

Il **campo di induzione magnetica** (che si misura in tesla), invece, è sostenuto dalla corrente che scorre nei conduttori e la sua rappresentazione è data da linee di forma chiuse, aventi come asse i conduttori della linea.

• **Strumenti di misura**

Gli strumenti utilizzati sono in genere costituiti da due parti distinte: un sensore ed un rilevatore. Il **sensore** di campo, o sonda, può essere di tipo isotropo, ed in tal caso basta un'unica misura per ottenere il valore del campo, o di tipo anisotropo, col quale, invece, sono necessarie diverse rilevazioni per ognuna delle componenti spaziali. Il sensore di tipo isotropo è quello normalmente utilizzato per misure di campo magnetico generato da elettrodotti. Il rilevatore vero e proprio, mostrato in Figura 3.39, è la parte dello strumento che provvede al trattamento del segnale ed alla sua visualizzazione in forma analogica o numerica.

Oltre a queste caratteristiche comuni a tutti gli strumenti, i misuratori possono essere dotati di varie funzioni accessorie, quali filtri per le diverse frequenze o supporti per la registrazione dei dati acquisiti sul posto.



Figura 3.39: sensore e rilevatore per misure di campo elettrico.

Per le **misure di campo elettrico**, tra i sensori più comunemente utilizzati troviamo sicuramente il misuratore a potenziale flottante, che ha la caratteristica di non richiedere un riferimento di potenziale noto (da cui il nome). Questo strumento opera misurando la carica che viene indotta su due parti staccate di un conduttore, una volta che questo sia sottoposto all'influenza di un campo elettrico. La sonda può avere la forma di una sfera, di un parallelepipedo oppure può essere a piatti piani e paralleli, ed è collegata mediante cavi in fibra ottica alla parte dell'apparecchio che si occupa della visualizzazione del segnale misurato. In pratica, nel caso della sonda sferica, si introduce la sonda in un campo uniforme in modo che il piano di separazione delle due semisfere sia perpendicolare al piano di appoggio.

Vi è poi il misuratore a potenziale di terra, utilizzato per misurare l'intensità del campo elettrico al livello del suolo. Si tratta di due piatti piani paralleli, divisi da uno strato di materiale isolante. Per effetto del campo sul piatto superiore, che funge da sensore, si induce una carica. Come per il tipo precedente, dalla misura della carica indotta, possiamo risalire all'intensità del campo.

Abbiamo ancora il misuratore elettro-ottico, che sfrutta l'effetto Pockels, e costituito da una sonda in cristallo dielettrico, in genere bisolfato di potassio. Come quelli a potenziale flottante, questo tipo di misuratore può essere utilizzato anche sopra il piano di terra, senza la necessità di avere un riferimento a potenziale di terra. La sonda è di dimensioni minori rispetto a quelle di altri tipi di strumenti e ciò consente di limitare la perturbazione della distribuzione di cariche sulle

superfici al contorno. Quando il cristallo dielettrico viene opportunamente orientato in un campo elettrico, si induce in esso una birifrangenza proporzionale all'intensità del campo stesso. Dal rapporto tra le intensità della luce trasmessa e quella incidente, si ricava il campo elettrico all'interno del cristallo e, indirettamente, del campo elettrico esterno.

Per le **misure di induzione magnetica** i principali tipi di misuratori sono il misuratore ad induzione e quello ad effetto Hall. Il misuratore ad induzione è costituito da una serie di spire di materiale conduttore in cui per effetto del campo magnetico si induce una forza elettromotrice. Dalla misura di tale forza elettromotrice indotta si ricava il campo, in direzione ed ampiezza, orientando le spire finché l'intensità misurata non raggiunge il valore massimo.

L'ultimo tipo di misuratore, sfruttando l'effetto Hall, fornisce il valore del campo magnetico a partire dalla differenza di potenziale che si instaura tra le superfici del sensore.

• Incertezze nelle misure

Gli errori che si commettono nelle misure di campo sono dovuti principalmente alla presenza della sonda e dell'osservatore nel punto di misura. In pratica, ciò che si misura è il campo perturbato, in quanto rispetto alla condizione ideale bisogna tener conto delle cariche superficiali che si inducono sul piano di terra e sulla superficie della sonda: tali cariche generano un campo elettrico che sovrapponendosi a quello presente falsa la misura. Per questo motivo la zona in cui si effettua la misura deve essere piana e sgombra di oggetti. Nel caso vi siano oggetti inamovibili occorre eseguire diverse misure a varie distanze da essi. Quando possibile, la distanza tra sonda ed oggetti presenti dovrebbe essere almeno pari al doppio della massima dimensione diagonale della sonda. Con alcuni accorgimenti è possibile ridurre l'influenza della presenza dell'osservatore e della sonda, il cosiddetto **effetto di prossimità**, a meno del 3%, mantenendo la sonda ad una distanza sufficiente dall'osservatore. Per quantificare tale effetto si monta la sonda su un supporto isolante e si controllano le variazioni del valore del campo misurato in funzione della distanza dell'osservatore. Se, poi, occorre effettuare un confronto tra il campo misurato ed il campo calcolato si deve contenere l'effetto di prossimità entro l'1%.

Ma anche altri parametri contribuiscono a diminuire la precisione della misura, alcuni di tipo ambientale, come la temperatura e l'umidità, altri, invece, di tipo elettrico come le correnti di dispersione lungo il manico della sonda e lungo il supporto. In particolare, nelle misure di campo, a partire dalle correnti indotte occorre verificare, ad esempio con un oscilloscopio, che non vi siano armoniche indesiderate nel campo: in tal caso l'errore dipenderà dalle qualità del filtro del circuito rilevatore.

3.7 Effetti biologici e sanitari dei campi a basse frequenze

Negli ultimi anni, l'utilizzo massiccio dell'energia elettrica ha notevolmente incrementato l'esposizione ai campi elettromagnetici della popolazione. Era naturale allora che nascesse la preoccupazione per i potenziali effetti negativi per la salute umana: il corpo umano, che è una macchina molto complessa, risente in vari modi delle radiazioni elettromagnetiche. Le interazioni tra campi magnetici a bassa frequenza e corpo umano sono state oggetto di studi ed alcuni effetti biologici sono noti, mentre altri sono ancora da dimostrare sperimentalmente. Prima, però, di descrivere in che modo il corpo umano reagisca in presenza di campi elettrici e magnetici, è opportuno sottolineare che, come suggerito dalle norme vigenti in materia, quando si parla di esposizione a campi elettromagnetici è necessario distinguere tra esposizione di tipo 'residenziale' e di tipo 'occupazionale', ossia relativa ad individui che sono professionalmente esposti a campi elettromagnetici.

Le attuali conoscenze sui principali tipi di interazione tra campi (elettrici e magnetici) e tessuti biologici sono state acquisite non solo a partire dai risultati ottenuti da studi di laboratorio, ma anche da studi epidemiologici. Sono noti i meccanismi biologici attraverso i quali i campi magnetici a 50 Hz, di intensità maggiore di 500 mT, producono effetti biologici, ma questi non sono rilevabili quando l'intensità è minore di 50 mT o, comunque, la loro interazione col corpo umano è molto debole, almeno ai livelli tipici di esposizione. Infatti, per le intensità di campo tipiche di esposizioni residenziali o occupazionali, quindi inferiori a 50 mT, nessun effetto biologico è stato definito 'riproducibile', ossia in nessun caso più di un laboratorio ha raggiunto gli stessi risultati: molto spesso, quando si è tentato di ripetere gli studi già pubblicati, non si è raggiunto lo stesso effetto, soprattutto perché possono essere molto diverse le caratteristiche dei materiali biologici e le modalità di esposizione, rendendo così molto difficile qualsiasi tipo di confronto o valutazione.

Ogni effetto biologico derivante da un'esposizione a campi a basse frequenze è dovuto essenzialmente alle correnti indotte dal campo magnetico nel corpo: queste correnti, indotte nei tessuti umani, possono produrre calore (effetto termico), ma, a causa della piccola quantità di energia trasferita, il calore generato non produce alcun significativo effetto ed è controllato efficacemente dai normali meccanismi di termoregolazione dell'organismo.

La termoregolazione è un meccanismo fisiologico mediante il quale l'organismo reagisce ad eventuali variazioni di energia termica, in modo da mantenere la propria temperatura interna in un opportuno intervallo. L'attivazione di tale sistema di regolazione può essere indotta da diversi fattori ambientali (variazioni di temperatura, di umidità, e così via), ma anche dall'esposizione a campi elettrici e magnetici. Gli animali a sangue caldo (omeotermi) sono dotati del sistema di

regolazione involontario basato sull'equilibrio di due fenomeni: la produzione e la dispersione di calore. Nell'uomo, la maggior parte degli organi vitali lavora, in condizioni normali, alla temperatura pressoché costante di 37 °C; in ogni caso, per valori compresi tra i 35.5 °C ed i 40 °C non si rilevano danni all'organismo. Al di fuori dei limiti dell'intervallo considerato, il corpo è in condizioni di estrema vulnerabilità: a basse temperature si corre il rischio di congelamento, alle alte la coagulazione di alcune proteine.

Le correnti indotte nei tessuti umani sono, in generale, di intensità minori di quelle fisiologicamente presenti soprattutto nel sistema nervoso periferico e nel cervello, data la natura 'elettrica' delle attività da essi svolte e facilmente rilevabili ad esempio tramite un elettroencefalogramma. Anche se i campi a frequenze industriali dovessero presentare un contenuto armonico a frequenze superiori, inducendo correnti più elevate, esse sono in ogni caso troppo basse per poter essere considerate pericolose.

• **Magnetoterapia**

La magnetoterapia costituisce un'applicazione terapeutica dei campi alle basse frequenze: le apparecchiature per magnetoterapia operano, infatti, nell'intervallo di frequenze compreso tra 0 Hz e 100 Hz e generano un campo magnetico che può arrivare fino a 10 mT. Gli effetti biologici sono imputabili alle correnti elettriche indotte, cui essi danno luogo, ed alla loro distribuzione. Sembra che tutti i tessuti biologici (tessuto osseo, tessuti molli, e così via) manifestino potenziali elettrici indotti da variazioni del flusso magnetico e che la loro morfologia dipenda oltre che dall'andamento del campo, anche dalle caratteristiche proprie del tessuto in esame. Vari ricercatori hanno dimostrato un netto incremento della radiazione termica emessa dal corpo umano esposto ai campi magnetici a bassa frequenza. L'incremento, imputabile alla vasodilatazione indotta nel circolo periferico, è accompagnato da un rilevante aumento della pressione di ossigeno nel sangue: l'effetto biologico più rilevante, e costantemente presente, appare essere uno spiccato incremento della vascolarizzazione dei tessuti e della pressione dell'ossigeno nel sangue, in totale assenza di effetti termici macroscopici. Dal punto di vista clinico sono stati constatati vari effetti dei campi alle basse frequenze, tra i quali un'azione antiedematosa ed antalgica. La patologia finora esplorata comprende vari settori, tra cui in particolare quelli ortopedico e traumatologico (pseudoartrosi e ritardi di consolidazione), vascolare, reumatologico, fisiatrico.

L'applicazione sfrutta il potente effetto antinfiammatorio dei campi magnetici a bassa frequenza, nel trattamento delle forme dolorose inerenti le patologie in forma cronica (artrosi). Nel trattamento delle fratture, un'ampia casistica ha rilevato, anche se non nella totalità dei casi trattati, un'evidente accelerazione della riparazione di tessuto osseo, tessuti molli sovrastanti e lesioni cutanee associate,

nonché un benefico effetto sulle strutture cartilaginee, fortemente condizionate dalla diffusione dell'ossigeno.

L'azione dei campi magnetici alle basse frequenze non può essere confrontabile con quella delle altre terapie fisiche, dato che il paziente non ha alcuna percezione diretta dell'applicazione del campo. Assume, inoltre, un ruolo di preminente importanza la durata dell'esposizione al campo, che va considerata in rapporto all'età del soggetto ed alla velocità dei suoi ritmi biologici (proliferativi, differenziativi e funzionali). L'azione è graduale e l'efficacia del trattamento può pienamente manifestarsi in tempi lunghi. Questo tipo di trattamento è da preferirsi nelle patologie croniche, ma anche il trauma acuto può trarne vantaggio, con una riduzione dei tempi di recupero.

• Effetti sul sistema immunitario

Gli effetti sul sistema immunitario imputabili all'esposizione ai campi elettrici e magnetici sono stati oggetto di studio nei primi anni settanta, quando si stava studiando l'ipotesi di un eventuale ruolo del sistema immunitario nello sviluppo di alcuni tipi di tumori e, quindi, nel caso tale ipotesi si fosse rivelata fondata, un danno al sistema immunitario avrebbe effettivamente potuto provocare un tumore. In seguito, dopo che un numero considerevole di studi dimostrò che questa ipotesi non poteva essere ritenuta valida, essa fu abbandonata. In particolare, non è stato provato alcun effetto sul sistema immunitario per intensità del campo magnetico inferiori a 200 mT.

Da studi *in vitro* si è visto che, a livello molecolare, il campo magnetico può esercitare delle forze su molecole cariche elettricamente: sotto l'azione di queste forze le strutture molecolari, quali i biopolimeri, possono muoversi o deformarsi, le molecole dipolari possono orientarsi. Anche strutture più 'evolute' come quelle cellulari possono risentire degli effetti di tali forze, ma essendo il tessuto biologico di tipo 'non magnetico', questo tipo di interazione risulta molto debole. Tali interazioni modificano l'afflusso di ioni calcio nella membrana cellulare e la concentrazione intracellulare. Un incremento di tale afflusso potrebbe modificare la velocità di metabolismo di alcuni tessuti e la regolazione di molti processi biologici.

• Effetti genotossici

Alcuni studiosi hanno ipotizzato l'esistenza di altri meccanismi, oltre alle correnti indotte, attraverso i quali i campi elettrici e magnetici possano interagire con l'organismo umano. In particolare, è stato studiato il possibile effetto dei campi a bassa frequenza sulla molecola del DNA, visto che era stato accertato come le radiazioni ionizzanti potessero intervenire sulla struttura del DNA, esercitando un'azione mutagena, che portava allo sviluppo di un tumore. Per poter provocare mutazioni, per effetto fotoelettrico, le radiazioni elettromagnetiche devono avere

l'energia necessaria per rompere i legami chimici del materiale genetico. Ma, mentre questo è certamente vero per le radiazioni ionizzanti, da studi di laboratorio effettuati, non è venuta alla luce alcuna evidenza circa l'alterazione della struttura del DNA per effetto dei campi a bassa frequenza. Pur non provocando mutazioni genetiche, un agente può 'provocare' un tumore anche attraverso la cosiddetta *azione epigenetica*, ossia favorendo la crescita e lo sviluppo di cellule che hanno subito una mutazione per effetto di altre cause. Nel caso di esposizione a campi di bassa frequenza, attraverso studi effettuati su colture cellulari, in cui il DNA aveva già subito un'alterazione di tipo tumorale, o su animali, in genere ratti, geneticamente predisposti a sviluppare tumori, si è riscontrato un aumento significativo nello sviluppo dei tumori, dopo una prolungata e considerevole esposizione a campi elettrici e magnetici a basse frequenze. In altri studi, effettuati su animali sani, non si è però notato un aumento statisticamente rilevante. Le condizioni, l'entità, i tempi dell'esposizione utilizzati nei vari esperimenti di laboratorio sulle colture e sulle cavie sono estremamente diversi e non riproducono le effettive condizioni di esposizione a cui è soggetta la popolazione. Gli studi vengono effettuati a livelli di esposizione molto più elevati rispetto a quelli normalmente misurati nell'ambiente: si scelgono queste condizioni sperimentali per massimizzare la capacità di un ricercatore di trovare un effetto, se mai vi sia, per un'esposizione nota e definita.

• **L'ipotesi 'melatonina'**

La melatonina è un ormone secreto dalla ghiandola pineale, posta nel cervello. La quantità della produzione di tale ormone è regolato dalla durata della luce del giorno, in quanto la luce blocca la generazione che raggiunge i livelli più alti durante le ore notturne. Questo composto chimico è stato a lungo oggetto di studio per la sua presunta capacità di agente antitumorale, attraverso l'azione inibitoria esercitata dagli estrogeni. Ma al riguardo i risultati sperimentali sono stati contrastanti. Quello che si è evidenziato con certezza è che, in pazienti affetti da tumore, in particolare da tumore alla mammella, i livelli di melatonina prodotta erano inferiori alla norma. Inoltre, si è notato che la melatonina, come ormone, attraverso la sua azione biochimica, poteva favorire lo sviluppo di tumori alla mammella in cellule già malate, ma non ci sono evidenze sperimentali che dimostrino come la melatonina possa intervenire nello sviluppo di tumori spontanei. Secondo un'ipotesi interpretativa, a bassi livelli di melatonina sono associati incrementi di rischio cancerogeno con meccanismi probabilmente diversi (diminuzione della risposta immunitaria, innalzamento dei livelli di ormoni gonadici con effetti sui tumori della mammella o della prostata, amplificazione del danno ossidativo del DNA in presenza di una diminuzione dei livelli di melatonina, in funzione delle forti proprietà antiossidanti di tale ormone).

A tali ipotesi sulla base della relazione tra il tumore e il livello di melatonina si collegano gli studi effettuati negli ultimi dieci anni che hanno dimostrato, con sufficiente evidenza, come l'esposizione a campi elettrici e magnetici alteri notevolmente e ritardi le secrezioni di melatonina durante le ore notturne, anche se il meccanismo biologico alla base di questa interazione non è stato ancora ben definito. Per questi motivi l'ipotesi 'melatonina' è ritenuta tra le prove biologiche più evidenti dell'associazione tra campi elettrici e magnetici e tumori.

• **Effetti sanitari ed indagini epidemiologiche**

Abbiamo già avuto modo di sottolineare che numerose sono le modalità attraverso le quali il corpo umano interagisce con i campi elettrici e magnetici. Ma l'esistenza di un effetto biologico noto non è necessariamente indice di un processo patologico che porti a modificazioni dannose per la salute umana. Mentre l'effetto biologico si ha quando in seguito ad un'esposizione ai campi si osserva in un sistema biologico una reazione fisiologica di entità rilevabile, l'effetto sanitario si ha invece quando l'organismo non è in grado di compensare l'effetto biologico che, per tale motivo, diventa dannoso per la salute. Gli effetti sulla salute umana sono generalmente distinti tra effetti acuti ed effetti cronici.

Gli **effetti acuti** sono quelli immediati in quanto si verificano appena si è esposti ad un campo elettromagnetico e cessano al termine dell'esposizione, e sono oggettivi, ossia rilevabili da tutti gli individui senza eccezioni. Sono in pratica quelli prodotti dalle correnti indotte nei tessuti degli organismi esposti. Attraverso studi effettuati su soggetti sani si sono potuti individuare dei livelli a cui intervengono questi effetti acuti. Ad esempio, in seguito all'esposizione ad un campo magnetico di 16 mT, a cui corrisponde una densità di corrente indotta pari a 0.1 A/m^2 , si è notata la comparsa di interferenze nella percezione visiva sotto forma di lampi luminosi. Per livelli più elevati di correnti indotte si possono avere contrazioni muscolari, extrasistole cardiache, fino al riscaldamento dei tessuti, ma questo per campi di 1.6 T e densità di corrente pari a 10 A/m^2 .

Gli **effetti cronici**, ossia quelli derivati da esposizioni ripetute e prolungate, sono oggetto di studio da diversi anni, con centinaia di documenti prodotti e risultati quasi sempre contrastanti. Questo tipo di effetti a lungo termine viene indagato attraverso studi di tipo epidemiologico che cercano di scoprire le associazioni tra effetti sulla salute ed esposizione ad un presunto agente patogeno. I principali metodi di indagine epidemiologica si basano su studi descrittivi semplici, studi osservazionali e studi sperimentali. Gli studi descrittivi semplici si basano sull'utilizzo di dati già esistenti (ISTAT, censimenti). Negli studi osservazionali il ricercatore utilizza dati ricavati da anamnesi, esami di laboratorio oppure interviste, ma non interferisce con trattamenti oppure eliminazione dei fattori di rischio; tali studi si differenziano dai descrittivi semplici perché generalmente non

si basano sull'intera popolazione, ma su un sottogruppo o campione di essa. Negli studi sperimentali il ricercatore, invece, compie interventi diretti, manipola cioè le condizioni della ricerca applicando strategie terapeutiche o preventive a due o più gruppi di soggetti.

I più utilizzati sono gli studi osservazionali, e tra questi lo studio a caso-controllo e lo studio a coorte.

Lo studio a caso-controllo è una rilevazione retrospettiva di dati ricavati da due gruppi di individui: i casi ed i controlli. I casi sono costituiti da un gruppo di soggetti malati oppure affetti da particolari condizioni; i controlli sono un gruppo di soggetti, con le stesse caratteristiche dei casi, ma che differiscono da questi ultimi per il fatto di non essere malati. Per la scelta dei casi si fa riferimento a tutti i soggetti colpiti dalla malattia considerata in un particolare sottogruppo di popolazione, oppure in un campione rappresentativo di essa. La scelta dei controlli viene effettuata o seguendo il criterio dell'appaiamento (per ogni caso si prende un soggetto con caratteristiche simili: età, sesso, lavoro, condizione sociale, luogo di residenza), o, più in generale, scegliendo un gruppo quanto più omogeneo possibile a quello da cui provengono i casi.

Negli studi a coorte uno o più gruppi di soggetti vengono seguiti nel tempo per valutare l'azione di un sospetto fattore di rischio. Sono eseguite verifiche periodiche per un lasso di tempo tale da permettere la valutazione dell'incidenza della malattia, sia negli esposti che nei soggetti non esposti.

Uno studio epidemiologico, ben impostato e ben condotto, implica l'identificazione di un campione di popolazione da studiare, la definizione del tipo di esposizione da considerare, la descrizione del periodo in cui l'esposizione è significativa e la scelta del tipo di studio da condurre. Tutti questi fattori influenzano la qualità di tale tipo di studi e, di conseguenza, anche la validità dei risultati trovati.

Gli indicatori utilizzati negli studi epidemiologici sull'associazione tra l'esposizione residenziale a campi magnetici e rischi di tumori hanno un certo grado di imprecisione ed inaccuratezza rispetto al riferimento ideale rappresentato dall'esposizione vera di lungo periodo. La procedura *wire code* è basata sulla configurazione di corrente delle linee elettriche e sulle loro distanze dalle abitazioni. In un primo momento, la classificazione introdotta era di tipo dicotomico (alte e basse configurazioni), solo successivamente fu estesa a quattro categorie: poli terminali; configurazioni normalmente basse; configurazioni normalmente elevate; configurazioni molto elevate.

Per valutare l'esposizione pregressa e di lunga durata, si procede alla stima dei valori del campo magnetico in condizioni di massimo carico, per mezzo di un modello di predizione che tiene in conto l'altezza dei tralicci, le distanze tra i tralicci, la distanza tra i cavi, le posizioni relative dei cavi, la distanza delle abitazioni dalle linee ed il carico medio annuale di ciascuna linea. Nelle ricerche più

recenti sono stati misurati i livelli dei campi elettrici e magnetici nelle case (al momento dell'effettuazione dell'indagine) ed è stata, inoltre, stimata la loro intensità nel corso del tempo, avvalendosi dei dati storici sul carico delle linee, tenendo conto sia della configurazione degli elettrodotti, sia della loro distanza dalle case.

Si fa risalire l'inizio delle ricerche sugli effetti a lungo termine dovuti ai campi elettromagnetici alla pubblicazione, nel 1979, dello studio effettuato da Nancy Wertheimer, epidemiologa, insieme a Ed Leeper, fisico. Nel lavoro, dal titolo *Electrical wiring configurations and childhood cancer*, essi dimostrarono, o credettero di dimostrare, l'esistenza di una relazione causale tra esposizione a campi elettromagnetici ed insorgenza di tumori, analizzando il caso di 344 bambini morti di leucemia tra il 1950 ed il 1977 nella contea di Denver in Colorado, la maggior parte dei quali abitava in prossimità di centrali elettriche o linee ad alta tensione. Il loro studio, in cui come indice di esposizione veniva utilizzato il wire-code, è stato più volte smentito ed attaccato per i criteri di indagine utilizzati. Nel 1980 l'*American Journal of Epidemiology*, la stessa importantissima rivista che aveva pubblicato il lavoro di Wertheimer e Leeper, pubblicò una ricerca che, analizzando i casi di leucemia verificatisi a Rhode Island tra il 1964 e il 1978 e utilizzando i loro stessi criteri, non aveva confermato l'associazione tra campi elettromagnetici e casi di leucemia. In seguito, nella valutazione dei diversi studi effettuati, sorse il problema di individuare il metodo più opportuno per misurare l'esposizione. Nel 1986, L. Tomeius condusse uno studio di tipo caso-controllo sui tumori infantili diagnosticati nella contea di Stoccolma, tra il 1958 e il 1973, usando come indice di esposizione la vicinanza a linee elettriche da 6 kV a 200 kV, ma anche a sottostazioni, trasformatori o ferrovie elettriche e metropolitane. Effettuò, inoltre, misure di campo magnetico all'ingresso delle abitazioni, concludendo che i casi di tumore, tra il campione in esame, erano significativamente più frequenti in vicinanza (meno di 150 metri) delle linee elettriche.

Savitz effettuò uno studio, di tipo caso-controllo, sulla leucemia infantile e tumori cerebrali nell'area di Denver tra il 1976 ed il 1983, utilizzando come indice di esposizione sia misure dirette dei campi magnetici nelle case sia indici di tipo wire-code. Pur esaminando la stessa area geografica indagata da Wertheimer e Leeper, non c'erano problemi di sovrapposizione tra i due casi, in quanto erano diversi i periodi presi in considerazione. I casi considerati furono i 356 residenti di Denver, con età compresa tra 0 e 14 anni, ai quali era stato diagnosticato un tumore. L'esposizione fu valutata per mezzo di misure locali di campo elettrico e magnetico, e mediante wire-code, per stimare i livelli medi di campo magnetico a lungo termine. Savitz rilevò che, per i residenti nelle case con livelli di induzione magnetica superiore a 0.2 mT, si determinava un rapporto di rischio fino a 1.4 per tutti i tipi di tumore, e più alto per leucemie, linfomi e sarcomi dei tessuti molli.

Benché tale rapporto di rischio fosse inferiore a quello calcolato da Wertheimer e Leeper, la maggior accuratezza con la quale fu condotto questo secondo studio tolse ogni dubbio sull'attendibilità del lavoro e riaccese il dibattito sulla possibile correlazione tra campi a basse frequenze e cancro.

Un importante studio è stato effettuato in Svezia dagli epidemiologici M. Feychting e A. Ahlbom dello Stockholm's Karolinska Institute, su 400.000 persone di età superiore ai 15 anni, che avessero abitato per almeno un anno, tra il 1960 e il 1985, a meno di trecento metri da linee ad alta tensione. Dal Registro Tumori nazionali essi identificarono 325 casi di leucemia e 223 casi di tumore cerebrale. Come indicatori di esposizione furono utilizzate le stime storiche di campo magnetico all'interno delle abitazioni, basate sulla distanza dalle linee e sul carico, misure dirette del campo magnetico e la distanza dalle linee. Non venne, però, trovata alcuna associazione tra esposizione a campi magnetici generati da elettrodotti e incidenza di leucemia linfatica e tumori cerebrali. Per la leucemia mieloide, invece, lo studio fornisce un'associazione abbastanza evidente tra esposizione ed insorgenza di questo tipo di tumori, con un fattore di rischio pari a 2.7 per esposizioni superiori a 0.2 mT, e di 3.8 per esposizioni superiori a 0.3 mT.

Uno dei limiti fondamentali dei lavori citati, però, risiede nel fatto che nessuno di questi aveva trovato una relazione consistente tra il livello di esposizione ai campi a ELF ed il tasso di incidenza del cancro (ovvero una relazione dose-risposta).

Altro problema è quello di eliminare tutti i possibili fattori confondenti, tra cui gli altri fattori potenzialmente cancerogeni, che possono incrementare o diminuire il rischio di contrarre la malattia che si sta studiando. Mentre la maggioranza degli studi sui bambini ha evidenziato una correlazione positiva tra tumori ed esposizione a campi a basse frequenze, gli studi relativi agli adulti che vivono in prossimità di linee elettriche hanno dato, quasi tutti, esito negativo. Una possibile spiegazione di questo risultato potrebbe consistere nella difficoltà di separare, negli adulti, l'esposizione a questi campi dagli altri fattori cancerogeni (fumo, agenti chimici, inquinamento). Si pensa, infatti, che tali fattori, di indubbia cancerogenicità, nascondano negli adulti gli effetti dovuti ai campi a basse frequenze. Purtroppo, per alcune forme tumorali, come la leucemia infantile e la leucemia linfocitica cronica, sono note solo poche cause, per cui è difficile identificare potenziali agenti confondenti ed escluderli, a priori, dall'indagine epidemiologica.

Ma forse è proprio l'approccio di tipo epidemiologico, finora utilizzato in queste ricerche, che non permette di ottenere risultati chiari e definitivi. Le evidenze epidemiologiche a volte riescono a dimostrare un'associazione molto forte tra agenti e patologia, come avvenne nel caso dell'associazione tra cancro al polmone e fumo di sigaretta, scoperta dall'epidemiologo Richard Doll nel 1952, ma risultano di efficacia limitata quando occorre analizzare fattori di rischio che hanno effetti minimi sulla salute umana. Comunque, è soprattutto la mancanza di una

giustificazione biologica che rende gli studi epidemiologici finora condotti poco credibili e privi di contraddizioni.

Nonostante i limiti mostrati dall'approccio epidemiologico, dato l'elevato numero di persone esposte ai campi elettromagnetici, anche un aumento molto limitato del rischio relativo, evidenziato da alcuni studi, deve essere comunque tenuto in considerazione. Un tentativo ben riuscito di rivedere e mettere ordine nella vasta letteratura sui possibili rischi per la salute dovuti all'esposizione a campi elettrici e magnetici è stato effettuato ad opera del *National Research Council*, il settore della National Academy of Sciences dedicato alle ricerche. Nel 1991, su incarico del Congresso degli Stati Uniti, il National Research Council formò una Commissione di epidemiologi, biologi, chimici e fisici, che basandosi su una valutazione complessiva degli studi pubblicati circa gli effetti dei campi elettrici e magnetici alle basse frequenze, nel 1996, concluse che l'insieme delle prove esaminate non dimostravano che i campi in esame dovessero essere considerati pericolosi per la salute umana. Inoltre, ai livelli di esposizione a cui è normalmente esposta la popolazione, i campi possono produrre effetti biologici, ma questi non costituiscono un pericolo per la salute. Anche se in diversi studi è stata dimostrata una limitata evidenza dell'associazione tra leucemia infantile e vicinanza alle linee elettriche, non è stato identificato il fattore di causa responsabile di questa associazione.

Nell'ambito dell'Energy Policy Act, il NIEHS (*National Institute of Environmental Health Sciences*) ha diretto un programma di ricerca con lo scopo di determinare se l'esposizione a campi elettrici e magnetici prodotti dalla generazione, trasmissione e l'uso dell'energia elettrica produca effetti sulla salute umana e di raccogliere organizzare e divulgare informazioni scientificamente valide su possibili effetti sanitari, modalità e livelli di esposizione, tecniche di misura, metodi di valutazione e controllo delle esposizioni.

Il programma, EMF-RAPID (*Electric and Magnetic Fields Research and Public Information Dissemination Program*), si è concluso con la pubblicazione di un rapporto, 'Health Effects from Exposure to Power-Line Frequency Electric and Magnetic Fields', presentato al Congresso degli Stati Uniti. Il NIEHS, durante la preparazione di tale rapporto, ha organizzato un gruppo di lavoro internazionale per una revisione dei risultati della ricerca, che nel rapporto 'Assessment of Health Effects from Exposure to Power-Line Frequency Electric and Magnetic Fields: Working Group Report, National Institutes of Health' ha valutato gli effetti dei campi a bassa frequenza per la salute umana secondo i criteri dell'International Agency for Research on Cancer (IARC).

Lo IARC utilizza quattro classi per definire un agente cancerogeno per l'uomo, come illustrato nella tabella che segue. Il gruppo di lavoro del NIEHS ha concluso all'unanimità che i campi a basse frequenze non erano classificabili nel Gruppo 2A, come probabilmente cancerogeni, né tanto meno nel Gruppo 1, come agente

cancerogeno accertato, mentre la maggioranza del gruppo di lavoro, 19 esperti su 28, ha concluso che i campi a basse frequenze debbano essere classificati nel Gruppo 2B, ossia come possibili agenti cancerogeni per l'uomo. La classificazione si basa sulla solidità dell'evidenza scientifica e non su quanto sia elevato il suo rischio che possano causare il cancro, per cui, in base ai risultati disponibili, non è possibile escludere tale possibilità. Ciò è evidenziato soprattutto dalla coerenza dimostrata dagli studi epidemiologici che associano la residenza in prossimità di elettrodotti all'aumento di rischio di leucemia infantile.

International Agency for Research on Cancer (IARC) Classificazione degli agenti cancerogeni per l'uomo	
Gruppo	Requisiti richiesti per la classificazione
Gruppo 1: l'agente è cancerogeno per gli uomini	Sufficienti evidenze epidemiologiche
Gruppo 2A: l'agente è probabilmente cancerogeno per gli uomini	Evidenze epidemiologiche limitate o inadeguate e sufficienti evidenze da esperimenti su animali
Gruppo 2B: l'agente è un possibile cancerogeno per gli uomini	Evidenze epidemiologiche limitate o inadeguate e evidenze da esperimenti su animali limitate o inadeguate
Gruppo 3: l'agente non è classificabile come cancerogeno per gli uomini	Evidenze epidemiologiche inadeguate e evidenze da esperimenti su animali limitate o inadeguate <i>oppure</i> non classificabile negli altri gruppi
Gruppo 4: l'agente è probabilmente non cancerogeno per gli uomini	Assenza di cancerogenicità sia negli uomini che negli animali <i>oppure</i> evidenze epidemiologiche inadeguate e assenza di cancerogenicità negli animali

In Italia, l'Istituto Superiore di Sanità ha presentato, nel 1998, un rapporto in cui viene passata in rassegna la letteratura relativa agli studi sull'epidemiologia dei tumori nei soggetti esposti a campi a 50 Hz. I risultati degli studi esaminati in tale rapporto suggeriscono un'associazione tra esposizione residenziale a campi magnetici a 50 Hz e la leucemia infantile, anche in assenza di un nesso di causalità dimostrato, per le limitazioni degli studi e per la mancanza di controllo sui fattori confondenti, e soprattutto per l'assenza di un chiaro meccanismo biologico che

dimostri la cancerogenicità dei campi magnetici a 50 Hz. Già nel precedente rapporto ISTISAN del 1995, la cancerogenicità dei campi magnetici era stata definita come *probabile* (gruppo 2A della classificazione IARC) e non *possibile* (gruppo 2B), dove le differenti definizioni dipendono dall'importanza attribuita ai criteri di riproducibilità e di plausibilità biologica. Per cui, se si privilegia la riproducibilità, in base agli studi sulla leucemia infantile, i campi magnetici a 50 Hz ricadono nel gruppo 2A, se invece si ritiene più importante la comprensione dei meccanismi cellulari e molecolari collegati all'esposizione ai campi magnetici, allora la classificazione è nel gruppo 2B. In entrambi i casi, non sono condivisibili le posizioni di chi sostiene l'assenza di effetti a lungo termine, né quella di chi considera certa e dimostrata la cancerogenicità dei campi magnetici a 50 Hz.

• Conclusioni

I risultati sui principali effetti sanitari, indagati da studi di laboratorio *in vivo* e *in vitro*, come gli effetti genotossici legati a possibili mutazioni nel materiale genetico o attraverso l'azione epigenetica nello sviluppo e la crescita di cellule con alterazioni tumorali, indotte da altre cause, a causa dell'irrilevanza statistica, non sono ritenuti significativi per considerare valida l'associazione tra campi magnetici a 50 Hz e tali effetti. La controversa ipotesi 'melatonina' viene, invece, ritenuta una prova biologica plausibile, anche se non è stato dimostrato il meccanismo biologico alla base dell'interazione tra l'esposizione ai campi magnetici e la secrezione di questo ormone.

Dagli studi epidemiologici si è evidenziata la rilevanza eziologica (l'eziologia ricerca e studia le cause delle malattie) delle esposizioni al campo magnetico a bassa frequenza nell'insorgenza di alcuni tipi di tumore, senza però che sia stato dimostrato un nesso causale. Sono, perciò, necessari nuovi studi, che adottino protocolli robusti e comuni, in modo da permettere la comparazione dei risultati provenienti da studi epidemiologici diversi. Ciò non deve servire per rimandare all'infinito l'adozione di misure cautelative, soprattutto riguardo alle nuove installazioni, e, in tal senso, nei recentissimi provvedimenti normativi italiani sono stati tenuti in conto le evidenze, risultanti da numerosi studi epidemiologici, a favore di un'associazione tra leucemia infantile ed esposizioni croniche a campo magnetico a 50 Hz, privilegiando, nelle azioni di prevenzione, soprattutto gli spazi destinati all'infanzia.

3.8 Simboli grafici per interruttori, contattori e sezionatori

Il normale esercizio degli impianti prevede, come abbiamo discusso in questo capitolo e come porremo in evidenza in quelli che seguono, la necessità di inserire o disinserire carichi o sezioni di rete. Gli apparecchi di manovra utilizzati per questo

scopo presentano caratteristiche funzionali diverse che dipendono dalle condizioni operative cui devono far fronte.

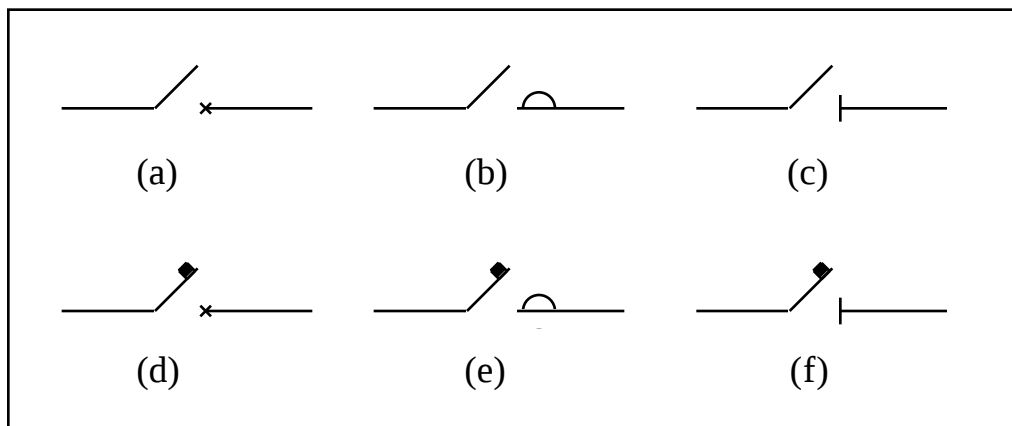


Figura 3.40: simboli grafici per interruttori, contattori e sezionatori.

In Figura 3.40 abbiamo riportato i simboli relativi a interruttori (a), contattori (b) e sezionatori (c), prescritti dalle norme (CEI 3 - 19); le figure (d), (e), (f) rappresentano la versione automatica, il cui funzionamento è asservito all'intervento di un sistema di protezione, tipicamente con sensori o relè.

3.9 Sala per prove in Alta Tensione

In questo paragrafo, curato dal prof. Giovanni Borrelli, viene descritta la sala per prove in Alta Tensione, indicata semplicemente come sala AT, del Dipartimento di Ingegneria Elettrica (DIEL) dell'Università Federico II di Napoli.

La sala AT del DIEL è costituita da un insieme di apparecchiature, macchine, apparati di regolazione e comando, sistemi di misure e sistemi di sicurezza tale da consentire l'effettuazione di prove dielettriche di tenuta e/o disruptive, a vuoto, sotto pioggia ed in vasca d'olio minerale. Tali prove possono essere effettuate con tensioni sinusoidali e/o con tensioni ad impulso.

La sala AT misura in pianta 30 x 20 m²; la sua altezza, all'intradosso delle travi, è di 17 m. Gli impianti più importanti presenti nella sala vengono, ora, passati in rapida rassegna.

A) Impianto per prove a 50 Hz, con tensioni fino a 100 kV

L'impianto è costituito da un trasformatore per alte tensioni, alimentato dalla rete attraverso un trasformatore monofase regolabile. Il trasformatore monofase regolabile presenta le seguenti caratteristiche:

- tensione nominale primaria di 400 V;

- tensione secondaria, regolabile con continuità da 0 V a 500 V, facendo scorrere un contatto mobile sul secondario per mezzo di un motore;
- potenza nominale di 50 kVA;
- servizio continuativo;
- raffreddamento in aria, autoventilante;
- grado di protezione, IP00.

Il trasformatore per alte tensioni ha quattro avvolgimenti primari identici ed un solo avvolgimento secondario. A seconda della modalità di collegamento dei quattro avvolgimenti primari, il trasformatore per alte tensioni può presentare, tra i morsetti secondari, tensioni variabili tra 0 V e 25 kV, 50 kV e 100 kV. La regolazione della tensione secondaria di questo trasformatore è ottenuta con continuità a mezzo di un motore che, come detto, modifica la posizione del contatto mobile sul secondario del trasformatore monofase regolabile.

Questa tipologia di collegamento consente una migliore risoluzione nella regolazione della tensione secondaria del trasformatore per alte tensioni, quando esso è predisposto per la tensione nominale secondaria di 50 kV, ed una risoluzione ancora più grande quando esso è predisposto per la tensione nominale secondaria di 25 kV.

L'impianto può essere impiegato per effettuare prove dielettriche di tenuta e/o disruptive, a secco, sotto pioggia ed in vasca d'olio, su macchine, apparecchiature di protezione e di manovra, apparecchi utilizzatori, aventi tensioni nominali fino a 30 kV.

L'oggetto in prova è connesso ai morsetti secondari del trasformatore per alte tensioni ed il valore desiderato di tensione applicata all'oggetto in prova è regolato facendo scorrere il contatto mobile sul secondario del trasformatore monofase regolabile; la velocità di regolazione della tensione è, se del caso, fissata dalle Norme tecniche specifiche (CEI, IEC, CEI-EN, VDE). Se deve essere effettuata una prova di tenuta, raggiunto il valore di tensione di prova lo si mantiene per il tempo fissato dalle Norme e poi si riporta la tensione a zero il più rapidamente possibile; se si verifica una scarica la prova ha avuto esito negativo. Se, invece, deve essere effettuata una prova disruptiva, si registra il valore di tensione alla quale si verifica la scarica.

B) Impianto per prove con tensioni sinusoidali, regolabili in frequenza

L'impianto consente di realizzare prove, di tenuta e/o disruptive, a secco e sotto pioggia, con tensioni sinusoidali fino a 1350 kV, con frequenza regolabile nei campi (16 ÷ 60) Hz e (100 ÷ 150) Hz.

Nella sala AT è presente solo il gruppo di trasformatori di prova, costituito da due trasformatori per alte tensioni, monofase in olio, identici e sovrapposti; ciascun

trasformatore può fornire al secondario una tensione sinusoidale regolabile fino a 675 kV. Tutte le altre apparecchiature elettriche che costituiscono questo impianto, assieme ai loro servizi ausiliari, sono poste in un'area dedicata del piano cantinato del DIEL.

L'impianto è alimentato dalla rete Enel a MT (10 kV) tramite un trasformatore trifase in olio da 630 kVA, 10/0.5 kV. Questo trasformatore alimenta, con l'interposizione di un raddrizzatore, un motore a corrente continua a velocità variabile da 300 kW. Sull'asse del motore a corrente continua sono calettati i rotori di due generatori sincroni da 800 kVA. Ciascun generatore può generare una tensione sinusoidale regolabile fino a 5 kV; i loro circuiti di eccitazione sono regolati da un dispositivo a tiristori. La frequenza della tensione di uno dei generatori è regolabile tra 16 Hz e 60 Hz, quella dell'altro tra 100 Hz e 150 Hz.

I primari dei due trasformatori per alte tensioni possono essere alimentati, da un generatore o dall'altro a secondo delle esigenze di prova, con tensione sinusoidale variabile con continuità fino a 5 kV; ai loro secondari si può di conseguenza ottenere una tensione sinusoidale variabile con continuità fino a 675 kV.

I due trasformatori per alte tensioni possono essere collegati tra loro in modo che il gruppo possa rendere disponibile, in alternativa, una tensione variabile fino a 1350 kV, erogando una corrente massima di 1 A per 15 minuti, oppure una tensione variabile fino a 675 kV, erogando una corrente massima di 2 A per 15 minuti. L'oggetto in prova è connesso ai morsetti del 'gruppo dei trasformatori di prova' ed il valore desiderato di tensione, alla frequenza desiderata, applicata all'oggetto in prova è raggiunto regolando, in valore efficace ed in frequenza, la tensione d'uscita di uno dei due generatori sincroni; la velocità di regolazione della tensione è, se del caso, fissata dalle Norme tecniche specifiche (CEI, IEC, CEI-EN, VDE). Se deve essere effettuata una prova di tenuta, raggiunto il valore di tensione di prova lo si mantiene per il tempo fissato dalle Norme e poi si riporta la tensione a zero il più rapidamente possibile; se si verifica una scarica la prova ha avuto esito negativo. Se, invece, deve essere effettuata una prova disruptiva, si registra il valore di tensione alla quale si verifica la scarica.

C) Generatore per prove ad impulso

Un generatore d'impulsi può essere impiegato per effettuare prove dielettriche di tenuta e/o disruptive, a secco e sotto pioggia, su macchine, apparecchiature di protezione e di manovra, apparecchi utilizzatori, con i seguenti impulsi:

- impulsi atmosferici (incluso quello normalizzato) ad onda piena e ad onda tronca;
- impulsi di manovra (incluso quello normalizzato) ad onda piena e ad onda tronca;

- impulsi con tempi di salita compresi tra qualche decina e parecchie centinaia di millisecondi e con tempi all'emivalore compresi tra parecchie centinaia e qualche migliaia di millisecondi, ad onda piena e ad onda tronca.

Le tensioni ad impulso sono tensioni transitorie unidirezionali che salgono rapidamente da zero a un valore massimo e decrescono, in genere molto più lentamente, verso lo zero, come mostrato in Figura 3.41, in cui si vede che il 'fronte di salita' è molto ripido, mentre il 'fronte di discesa' è piuttosto lento.

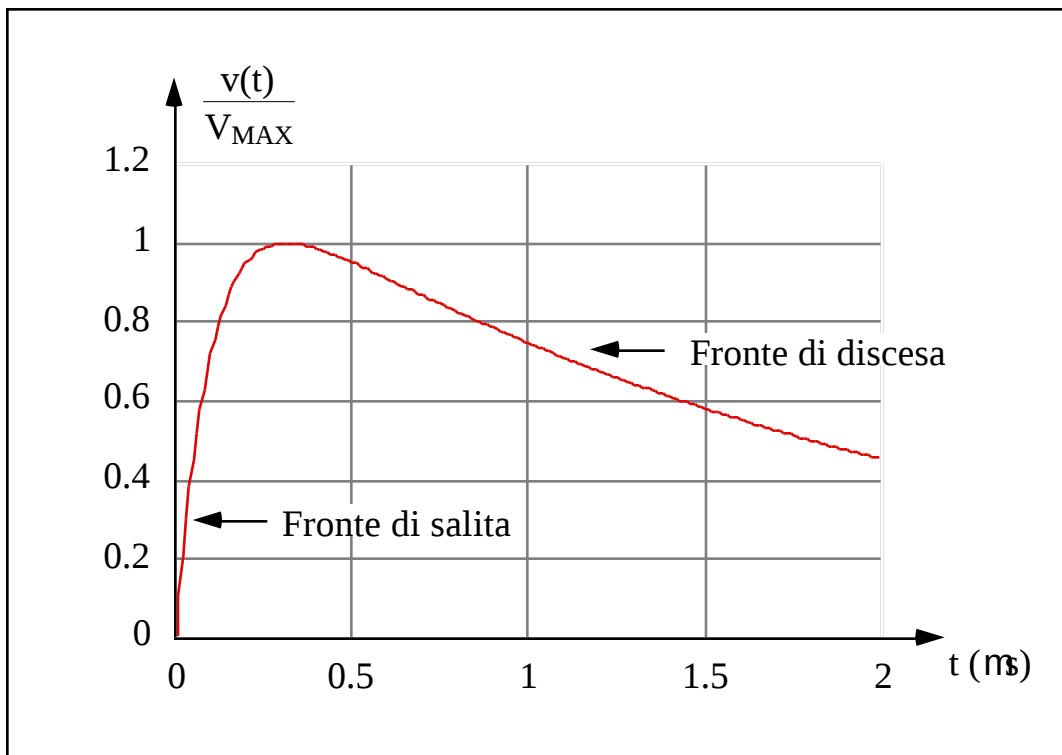


Figura 3.41: tipico andamento temporale di una tensione impulsiva.

Un impulso è, dunque, da intendersi come un transitorio aperiodico di tensione (oppure di corrente), applicato intenzionalmente, il quale solitamente cresce rapidamente fino al valore di cresta e, quindi, decresce più lentamente fino ad annullarsi. Un tale impulso, detto ad 'onda piena', viene spesso approssimato dalla somma di due esponenziali. Se l'impulso non evolve secondo l'andamento temporale tipico di Figura 3.41 fino ad annullarsi, ma è caratterizzato da un brusco crollo della tensione, praticamente a zero, che può avvenire sul fronte, sulla cresta o sulla coda, si parla invece di impulso 'ad onda tronca'.

Queste tensioni sono molto utili per studiare e simulare in laboratorio i fenomeni di scarica atmosferica legati alle fulminazioni, oppure per esaminare gli impulsi legati a manovre di apertura e chiusura degli interruttori sugli impianti, oppure gli impulsi generati da deflagrazioni nucleari.

Un'onda di tensione impulsiva è caratterizzata, anzitutto, dal suo valore massimo (o di cresta) V_{MAX} , che dipende dalle applicazioni che si vuole prendere in esame, ma che, in ogni caso, varia dalle decine di chilovolt a parecchi megavolt. Gli intervalli temporali di salita e di discesa vengono descritti dalla durata virtuale di fronte T_1 e dalla durata virtuale all'emivalore T_2 , due grandezze rigorosamente definite, per le prove ad alta tensione, dalla Norma CEI 42 - 4. Ad esempio, la durata virtuale di fronte T_1 di un impulso atmosferico è definita come 1.67 volte l'intervallo di tempo tra gli istanti in cui l'impulso raggiunge il 30% ed il 90% del valore di picco (se sono presenti oscillazioni sul fronte, questi punti devono essere presi sulla curva media tracciata su tali oscillazioni). La durata virtuale all'emivalore T_2 di un impulso atmosferico, invece, è l'intervallo di tempo tra l'origine e l'istante, sul fronte di discesa, in cui la tensione è diminuita a metà del valore di picco.

Valori tipici di queste durate sono riportati nella tabella che segue.

	Impulso atmosferico normalizzato	Impulso di manovra normalizzato
T_1	1.2 ms	250 ms
T_2	50 ms	2500 ms

Nella precedente tabella, con riferimento all'impulso di manovra normalizzato, con T_1 si intende il 'tempo alla cresta', definito come intervallo di tempo tra l'origine dell'impulso e l'istante in cui la tensione raggiunge il valore di cresta.

Si tenga, comunque, presente che la determinazione sperimentale di questi parametri non è cosa facile, essendo l'onda di tensione impulsiva mai molto nitida, nel senso che l'inizio dell'onda non è mai netto, il fronte è deformato da oscillazioni parassite, l'istante di massimo non è univocamente definito. La modalità di determinazione del valore massimo dipende, ovviamente, dalla frequenza delle oscillazioni parassite.

I generatori di tensioni impulsive sono richiesti per prove elettriche nelle varie fasi della vita di un materiale e/o componente sia in fase di ricerca e sviluppo, sia per controllare la variazione dei parametri caratteristici durante l'esercizio. La forma d'onda di tensione d'uscita deve essere indipendente dalla corrente erogata e dalla presenza di elementi non lineari; deve, inoltre, essere regolabile con finezza e gradualità per assicurare la necessaria precisione ed evitare sollecitazioni indesiderate.

I generatori di tensioni impulsive sono caratterizzati dalla potenza erogabile, determinata dalla tensione di prova e dalle caratteristiche dell'oggetto in prova (potenza reale oppure apparente richiesta) e che condiziona il dimensionamento del generatore, e dall'impedenza interna, determinata dalle condizioni transitorie; in particolare, per poter limitare le correnti di cortocircuito, essa non deve essere

troppo piccola, mentre non può essere troppo elevata a causa delle limitazioni delle correnti di prescarica.

Per comprendere come si possa generare una simile forma d'onda, si consideri il circuito mostrato in Figura 3.42, in cui viene mostrato un generatore impulsivo monostadio.

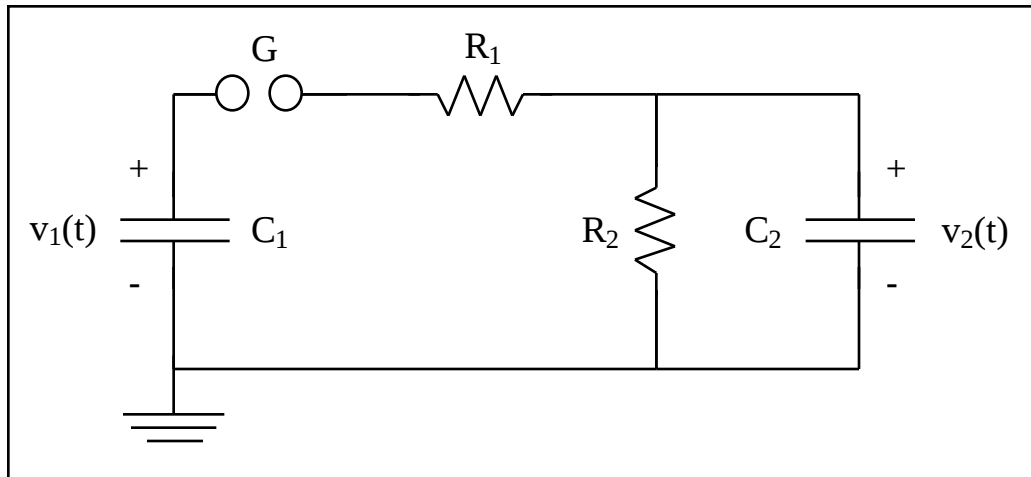


Figura 3.42: generatore impulsivo monostadio.

Lo spinterometro G, presente nello schema circuitale, è uno strumento costituito da una coppia di elettrodi posti affacciati, a distanza regolare che possono essere di forma diversa, fra i quali si fa scoccare una scintilla; esso serve soltanto ad innescare il fenomeno di scarica del condensatore C_1 , che supponiamo inizialmente caricato per mezzo di un generatore di tensione continua al valore V_0 e, pertanto, disponga di un'energia accumulata pari a

$$U_1(t = 0) = \frac{1}{2} C_1 V_0^2.$$

L'altro condensatore, di capacità C_2 , comprensiva della capacità verso terra dell'oggetto da sottoporre a prova, invece, sia scarico. Si tenga presente che lo spinterometro è uno strumento assai utile e trova spazio in moltissime applicazioni. Ad esempio, serve per produrre scintille in spettroscopia, scintille che oscillano e producono radiazione elettromagnetica (ultravioletta). Viene anche usato per produrre dispositivi di sicurezza (scaricatori) adoperati per evitare le sovratensioni sulle linee di trasporto dell'energia elettrica.

Si verifica agevolmente che la dinamica della tensione $v_2(t)$ del secondo condensatore è descritta dall'andamento temporale, per $t \geq 0$,

$$v_2(t) = \frac{V_0}{R_1 C_2} \frac{e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_2 t}}{\lambda_1 - \lambda_2},$$

essendo I_1 e I_2 le due soluzioni dell'equazione caratteristica

$$I^2 + \left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_2 C_2} \right) I + \frac{1}{R_1 C_1 R_2 C_2} = 0.$$

La scelta più opportuna dei parametri del generatore deriva da un compromesso. Tuttavia, se $R_1 \ll R_2$, essendo

$$I_1 = -\frac{1}{R_2 C_2} \quad \text{e} \quad I_2 = -\frac{1}{R_1} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right),$$

risulta che le due funzioni esponenziali che descrivono la tensione ai capi del secondo condensatore sono molto diverse, determinando un fronte di salita rapido ed uno di discesa lento. Nella pratica, tuttavia, si sceglie anche $C_1 \gg C_2$ e non può essere trascurata l'influenza dell'induttanza dei collegamenti e nemmeno quella parassita dei condensatori: queste due induttanze ostacolano la realizzazione di fronti molto ripidi.

Il circuito descritto è limitato in tensione, potendo raggiungere una tensione di esercizio pari circa a 200 kV, a causa dell'aumento delle dimensioni degli elementi circuitali, della nascita di scariche corona durante la fase di carica, della limitazione della tensione continua per la carica di C_1 .

Per superare le limitazioni imposte dai generatori monostadio, vengono utilizzati i generatori impulsivi multistadio (il primo venne proposto da E. Marx nel 1923), che sono costituiti da più stadi collegati da resistenze di opportuno valore. Senza scendere troppo in dettagli costruttivi, si tratta, in ultima analisi, di un certo numero (N) di condensatori che vengono, prima, caricati in parallelo e, poi, scaricati in serie su un unico carico attraverso l'innesco contemporaneo di spinterometri. Gli spinterometri devono essere disposti in linea, in modo tale che la radiazione ultravioletta, generata durante la prima scarica, favorisca l'innesco degli altri spinterometri. All'atto dell'innesco, il sistema è equivalente ad un condensatore di capacità $C_{1T} = C_1/N$, essendo C_1 la capacità del singolo stadio caricato ad una aliquota variabile con continuità della tensione nominale del generatore di tensione continua, secondo il circuito equivalente mostrato in Figura 3.43.

In maniera simile per i due resistori R_{1T} ed R_{2T} , sempre di Figura 3.43, si deve fare riferimento a quelli relativi del singolo stadio R_1 ed R_2 , rispettivamente. Con un generatore multistadio si possono raggiungere anche tensioni di 10 MV.

Il generatore per prove ad impulso della sala AT del DIEL è costituito da 12 stadi. Ciascuno stadio può essere caricato, per mezzo di un apposito generatore di tensione regolabile, ad una tensione V_0 , variabile tra pochi volt e 200 kV. Inoltre, la capacità di ogni stadio, C_1 , è di circa 0.16 nF, essendo la capacità equivalente di

due condensatori uguali, ciascuno di capacità pari a 0.323 nF e tensione nominale di 100 kV, collegati in serie.

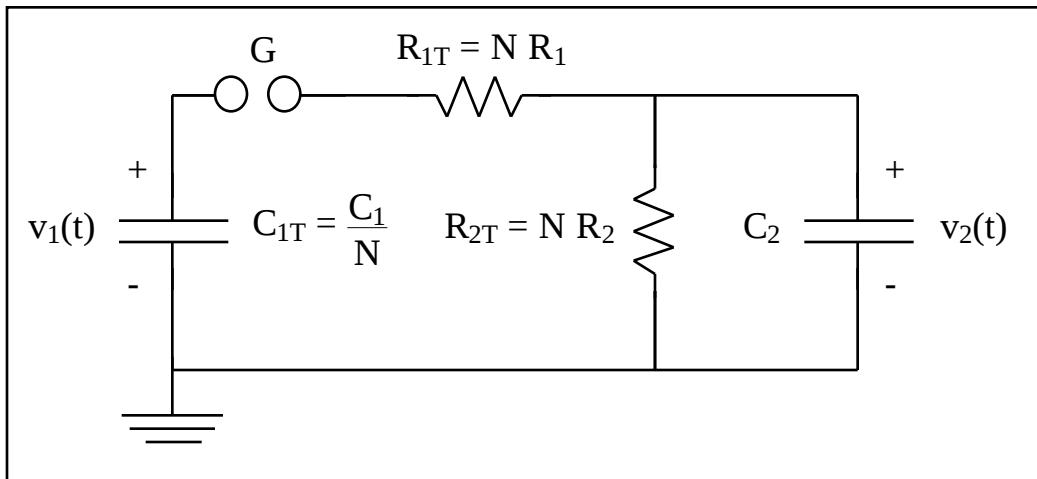


Figura 3.43: circuito equivalente di un generatore multistadio all'innesco.

A seconda del valore della tensione V_0 e del numero N di stadi collegati (è infatti possibile, per particolari esigenze, con opportuni accorgimenti, configurare il generatore con un numero di stadi minore di 12), si ha che (Figura 3.43)

- » la tensione disponibile all'atto della scarica è $N V_0$,
- » la capacità totale C_{1T} è pari a C_1/N ,
- » l'energia globalmente immagazzinata vale $0.5 C_1 N V_0^2$.

Ad esempio, posto $N = 6$ ed il valore massimo di tensione che il generatore in continua può erogare $V_0 = 200$ kV, si può facilmente calcolare che la tensione disponibile all'atto della scarica è pari a 1200 kV, la capacità totale vale $C_{1T} = 0.0267$ nF e l'energia globalmente immagazzinata è circa 19.2 kJ, cioè sei volte quella immagazzinata in ogni stadio, pari circa a 3.2 kJ.

La regolazione della rapidità del fronte di salita e della lentezza del fronte di discesa dell'impulso, quindi la regolazione della durata virtuale di fronte, della durata virtuale all'emivalore e del valore di cresta, può essere ottenuta, a parità di capacità C_2 , scegliendo in maniera opportuna i valori delle resistenze R_1 ed R_2 del singolo stadio.

A conclusione di queste poche note sulla sala AT del DIEL, si accenna brevemente al problema della misura delle tensioni di prova. Si tratta, come visto, della misura di tensioni che possono raggiungere valori estremamente elevati e che, pertanto, devono essere ridotte a valori compatibili con i normali apparecchi di misura, tra i quali si ricordano i voltmetri di cresta e gli oscilloscopi. Si impiegano allo scopo opportuni divisori di tensione, in genere ohmici o capacitivi. In particolare nella sala AT del DIEL vengono impiegati, per l'impianto per prove a 50 Hz, un divisore

ohmico, per l'impianto con tensioni sinusoidali regolabili in frequenza, un divisore capacitivo, per il generatore per le prove ad impulso, ancora un divisore ohmico. La sala è, inoltre, dotata

» di due spinterometri a sfera, con una sfera a terra, rispettivamente con diametro di sfera di 12.5 cm, per tensioni fino a 150 kV, e di 100.0 cm, per tensioni superiori, necessari per operazioni di taratura periodica della strumentazione di misura delle tensioni di prova;

» di un condensatore zavorra da connettere in parallelo all'oggetto in prova, qualora fosse necessario per particolari esigenze, allo scopo di aumentare il valore della capacità C_2 di Figura 3.43.

D) Carro ponte

Il carro ponte, per la movimentazione orizzontale e verticale dei carichi, consiste in una gru a cavalletto che corre su due binari disposti parallelamente all'asse maggiore della sala. I carichi da movimentare vengono sospesi ad un gancio, che si sposta solidalmente al cavalletto e può scorrere sia lungo il cavalletto stesso che verticalmente; la portata utile del gancio è di 10 tonnellate, con una corsa utile di 8 m (da 2 m a 10 m rispetto al pavimento).

E) Vasca per prove in olio minerale

La vasca è stata realizzata per poter effettuare la misura della tensione di *scarica interna* dei materiali ad elevata rigidità dielettrica. Nella vasca, che è un cilindro di raggio pari ad 1 m e profondo 1.6 m ed è riempita di olio minerale, vengono immerse le apparecchiature da provare.

La sala AT è dotata, inoltre, dei seguenti impianti:

- » impianto di illuminazione;
- » impianto di riscaldamento, ventilazione e condizionamento estivo;
- » schermatura dai campi elettromagnetici;
- » maglia di terra.

L'**illuminazione** della sala proviene dal soffitto ed è realizzata con lampade a vapori di mercurio da 400 W e con lampade ad incandescenza da 1000 W (queste ultime da impiegare, oltre che per incrementare l'illuminamento, da sole durante le prove per la determinazione di scariche parziali); l'illuminazione è completata da una serie di proiettori orizzontali con lampade ad ioduri metallici da 500 W disposti perimetralmente in modo da consentire, all'occorrenza, un aumento locale dell'illuminamento.

L'**impianto di riscaldamento** è dimensionato per avvicinarsi il più possibile alle condizioni ambientali di temperatura ambiente di 20 °C, pressione atmosferica di 1013 hPa ed umidità relativa del 65%.

La **schermatura dai campi elettromagnetici** è stata realizzata rivestendo soffitto, pareti e pavimento con lamierino metallico forato, posato in opera su di un'apposita intelaiatura metallica di sostegno.

Sotto il pavimento è stata disposta una **maglia di terra** con lato di maglia di 50 cm; essa è stata realizzata con tondini di ferro zincato saldati nei punti di giunzione con processo alluminotermico. La maglia ha lo scopo di ottimizzare l'equipotenzialità della sala; ad essa, in punti opportuni della sala scelti in relazione all'ubicazione delle apparecchiature elettriche, sono stati connessi opportuni nodi di terra per facilitare la messa a terra delle apparecchiature stesse e dei circuiti di prova. La maglia è connessa all'impianto di terra del complesso, all'interno del quale si trova, mediante un insieme di dispersori facenti parte del suddetto impianto di terra e ad essa collegati.

Impianti per prove sotto pioggia, in grado di riprodurre condizioni normalizzate di pioggia, possono essere allestiti all'occorrenza, adattandoli alle dimensioni ed alle forme dell'oggetto in prova.

Appendice: considerazioni meccaniche e termiche sulle linee

Quando i punti ai quali è fissata una catena sono alla stessa altezza e la catena è un po' più lunga della distanza fra essi, l'arco da essa formato sembra essere identico ad un arco di parabola. Questo è ciò che a lungo si è pensato: gli studi di Galilei nel campo della meccanica sollevarono dubbi sulla giustezza di questa ipotesi, ma lo stesso Galilei non poté confermarla, né smentirla. Nel 1669, Jungius stabilì teoricamente e sperimentalmente che la curva della catena non è una parabola. La matematica di quei tempi non disponeva dei mezzi necessari per trovare la vera forma di questa curva. Tali mezzi furono ad essa forniti da Newton e Leibniz che elaborarono i metodi dell'analisi infinitesimale. Il problema fu posto nel 1690 da Jacques Bernoulli ed immediatamente risolto dal suo fratello Jean Bernoulli, Huyghens e Leibniz.

Allo stesso modo, se si suppone di disporre di un qualunque filo di tipo flessibile, in particolare di un conduttore per linee elettriche aeree, e di sospenderlo tra due punti fissi, si può constatare che esso è sottoposto al carico dovuto al proprio peso e, spesse volte, anche ad altri carichi dovuti, principalmente, a manicotti di ghiaccio oppure all'azione del vento. Questo complesso di carichi si può considerare uniformemente distribuito sulla intera lunghezza del conduttore e determina la disposizione del conduttore stesso, in una condizione di equilibrio secondo una curva denominata **catenaria** e situata nel piano della risultante dei carichi.

• La catenaria

Si consideri la Figura A.1: in essa sono stati schematicamente rappresentati due sostegni e la traccia di un conduttore che, come si è già avuto modo di dire, disegna una catenaria. Si notino pure le definizioni di 'franco verso terra' e di 'freccia', chiare già dalla figura.

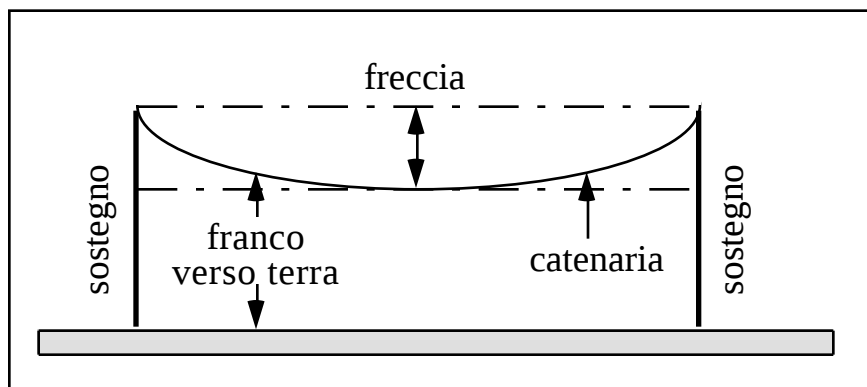


Figura A.1: significato della freccia e del franco verso terra.

Il 'franco minimo verso terra' rappresenta il punto del conduttore meno distante dal suolo, mentre il punto più basso della catenaria è chiamato vertice. Apposite tabelle

di posa indicano i valori della freccia in relazione alle caratteristiche del conduttore ed alle distanze tra i sostegni.

Si mostrerà in quel che segue che, se si considera come origine delle coordinate il vertice della catenaria, una scelta che sembra naturale, e si orienta l'asse delle ordinate verticalmente verso l'alto, la catenaria è rappresentata dall'equazione

$$y = a \cosh \frac{x}{a} - a ,$$

in cui a è una costante, dimensionalmente omogenea ad una lunghezza, che dipende dalle caratteristiche del filo, come la massa e la lunghezza, mentre la funzione coseno iperbolico è definita dalla relazione

$$\cosh x = \frac{e^x + e^{-x}}{2} ,$$

in cui 'e' rappresenta il cosiddetto numero di Nepero, un irrazionale che vale

$$e = 2.718 \dots$$

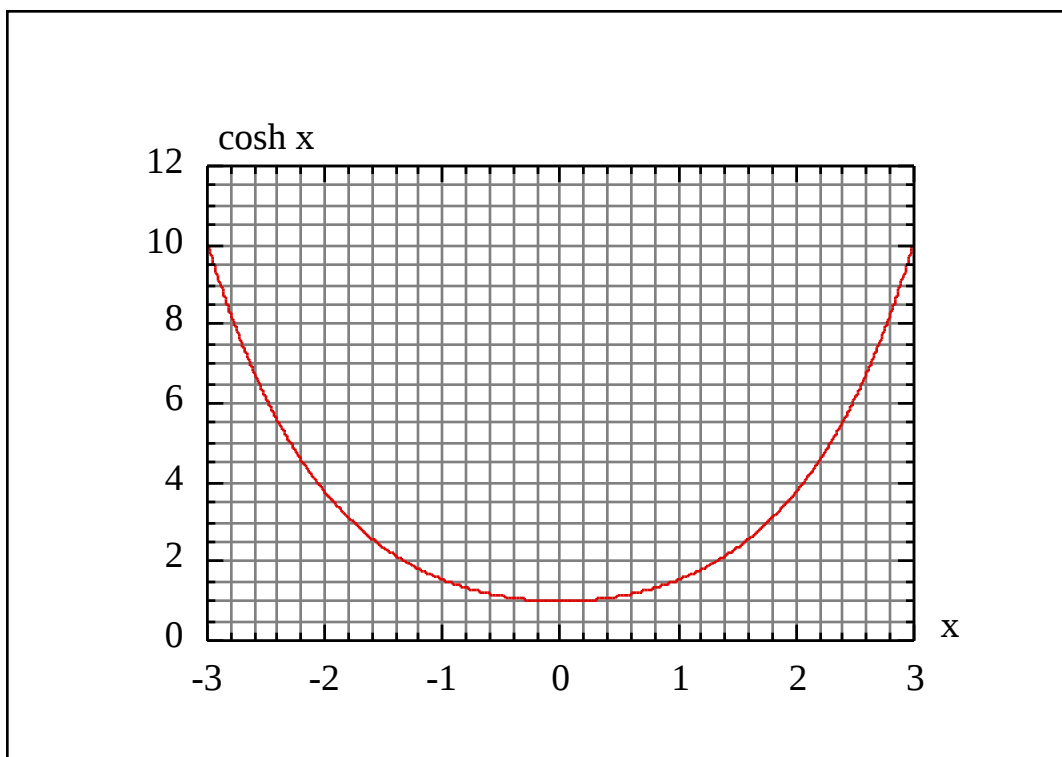


Figura A.2: la funzione coseno iperbolico.

La funzione coseno iperbolico, disegnata in Figura A.2, assomiglia ad una parabola: è una funzione pari, in zero assume valore unitario e cresce rapidamente per elevati valori dell'argomento.

Per comprendere come si possa ottenere la funzione che descrive l'altezza di un filo sospeso, perfettamente flessibile, inestensibile e di densità lineare l , si consideri la Figura A.3, in cui è riportato un piccolo tratto di catenaria di lunghezza Ds , sul quale agiscono tre forze, che sono in equilibrio: la tensione $\vec{T}_A$, tangente al filo e dovuta all'azione del tratto di filo posto al di sopra della sezione in cui si immagina applicata, la tensione $\vec{T}_B$, anch'essa tangente al filo e dovuta all'azione del tratto di filo posto al di sotto della sezione in cui si immagina applicata, il peso $l Ds \vec{g}$ dell'elemento di filo preso in esame, diretto verso il basso. Imponendo che queste tre forze siano in equilibrio, si ottiene

$$\vec{T}_A + \vec{T}_B + l Ds \vec{g} = \vec{0} .$$

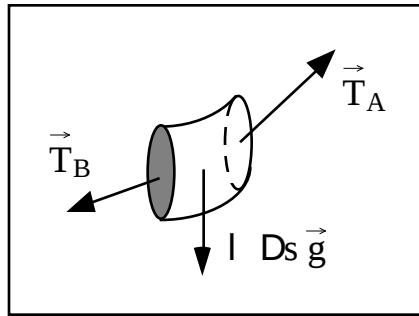


Figura A.3: equilibrio delle forze in un tratto elementare della catenaria.

Proiettando questa relazione vettoriale lungo gli assi del riferimento scelto, essa diventa uguale alle due relazioni scalari

$$T_{Ax} + T_{Bx} = 0 , \quad T_{Ay} + T_{By} - l Ds g = 0 .$$

A parte il segno, le due componenti lungo l'asse x delle tensioni sono uguali e, pertanto, si può scrivere

$$T_{Ax} = - T_{Bx} = T_0 \quad (\text{tiro orizzontale}) ,$$

mentre, ricordando che le tensioni sono tangenti alla catenaria, si avrà

$$T_{Ay} + T_{By} - l Ds g = T_0 y'(x+Dx) - T_0 y'(x) - l Ds g = 0 .$$

L'arco di curva Ds è, in generale, pari a

$$Ds = \sqrt{Dx^2 + Dy^2} = Dx \sqrt{1 + [y'(x)]^2} ,$$

e, sostituendo nella precedente relazione, risulta

$$T_0 \frac{y'(x+Dx) - y'(x)}{Dx} = l \cdot g \sqrt{1 + y'(x)^2}.$$

Nel limite $Dx \rightarrow 0$, questa equazione di bilancio delle forze diventa

$$y''(x) = \frac{l \cdot g}{T_0} \sqrt{1 + y'(x)^2} = \frac{1}{a} \sqrt{1 + y'(x)^2},$$

avendo posto

$$a = \frac{T_0}{l \cdot g}.$$

Si è in tal modo giunti ad un'equazione differenziale del secondo ordine, la cui soluzione fornirà la forma funzionale della catenaria. Per integrarla, posto

$$u(x) = y'(x) \quad \text{e} \quad u'(x) = y''(x),$$

si può riscrivere nella forma

$$u'(x) = \frac{1}{a} \sqrt{1 + u(x)^2},$$

che, separando le variabili, diventa

$$\frac{du}{\sqrt{1 + u^2}} = \frac{dx}{a}.$$

Integrando membro a membro e ponendo $u = \sinh z$, si ha

$$\int \frac{\cosh z}{\sqrt{1 + \sinh^2 z}} dz = \int dz = z = \frac{x}{a} + C_1,$$

essendo C_1 una costante di integrazione e la funzione seno iperbolico definita come

$$\sinh x = \frac{e^x - e^{-x}}{2}.$$

È utile pure ricordare che tra le due funzioni iperboliche definite sussiste la relazione

$$\cos^2 x - \sinh^2 x = 1 ,$$

come è facile verificare. Allora, tornando alla funzione $u(x)$, si può scrivere che

$$u(x) = \sinh z = \sinh\left(\frac{x}{a} + C_1\right) = y'(x) .$$

La costante di integrazione dipende dalla scelta del riferimento e dalla lunghezza dei sostegni. Inoltre, un'ulteriore integrazione fornisce il risultato generale

$$y(x) = a \cosh\left(\frac{x}{a} + C_1\right) + C_2 ,$$

laddove per la nuova costante di integrazione C_2 vale quanto detto a proposito della prima costante. In particolare, se, come si è già accennato, si immagina di sospendere il filo tra due sostegni di uguale altezza e di porre nel vertice della catenaria l'origine del sistema di riferimento, dovendosi verificare le condizioni

$$y(0) = 0 , \quad y'(0) = 0 ,$$

l'integrale generale si particularizza, come si era già anticipato, nell'espressione

$$y(x) = a \cosh \frac{x}{a} - a .$$

Da quanto segue, non è difficile ottenere un'altra conclusione: detta D la distanza orizzontale tra gli appoggi ed f la freccia, una catenaria sostenuta da sostegni uguali è lunga

$$L = 2 \int_0^{D/2} \sqrt{1 + \sinh^2 \frac{x}{a}} dx = 2 \int_0^{D/2} \cosh \frac{x}{a} dx = 2a \sinh \frac{D}{2a} .$$

D'altra parte, dovendo essere

$$f = a \cosh \frac{D}{2a} - a ,$$

sfruttando il legame tra le funzione iperboliche, è possibile identificare il parametro a , collegandolo alle grandezze geometriche che definiscono la catenaria:

$$\left(\frac{f+a}{a}\right)^2 - \left(\frac{L}{2a}\right)^2 = 1 \quad \text{e} \quad a = \frac{1}{2f} \left(\frac{L^2}{4} - f^2\right) .$$

Nel caso piuttosto frequente di una freccia piccola, cioè quando l'arco di catenaria è piuttosto lungo e ben teso, la relazione precedente, come mostrato in Figura A.4, consente di scrivere

$$a \approx \frac{D^2}{8 f},$$

da cui discende l'espressione comunemente adoperata per il calcolo del tiro orizzontale

$$T_0 = \frac{l}{8 f} g D^2.$$

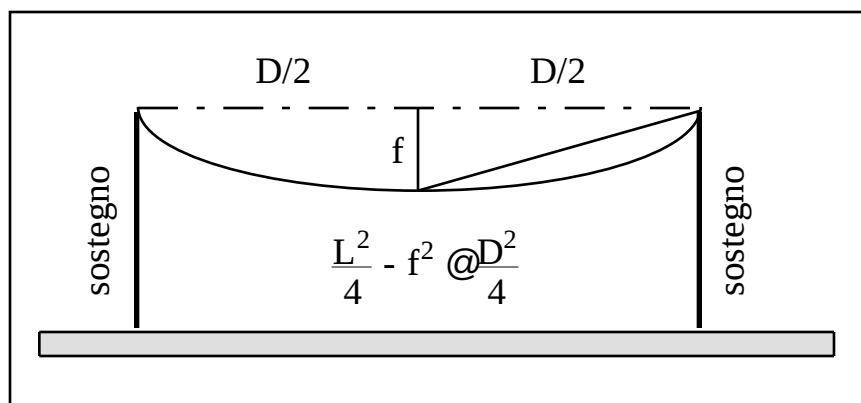


Figura A.4: relazioni geometriche relative alla catenaria.

• Caratteristiche meccaniche

Le caratteristiche meccaniche di una linea aerea devono essere tali da resistere alle sollecitazioni alle quali essa viene sottoposta durante la trasmissione dell'energia. In particolare, tali sollecitazioni riguardano i conduttori, i sostegni, le mensole, i perni portaisolatori e le fondazioni. Naturalmente, prima di procedere al calcolo meccanico, è necessario fissare a priori alcuni parametri geometrici fondamentali relativi alla distanza tra i conduttori, alla loro disposizione reciproca, all'altezza minima dei conduttori rispetto al suolo, alla distanza tra i sostegni, ed inoltre occorre conoscere le ipotesi di carico e le sollecitazioni ammissibili, che in Italia vengono fornite dalle norme CEI.

Il calcolo meccanico delle linee consiste nella determinazione della massima tensione meccanica, detta tiro, a cui deve essere sottoposto un conduttore durante la tesatura della linea, in modo che, una volta costruita, i conduttori stessi non superino, nelle condizioni più gravose, il carico di sicurezza del materiale di cui sono costituiti.

Si è già stabilito che, approssimativamente, il tiro è dato dalla relazione

$$T_0 = \frac{l \cdot g \cdot D^2}{8 f}.$$

Ora, questa formula consente di calcolare, secondo determinati criteri di sicurezza, i valori massimi che può assumere il tiro nella definizione della configurazione da dare al conduttore nelle più sfavorevoli condizioni di carico. Inoltre, nello studio della meccanica dei conduttori per linee aeree è spesso necessario abbandonare l'ipotesi di inestensibilità dei fili, per tener conto degli effetti delle deformazioni elastiche e termiche che ne cambiano la lunghezza. È, infatti, di particolare importanza una accurata valutazione delle variazioni di temperatura perché queste ultime hanno dei notevolissimi effetti sui valori delle frecce e della tensione del filo in catenaria. Gli effetti sono più o meno accentuati a seconda del coefficiente di dilatazione termica del filo.

Il problema è, poi, ulteriormente complicato dalla struttura bimetallica dei conduttori: anima e metallo sono a stretto contatto tra loro e tutto si congegnava per impedire il possibile scorrimento reciproco.

• **Le prescrizioni normative.**

Secondo le norme CEI in vigore, una linea si può trovare in due tipi di zone:

zona A

Italia centrale, meridionale ed insulare, oppure a quote al di sotto degli 800 m;

zona B

Italia settentrionale, oppure a quote superiori agli 800 m.

L'essere nell'una o nell'altra zona, fa cambiare le condizioni che devono essere soddisfatte per poter realizzare la linea. In particolare, le norme prescrivono che la linea venga progettata in modo tale che siano rispettate le condizioni di seguito schematicamente riassunte.

» La linea deve essere progettata alla temperatura di 15 °C e senza sovraccarico, la sollecitazione non deve superare il 25% del carico di rottura.

» Le sollecitazioni a cui è sottoposto il conduttore non devono oltrepassare il 50% del carico di rottura, per linee a tensione superiore a 60 kV, e non devono oltrepassare il 40%, per le altre. Nel contempo, bisogna tener presente che, se ci si trova nella zona A, detta verifica va fatta in condizioni di temperatura pari a - 5 °C e di vento pari a 130 km/h; se, invece, ci si trova nella zona B, la stessa verifica va fatta in condizioni di temperatura di - 20° C e di vento fino a 65 km/h ed in presenza di un manicotto di ghiaccio dello spessore di 12 mm. In particolari zone,

nelle quali si sono verificati ingenti sovraccarichi ($2 \div 5$) kg/m o più, si considera la linea sottoposta contemporaneamente al massimo sovraccarico ammissibile di neve o ghiaccio ed una temperatura di 0° C.

» La massima freccia per una linea operante a tensione nominale maggiore di 1 kV deve avere un franco minimo verso il suolo di 6 m, mentre per una linea operante a tensione nominale minore di 1 kV deve essere di 5 m. Questo deve verificarsi alla temperatura di 55 °C, se ci si trova nella zona A, oppure alla temperatura di 40 °C, se ci si trova nella zona B.

Speciali disposizioni di sicurezza devono essere adottate negli attraversamenti con altre linee elettriche, strade, incroci con linee telegrafiche, telefoniche e strade ferrate, onde evitare particolari pericoli in caso di rottura dei conduttori o degli isolatori. In particolare, le norme prescrivono il minimo angolo di incrocio fra linee elettriche e opere attraversate, nonché la minima altezza dei conduttori sul terreno o sulle acque.

Tutto ciò in misura diversa nei vari casi che si possono presentare ed in dipendenza da quale delle seguenti quattro classi appartiene la linea:

CLASSE 0: linee telefoniche, telegrafiche o similari;

CLASSE 1: linee elettriche con tensione minore di 1 kV;

CLASSE 2: linee elettriche con tensione minore di 30 kV oppure aventi tensione superiore se il carico di rottura del proprio conduttore è inferiore a 3500 kgf (si rammenta che $1 \text{ kgf} = 9.807 \text{ N}$);

CLASSE 3: linee elettriche con tensione maggiore di 30 kV oppure aventi tensione superiore se il carico di rottura del proprio conduttore è superiore a 3500 kgf.

Per legge, tutti gli impianti che rispettano le norme CEI sono ritenuti a regola d'arte (presunzione di regola d'arte a favore delle norme CEI). Come è noto, seguire i dettami delle norme CEI è condizione sufficiente, ma non necessaria, per realizzare la posa del cavo a regola d'arte: una norma imperativa, benché impedisca il peggio, contemporaneamente ostacola anche il meglio, come ad esempio innovazioni o realizzazioni migliori o non ancora previste, la cui realizzazione serve spesso anch'essa per acquisire nuove esperienze, utili all'aggiornamento normativo. In conclusione, le norme CEI costituiscono un preciso riferimento tecnico, ma non esclusivo: esse stabiliscono un livello di sicurezza ritenuto sufficiente, con il quale occorre confrontarsi quando vengono eseguiti sistemi alternativi oppure innovativi. Spesse volte, quindi, applicando il contenuto normativo, non si ottiene il risultato migliore. Nel nostro caso specifico è evidente che, ove si manifestino condizioni ambientali particolari, è bene che il progettista

prenda in esame altre condizioni di verifica più severe di quelle indicate nelle norme e più aderenti alle reali sollecitazioni cui il conduttore sarà sottoposto.

• **Informazioni pratiche sulla posa in opera dei conduttori**

Il montaggio dei conduttori, solitamente affidato a ditte specializzate, inizia molto spesso, con la stesura del filo ai piedi dei sostegni. Vi sono, tuttavia, dei conduttori, come quelli di alluminio o aldrey (Al-Mg-Si), che non possono essere stesi per terra perché verrebbero subito danneggiati dallo strisciamento sul terreno: in questi casi si svolge il conduttore direttamente dalla bobina infilata su un cavalletto fisso, alzato sulle mensole, dal quale viene svolto passando attraverso una coppia di carrucole nel mentre è tirato dall'altra estremità da un apposito argano.

In questa fase, è fondamentale evitare la formazione di occhielli nel filo, i quali causando screpolature ne riducono la resistenza, anzi, qualora in un punto del conduttore si formasse accidentalmente un occhiello è addirittura consigliabile tagliare il filo e fare una giuntura.

Per quanto riguarda la tesatura essa in genere viene effettuata a mezzo di apposite carrucole e morsetti speciali di appiglio che esercitano il voluto sforzo di trazione e sono strutturati in modo da evitare che il conduttore venga intaccato alla superficie. Il controllo del tiro si effettua di solito con un apposito dinamometro oppure misurando l'altezza del conduttore rispetto al suolo, operazione che, terreno ed altezze permettendo, può essere effettuata anche con apposite pertiche graduate. Altro metodo è quello che consiste nel predisporre sui sostegni degli opportuni segni ben visibili: guardando attraverso la linea ideale che unisce i due segni si regola la tensione del filo fin quando il punto più basso della catenaria sfiori detta linea.

Se, invece, si opta per la regolazione del tiro, può tornare utile tener presente che l'esperienza ha largamente confermato che le resistenze passive, che si manifestano durante la regolazione del tiro di posa, non dipendono tanto dagli attriti delle carrucole, quanto dalla riluttanza del conduttore a subire il trasferimento della curvatura man mano che si sposta sopra se stesso: l'unico rimedio efficace è l'aumento del diametro delle carrucole. Inoltre, la misura della temperatura del filo, utile per scegliere la giusta tesatura, va fatta con speciali accorgimenti, tenendo conto soprattutto della eventuale esposizione al sole del conduttore che ne diversifica la temperatura.

Come ricordato anche dalle norme CEI, il montaggio della linea va ultimato con l'applicazione sui sostegni di apposite targhe monitorie e con ostacoli che tentino di impedirne la scalata, come collari di filo spinato, punte metalliche e similari.