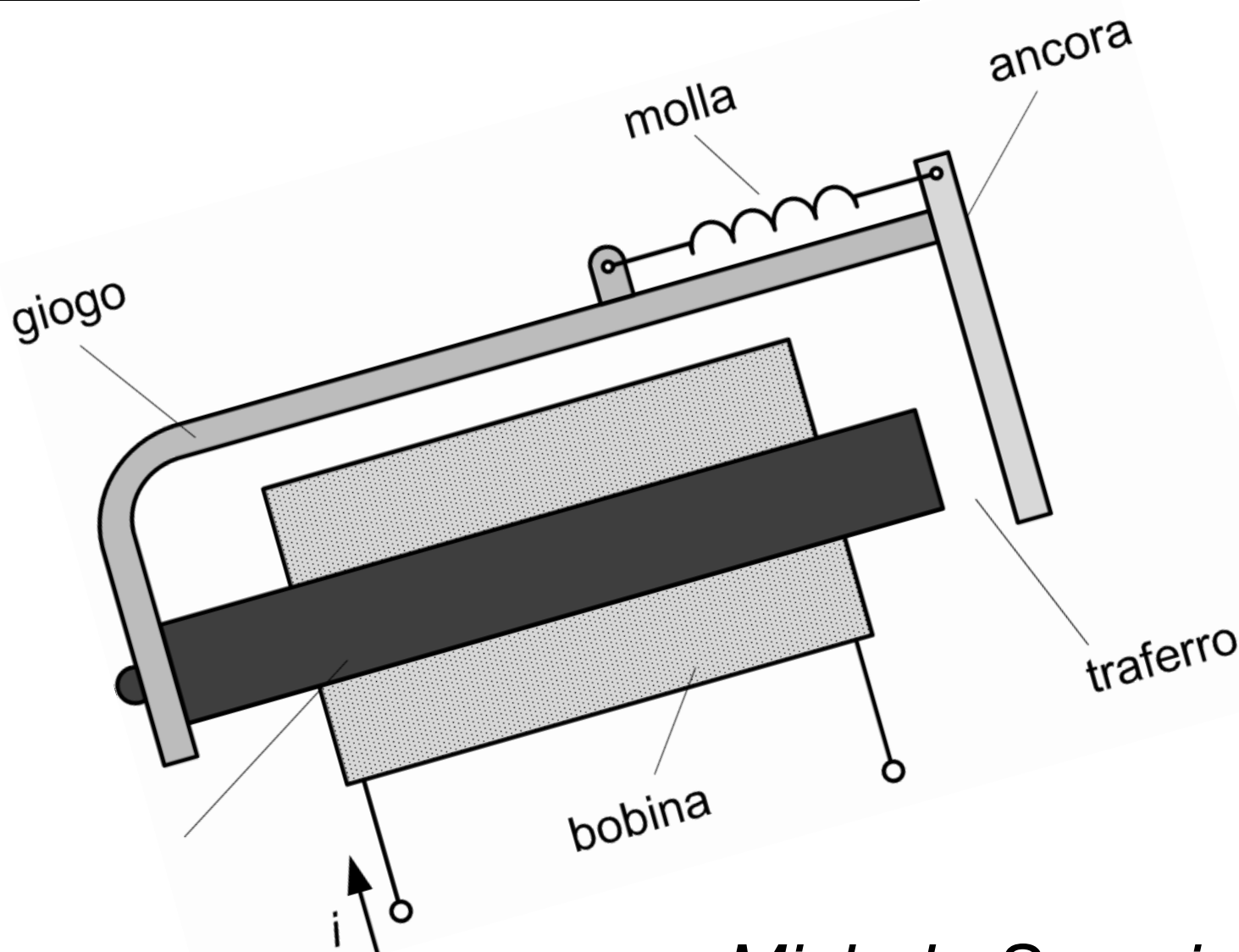




Michele Scarpiniti

Principi di Impianti e Sicurezza Elettrica



MICHELE SCARPINITI

Principi di Impianti e Sicurezza Elettrica

Versione 1.2

Dipartimento *INFOCOM*
Università di Roma “*La Sapienza*”
via Eudossiana 18, 00184 Roma

PRINCIPI DI IMPIANTI E SICUREZZA ELETTRICA

Premessa

La seguente dispensa è rivolta agli studenti di Elettrotecnica del corso di laurea in Ingegneria della Sicurezza della Facoltà di Ingegneria dell'Università degli studi di Roma "La Sapienza".

Questo lavoro non ha la pretesa di essere un testo esauriente sugli Impianti Elettrici o sulla Sicurezza Elettrica, ma costituisce solamente un ausilio e completamento alle lezioni da me svolte durante l'anno accademico 2008-2009.

Roma, 30 Aprile 2009

Michele Scarpiniti

Versione 1.2, ultimo aggiornamento: 27 maggio 2014

Indice

Premessa	vii
1 Introduzione	1
1.1 Sistemi elettrici in alternata	2
1.2 Livelli di tensione nei sistemi elettrici	3
2 La Produzione di Energia Elettrica	5
2.1 Tipi di centrali elettriche	6
2.1.1 Centrali idroelettriche	6
2.1.2 Centrali termoelettriche a combustibile fossile	8
2.1.3 Centrali elettronucleari	8
2.1.4 Centrali geotermiche	9
2.1.5 Centrali mareomotrici	10
2.1.6 Centrali eoliche	11
2.1.7 Centrali solari	11
2.1.8 Altre forme di generazione	12
2.2 Linee elettriche di potenze	13
2.2.1 Linee elettriche di trasporto o trasmissione	13
2.2.2 Linee elettriche di distribuzione	13
2.3 Stazioni e cabine di trasformazione	14
3 Il Trasporto dell'Energia Elettrica	15
3.1 Linee aeree	16
3.2 Linee in cavo	17
3.3 Schemi equivalenti	18
3.3.1 Schema della linea in continua	19
3.4 Topologia delle linee elettriche di potenza	19
3.5 Caduta di tensione sulla linea	20

3.6	Comportamento termico delle linee	23
4	Componenti dei Sistemi Elettrici	25
4.1	Sovratensioni e sovracorrenti	25
4.1.1	Sovratensioni	25
4.1.2	Sovracorrenti	26
4.2	Apertura e chiusura dei circuiti elettrici	26
4.3	Interruttori di potenza	28
4.4	Sezionatori	29
4.4.1	Interruttore di manovra	30
4.4.2	Teleruttori o contattori	30
4.5	Relè	31
4.5.1	Relè elettromagnetico	31
4.5.2	Relè differenziale	32
4.5.3	Relè termico	32
4.6	Interruttori automatici	34
4.6.1	Interruttore differenziale (salvavita)	34
4.6.2	Interruttore magnetotermico	35
4.7	Fusibili	36
4.8	Isolatori	36
4.9	Scaricatori	36
5	Sicurezza negli Impianti Elettrici	39
5.1	Infortunio elettrico	39
5.1.1	Limiti di corrente	40
5.1.2	Limiti di tensione	41
5.2	Contatti diretti e indiretti	42
5.2.1	Protezione contro i contatti diretti	42
5.2.2	Protezione contro i contatti indiretti	43
5.3	Impianto di terra	43
5.4	Elementi dell'impianto di terra	44
5.4.1	Il dispersore di terra	44
5.5	Tensioni e resistenza di terra	47
6	Impianti Elettrici Utilizzatori	49
6.1	Impianti utilizzatori in bassa tensione	49
6.2	Sistema TT	50
6.2.1	Sicurezza e protezione nei sistemi TT	51
6.3	Sistema TN	52
6.3.1	Sicurezza e protezione nei sistemi TN	53
6.4	Sistema IT	54
6.4.1	Sicurezza e protezione nei sistemi IT	55
6.5	Impianti elettrici in luoghi speciali	56

7	Normativa Elettrica	57
7.1	Norme giuridiche	57
7.1.1	Testo unico sulla sicurezza sul lavoro: il D.Lgs. 9 aprile 2008, n. 81	61
7.2	Le Norme CEI	67
	Bibliografia	73

LA produzione di energia elettrica rappresenta il primo passaggio nel processo che conduce alla distribuzione dell'elettricità all'utilizzatore finale. Le altre due fasi che compongono il processo sono la trasmissione dell'energia e la sua distribuzione. Tutta la società moderna si basa sul consumo di energia, per fare qualsiasi attività necessitiamo di qualche forma di energia. Tra tutte le forme di energia quella più versatile è sicuramente l'energia elettrica, infatti essa può essere trasformata e trasportata in maniera abbastanza semplice. Una volta prodotta l'energia elettrica può essere facilmente convertita in movimento, luce e calore.

Un fondamentale vantaggio dell'energia elettrica rispetto alle altre forme di energia, è costituito, oltre che dalla sua versatilità, dalla facilità di distribuzione capillare nel territorio. Per contro l'energia elettrica non può essere accumulata in modo economicamente e tecnologicamente vantaggioso, né in forma elettrostatica, né in forma magnetica. Quindi la potenza elettrica richiesta in ogni istante dalle utenze deve essere contemporaneamente generata.

L'adeguamento della potenza generata a quella richiesta viene semplificato interconnettendo il più possibile le utenze, in modo che le variazioni delle singole potenze richieste si compensino, per dare luogo ad un andamento temporale della domanda complessiva più regolare. Risultano in tal modo interconnesse anche le centrali di generazione cosicché ciascuna di essa può fornire potenza nel modo tecnicamente ed economicamente più idoneo alle sue caratteristiche e risulta inoltre possibile mettere temporaneamente fuori servizio una centrale senza interruzioni di servizio.

Un **sistema elettrico nazionale**, ottenuto da questa interconnessione, possiede una struttura molto complessa. Esso risulta anche collegato ai sistemi elettrici delle nazioni confinanti. Così il *sistema elettrico italiano* è direttamente interconnesso con quelli di Francia, Svizzera, Austria e Slovenia. Gli elementi di un sistema elettrico nazionale sono:

- **centrali elettriche di generazione**, ove si produce l'energia elettrica;
- **linee elettriche di potenza**, che interconnettono centrali di generazione, nodi intermedi del sistema e utenze finali;
- **stazioni di trasformazione e cabine di trasformazione** che, site nei nodi intermedi, interconnettono le diverse sezioni del sistema;
- **utenze** (agricoltura, industria, artigianato, commercio, servizi, trasporti, illuminazione pubblica, scuole, ospedali, abitazioni,...) variamente e diffusamente distribuite sul territorio.

La parte del sistema relativa alla generazione e alla distribuzione dell'energia elettrica appartiene (ed è gestita) agli *enti erogatori* o *distributori*. In Italia questo ruolo è svolto in gran parte dall'ENEL S.p.A.

1.1 Sistemi elettrici in alternata

Nel *sistema elettrico nazionale* sono presenti tensioni nominali tra loro diverse, poiché i generatori elettromeccanici delle centrali di generazione funzionano con tensioni elevate di qualche kilovolt, mentre le linee elettriche richiedono tensioni elevatissime di decine o centinaia di kilovolt. Le grandi e grandissime utenze (industriali) sono alimentate a tensioni che vanno dalle decine alle centinaia di chilovolt; invece le piccole e medie utenze (residenziali, artigianali, commerciali) hanno tensioni nominali di qualche centinaio di volt.

La **corrente alternata (c.a.)** permette di realizzare l'adeguamento tra i livelli di tensione dei diversi elementi per mezzo dei *trasformatori di potenza*, siti nelle stazioni e cabine di trasformazione. Invece nei sistemi in **corrente continua (c.c.)** l'adeguamento può essere realizzato mediante l'uso di *convertitori statici*, che sono più complessi e costosi dei trasformatori di potenza, sia in termini di investimento che di esercizio.

Inoltre nella generazione dell'energia elettrica gli *alternatori* risultano più affidabili e robusti delle *dinamo*, perché privi di collettore, organo delicato e soggetto a rapida usura. Per il medesimo motivo il *motore asincrono*, semplice e robusto, è generalmente preferito al *motore in continua* nella produzione di lavoro meccanico da parte delle utenze industriali e non. Questi vantaggi delle macchine in alternata sulle equivalenti in continua sono tuttora molto marcati, ma lo erano ancora di più all'inizio del secolo, quando i sistemi elettrici si diffusero. Per questi motivi tutti i sistemi elettrici nazionali sono in corrente alternata e le apparecchiature e i carichi sono conseguentemente progettati per essere alimentati in corrente alternata. I sistemi nazionali sono sempre *trifasi*, per i vantaggi tecnici ed economici che presentano sui sistemi monofasi: l'alimentazione delle piccole utenze monofasi viene realizzata

tra fase e neutro di un sistema trifase (in Italia a 220 V, essendo la tensione concatenata pari a 380 V ($220 \approx 380/\sqrt{3}$)).

Esistono comunque anche impianti di potenza in corrente continua: due esempi importanti e diffusi nel tempo sono costituiti dai sistemi di trazione (sistema ferroviario) e dai collegamenti sottomarini di potenza.

1.2 Livelli di tensione nei sistemi elettrici

Un sistema elettrico nazionale in corrente alternata presenta una successione di livelli di tensione, come schematicamente rappresentato in Figura 1.1. I livelli tipici di queste tensioni sono indicati in Tabella 1.1.

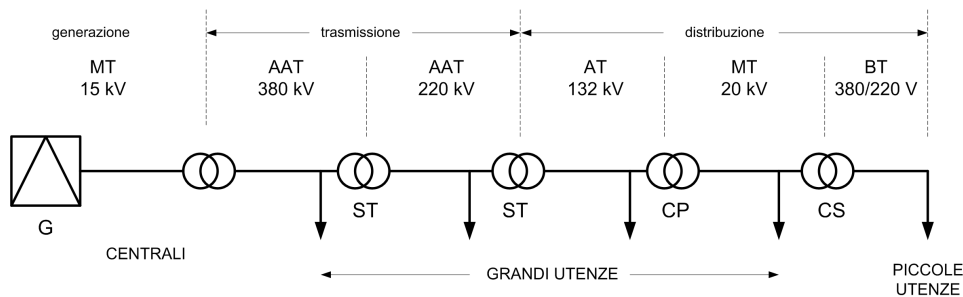


Fig. 1.1: Rappresentazione dei livelli di tensione: G = generatori; ST = Stazioni di trasformazione; CP = Cabine primarie; CS = Cabine secondarie.

Fasce di tensione	Tensioni nominali
BT: bassa tensione	$U \leq 1000 \text{ V}$
MT: media tensione	$1 < U \leq 30 \text{ kV}$
AT: alta tensione	$30 < U \leq 132 \text{ kV}$
AAT: altissima tensione	$U > 132 \text{ kV}$

Tabella 1.1: Classificazione di uso corrente dei livelli di tensione.

Pertanto la normativa tecnica italiana (Norme CEI 11-1 e CEI 64-8/1) classifica i livelli di tensione dei sistemi elettrici nelle quattro categorie indicate in Tabella 1.2.

I livelli di tensione utilizzati nel sistema elettrico nazionale italiano sono in gran parte unificati, al fine di ridurre le scorte di ricambi e di semplificare ed economizzare gli interventi di manutenzione, modifica e ampliamento. I livelli unificati sono: 380 kV, 132 kV, 20 kV e 380 V.

I vari sottosistemi del sistema elettrico nazionale presentano valori efficaci di tensione che si scostano di pochi percento rispetto ai valori nominali, in modo da assicurare il corretto funzionamento delle utenze stesse. Ancora più rigoroso è il controllo della frequenza comune a tutti i sistemi nazionali

Categoria	Tensioni alternate	Tensioni continue
0	$U \leq 50 \text{ V}$	$U \leq 120 \text{ V}$
1	$50 < U \leq 1000 \text{ V}$	$120 < U \leq 1500 \text{ kV}$
2	$1 < U \leq 30 \text{ kV}$	$1,5 < U \leq 30 \text{ kV}$
3	$U > 30 \text{ kV}$	$U > 30 \text{ kV}$

Tabella 1.2: Classificazione secondo la normativa italiana dei livelli di tensione.

interconnessi, che è di 50 Hz in Europa e 60 Hz in America (**frequenza industriale**). Ad esempio ENEL S.p.A. garantisce le forniture in bassa tensione a $380 \text{ V} \pm 10\%$ alla frequenza di $50 \text{ Hz} \pm 2\%$.

La Produzione di Energia Elettrica

LE **centrali elettriche di generazione** (o di *produzione* o semplicemente *centrali elettriche*) nella quasi totalità dei casi realizzano la conversione elettromeccanica, utilizzando quasi esclusivamente generatori sincroni (*alternatori*), con tensioni nominali dell'ordine della decina di kilovolt. Sistemi di regolazione garantiscono che il valore efficace della tensione generata si mantenga costante al variare delle condizioni di carico, cioè al variare della domanda da parte delle utenze.

Il *motore primo* che trascina ciascun generatore fornendo la potenza meccanica è costituito pressoché sempre da una turbina, che può essere idraulica, a vapore o a gas.

Una centrale può disporre di uno o più gruppi turbina-alternatore (**turboalternatori**) connessi in parallelo con livelli di potenza complessiva che possono essere di decine di megawatt per le piccole centrali e superare il gigawatt per le centrali di taglia maggiore.

A valle degli alternatori è posta una **stazione elevatrice** che adegua la tensione dei generatori a quella (maggiore) della linea di trasporto alla quale la centrale è connessa. Ogni centrale comprende anche una notevole quantità di altre apparecchiature come interruttori, sezionatori, trasformatori, sistemi di misura delle diverse grandezze, sistemi di regolazione, ecc. L'intero sistema è comunque tenuto costantemente sotto controllo dal personale addetto che opera nelle sale di controllo.

Le centrali di generazione si distinguono per la fonte primaria di energia utilizzata, che condiziona la localizzazione della centrale, benché questa sia anche definita in funzione dell'impatto ambientale e della distribuzione territoriale della domanda, essendo preferiti i siti in posizioni baricentriche rispetto a regioni con forti concentrazioni di utenze. Una fondamentale classificazione distingue le centrali idroelettriche da quelle termoelettriche a combustibile fossile o nucleare. Importanza assai minore, per numero di

installazioni e potenza complessiva, hanno le centrali che sfruttano altri vettori energetici (calore endogeno, energia solare, eolica, biomasse,...).

In Tabella 2.1 è riportata la quantità di energia elettrica prodotta a livello mondiale nel 1997, suddivisa per tipo di centrale di generazione.

Tipi di centrali	TWh	%
idroelettriche e altre fonti rinnovabili	2657,3	18,8
termoelettriche a combustibile fossile	9002,1	63,9
elettronucleari	2392,7	17,0
geotermiche	42,8	0,3
produzione totale	14094,9	100,0

Tabella 2.1: Produzione mondiale di energia elettrica nel 1997.

2.1 Tipi di centrali elettriche

Nel seguito vengono brevemente elencate e descritte le principali tipologie di centrali elettriche di generazione.

2.1.1 Centrali idroelettriche

Nelle centrali idroelettriche le turbine sono azionate dall'energia cinetica dell'acqua. Le **centrali ad acqua fluente** sfruttano l'acqua di un alveo fluviale, caratterizzata da elevata portata e salto piezometrico modesto. Le **centrali a serbatoio** o **a bacino** (vedi Figura 2.1) utilizzano l'acqua accumulata in un bacino idroelettrico naturale o artificiale posto a monte, che viene accelerata in *condotte forzate* illustrate in Figura 2.2 ove si realizzano salti piezometrici più o meno elevati. Queste ultime vengono utilizzate anche come **centrali di pompaggio** che, nelle ore notturne, utilizzano le macchine elettriche come motori e le macchine idrauliche come pompe. Infatti in esse la potenza elettrica generata da altre centrali in esubero rispetto alla domanda delle utenze viene utilizzata per ricostituire le scorte d'acqua del serbatoio a monte; tale scorta viene poi utilizzata nelle ore diurne di maggior richiesta (*servizio di punta*).

La localizzazione o sito di una centrale idroelettrica è imposta dalla collocazione territoriale della risorsa idrica; le centrali a serbatoio, tipicamente poste in zone montane, sono spesso alloggiate in caverne.

Le centrali idroelettriche, in particolare quelle ad acqua fluente, hanno lo svantaggio di dipendere da fattori stagionali, mitigato nelle centrali dotate di serbatoio della possibilità di accumulo. Hanno i pregi di utilizzare un vettore energetico rinnovabile ed estremamente economico e di non presentare emissioni inquinanti: nazioni scarsamente popolate e dotate di

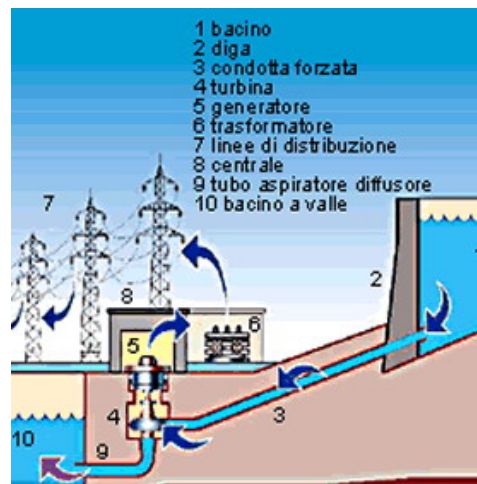


Fig. 2.1: Schema di una centrale idroelettrica.

ingenti risorse idroelettriche producono in questo modo la quasi totalità del fabbisogno elettrico. Invece in altre nazioni, tra le quali l'Italia, l'energia idroelettrica può costituire solo una frazione minoritaria della produzione totale. In questi casi le risorse idriche sono oramai da decenni sfruttate intensamente e un maggior utilizzo può risultare in conflitto con le esigenze di altre attività, come quelle agricole, e/o essere inaccettabili sotto il profilo ambientale. Inoltre le centrali idroelettriche non sono prive di *fattori di rischio* per la popolazione: si pensi al disastro del Vajont del 9 ottobre 1963 che causò oltre 2000 vittime.



Fig. 2.2: Esempio di condotte forzate.

2.1.2 Centrali termoelettriche a combustibile fossile

Le *centrali termoelettriche a combustibile fossile* bruciano olio minerale, carbone o gas per convertire la loro energia di legame chimico in vapore surriscaldato e in pressione che effettua un ciclo termodinamico nel quale vengono azionate le *turbine a vapore*.

Le centrali di questo tipo sono quelle di dimensione maggiore, con potenze elettriche che possono superare il gigawatt. Il rendimento complessivo dell'intero processo si aggira attualmente intorno al 40%, poichè nel ciclo gran parte del calore viene asportato dai sistemi di refrigerazione posti a valle delle turbine. Tale calore viene spesso disperso nell'ambiente, come nell'acqua dei fiumi a grande portata, delle lagune o del mare, producendone un modesto surriscaldamento e quindi un'alterazione del microclima. In altri casi il calore viene ceduto all'atmosfera per mezzo di torri di evaporazione. Peraltro è sempre più diffusa l'adozione di impianti che sfruttano il calore di scarto per applicazioni a bassa temperatura, come il *teleriscaldamento* di quartieri urbani o di serre agricole nel periodo invernale.

I fumi di combustione contengono anche polveri inquinanti. Benché i camini siano dotati di dispositivi elettrostatici per la captazione delle polveri, un loro abbattimento completo non viene mai raggiunto e quindi le centrali termoelettriche a combustibile fossile sono sempre causa di inquinamento atmosferico, meno grave se il combustibile è metano, più grave se si tratta di carbone, perché quest'ultimo contiene maggiori quantità di sostanze tossico-nocive e talora anche radioattive.

Limiti propri delle turbine a vapore permettono variazioni limitate della potenza erogata, tra il 70% e il 100% del valore nominale, con tempi caratteristici molto maggiori di quelli delle centrali idroelettriche. Pertanto le centrali termoelettriche sono adatte a fornire un servizio di base e a seguire solo parzialmente le variazioni giornaliere della domanda.

Dato che la fornitura di combustibile viene preferibilmente eseguita per nave, le centrali termoelettriche sono tipicamente site in zone costiere e lunghi grandi fiumi navigabili. Esse richiedono comunque siti molto vasti, non solo per la complessità dell'intero impianto, ma anche perché necessitano di ampie aree per lo stoccaggio delle scorte di combustibile, fondamentali per assicurare la continuità dell'esercizio: una centrale termoelettrica può estendersi anche per parecchie decine di ettari (vedi Figura 2.3).

2.1.3 Centrali elettronucleari

Le *centrali elettronucleari* differiscono da quelle termoelettriche a combustibile fossile perché il calore viene prodotto dalle reazioni nucleari di fissione dell'*uranio* o del *plutonio* all'interno del *nocciolo*. Il calore prodotto viene quindi ceduto ad un fluido refrigerante primario in un circuito chiuso che a sua volta lo cede all'acqua di un circuito secondario portandola allo stato di



Fig. 2.3: Esempio di centrale termoelettrica.

vapore. Il vapore prodotto realizza quindi un ciclo termodinamico analogo a quello delle centrali termoelettriche a combustibile fossile.

Le centrali elettronucleari devono operare a potenza praticamente costante, dato che le variazioni di regime del nocciolo richiedono transitori lentissimi. Si prestano pertanto a fornire esclusivamente un servizio di base. Anche le centrali nucleari sorgono su siti di vasta dimensione come si evince dall'esempio riportato in Figura 2.4.



Fig. 2.4: Esempio di centrale elettronucleare.

Anche le centrali elettronucleari non sono prive di fattori di rischio, si pensi all'incidente di Chernobyl del 26 Aprile 1986, anche se questa centrale era sprovvista di molti fondamentali sistemi di sicurezza passiva e attiva.

2.1.4 Centrali geotermiche

Le *centrali geotermiche* sono simili alle centrali termoelettriche, salvo che non bruciano combustibili ma sfruttano il *calore endogeno della terra* per produrre

direttamente il vapore utilizzato nel ciclo termodinamico. Uno schema di principio è riportato in Figura 2.5.

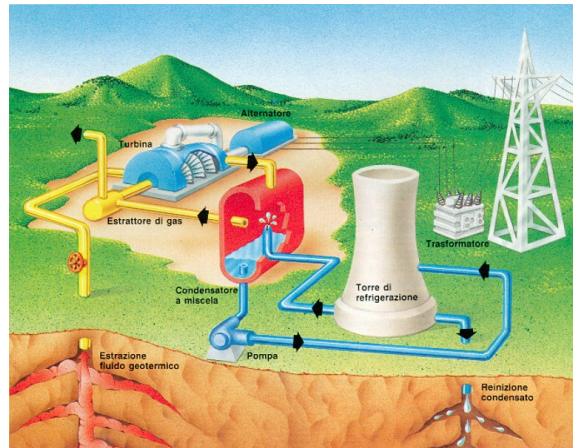


Fig. 2.5: Schema di funzionamento di una centrale geotermica.

Tali impianti possono quindi essere realizzati solo ove siano presenti *campi geotermici*, come avviene a Larderello, in Toscana.

2.1.5 Centrali mareomotrici

Le *centrali mareomotrici* sono analoghe alle centrali idroelettriche, salvo che sfruttano l'energia delle maree. Un esempio di questo tipo di centrale è raffigurato in Figura 2.6.



Fig. 2.6: Esempio di centrale mareomotrice.

Esse possono divenire economicamente interessanti quando le fluttuazioni del livello marino assumono valori rilevanti, come avviene in Francia e in Canada, dove si verificano maree anche di 15 metri.

2.1.6 Centrali eoliche

Le *centrali eoliche* sfruttano l'energia del vento che captano con grandi eliche (**aerogeneratori**) a due o tre pale. I generatori elettrici che esse azionano di norma sono alternatori sincroni, connessi a convertitori c.a./c.c. per caricare batterie di accumulatori, in modo da poter garantire la continuità del servizio anche in assenza di vento. Un esempio di un sito dove sorge una centrale eolica è riportata in Figura 2.7.



Fig. 2.7: Esempio di sito ospitante una centrale eolica.

Queste centrali risultano convenienti solo dove spirano venti costanti con velocità di almeno 6 m/s. Vengono impiegate soprattutto in luoghi ben ventilati e scarsamente abitati, dove risulta poco conveniente portare un'alimentazione elettrica convenzionale, come ad esempio in zone montane isolate o su piccole isole. Hanno lo svantaggio di causare un forte inquinamento acustico e di dipendere dai fattori climatici.

2.1.7 Centrali solari

Le *centrali solari* sfruttano l'energia della radiazione solare che convertono direttamente in energia elettrica per mezzo di cellule fotovoltaiche, secondo lo schema di principio riportato in Figura 2.8. A causa del basso rendimento che esse offrono, solo una modesta frazione della radiazione luminosa viene convertita in potenza elettrica generata, che pertanto non supera qualche decina di watt per ogni metro quadro di superficie captante, anche nelle migliori condizioni di insolazione. Quindi allo stato attuale per produrre quantità rilevanti di potenza elettrica sarebbe necessario impegnare estensioni di terreno improponibili. Un esempio di installazione di *pannelli solari* è riportata in Figura 2.9.

Per questo motivo la produzione di energia elettrica per conversione dalla radiazione solare è limitata a situazioni particolari (piccole utenze

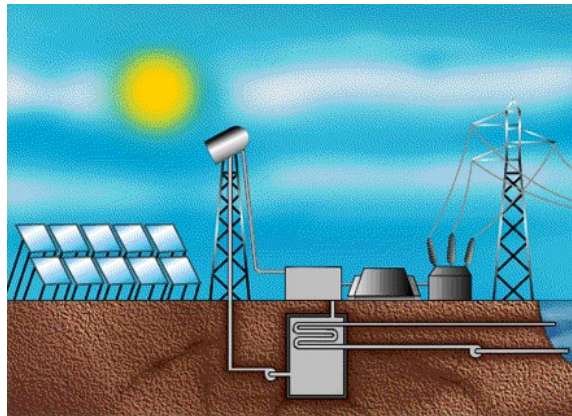


Fig. 2.8: Schema di principio di una centrale solare.

domestiche, boe marine, rifugi montani, satelliti artificiali, ecc.). Le centrali solari hanno inoltre lo svantaggio di dipendere dai fattori climatici.



Fig. 2.9: Esempio di centrale solare.

2.1.8 Altre forme di generazione

Esistono ulteriori tipi di centrali di generazione, in genere capaci di produrre piccole potenze elettriche. Tra esse possono essere considerate anche quelle di tipo termoelettrico nelle quali il calore che aziona le turbine è fornito dalla combustione dei *rifiuti solidi urbani* e delle *biomasse*.

Vanno anche ricordati i *gruppi elettrogeni*, sempre di potenza limitata, nei quali il generatore è azionato da un motore a combustione interna (in genere a ciclo diesel), che trovano frequente impiego nelle applicazioni mobili e nei gruppi di continuità.

2.2 Linee elettriche di potenze

Le **linee elettriche** interconnettono i componenti di un sistema elettrico di potenza e differiscono tra loro per estensione e potenza nominale e quindi anche per tensione nominale, dato che la trasmissione viene effettuata a livelli di tensione tanto più elevati quanto maggiori sono le potenze da trasmettere e le distanze da coprire.

2.2.1 Linee elettriche di trasporto o trasmissione

Le centrali di generazione sono direttamente collegate alla rete magliata costituita dalle **linee di trasporto o trasmissione**, che hanno estensioni nazionali in AAT (380 kV) e regionale in AAT (220 kV). Si tratta di linee trifase senza neutro (a triangolo), collegate nelle centrali di generazione e nelle *stazioni di trasformazione*, a trasformatori di grande potenza che hanno i centri stella degli avvolgimenti di AAT connessi a terra.

2.2.2 Linee elettriche di distribuzione

Le **linee di distribuzione** sono caratterizzate da raggi medi dei bacini di utenza più ridotti. Possono avere strutture magliate o ad anello, ma sono anche frequente le strutture ramificate.

Esse si distinguono a seconda del livello di tensione.

- **Linee di distribuzione in AT (132 kV):** sono trifase senza neutro (a triangolo) e hanno struttura magliata ad estensione regionale. Nelle stazioni di trasformazione sono collegate a trasformatori di grande potenza che sono alimentati dalle linee di trasmissione in AAT e hanno gli avvolgimenti secondari, lato AT, con centri stella connessi a terra.
- **Linee di distribuzione in MT (20 kV):** sono trifase senza neutro (a triangolo) e hanno struttura ramificata ad estensione comunale o intercomunale. Sono collegate a trasformatori di media potenza installati in *cabine primarie*, che sono alimentati dalle linee di distribuzione in AT e hanno gli avvolgimenti secondari, lato MT, collegati a triangolo o a stella con centro stella isolato. Raggiungono le *cabine secondarie* che possono appartenere all'Ente erogatore oppure ai grandi utenti industriali e civili, per i quali è prevista la fornitura MT.
- **Linee di distribuzione in BT (380/220 V):** sono trifase con neutro (a stella) a struttura ramificata e diffusione capillare sul territorio. Sono alimentate da trasformatori di piccola potenza installati nelle *cabine secondarie*. Gli avvolgimenti possono essere a stella con centro stella connesso al neutro. Alimentano le piccole utenze in trifase a 380 V o monofase a 220 V.

2.3 Stazioni e cabine di trasformazione

Nelle stazioni e cabine di trasformazione si realizza la variazione dei livelli di tensione permettendo l'interconnessione dei diversi sottoinsiemi:

- nelle *stazioni* sono interconnesse le linee AAT e quelle AT;
- nelle *cabine primarie* sono interconnesse le linee AT e quelle MT;
- nelle *cabine secondarie* sono interconnesse le linee MT e quelle BT.

Esse sono provviste di trasformatori trifasi di potenza ed anche di molte altre apparecchiature, quali componenti per la misura ed il monitoraggio (amperometri, voltmetri, wattmetri, ecc.), elementi di protezione e manovra (interruttori, fusibili, scaricatori, sezionatori, ecc.) ed anche componenti che svolgono altre funzioni (ad esempio condensatori di rifasamento).

Il Trasporto dell'Energia Elettrica

LA corrente elettrica è trasportata nei diversi nodi attraverso le **linee elettriche**, che sono principalmente costituite da più conduttori (fili, funi, sbarre, ecc.) mutuamente isolati, che si sviluppano parallelamente per interconnettere apparecchiature elettriche come generatori, trasformatori, carichi, ecc.

Trovano impiego sia nei *sistemi elettrici di potenza* che in quelli *di segnale* e in entrambi i casi si presentano in una grande varietà di tipologie:

- **Numero di conduttori.** Nei sistemi in corrente continua si impiegano **linee bifilari** (a due conduttori) e **linee unifilari** (a un conduttore); in quest'ultimo caso la funzione di un conduttore è svolto dal terreno o dall'acqua. nei sistemi in corrente alternata monofase si impiegano *linee bifilari*, mentre nei sistemi trifase senza neutro e con neutro, si utilizzano linee a tre e quattro conduttori, rispettivamente. In ogni caso la sezione dei conduttori dipende dalla corrente nominale della linea.
- **Isolamento.** Esistono **linee aeree** e **linee in cavo**. Le prime impiegano conduttori nudi, cioè privi di isolamento solido, opportunamente distanziati tra loro. Nelle seconde i singoli conduttori sono dotati di guaine isolanti. Gli spessori dei dielettrici interposti, le distanze tra i vari conduttori e gli spessori delle guaine dei cavi, dipendono dalla tensione nominale della linea.
- **Estensioni.** Le linee elettriche possono estendersi per varie centinaia di chilometri, come avviene nei grandi elettrodotti per la trasmissione dell'energia elettrica.

3.1 Linee aeree

Le *linee aeree* trovano impiego fondamentale nei sistemi elettrici di potenza in alternata (linee aeree di trasmissione dell'energia elettrica o *elettrodotti*): si tratta di linee trifasi con tensioni nominali che vanno tipicamente dai 10 kV ai 380 kV e in taluni casi raggiungono e superano i 1000 kV; le correnti nominali possono raggiungere alcuni kA.

Si impiegano conduttori nudi con struttura a fune, sospesi mediante supporti isolanti detti *isolatori a pali* o *tralicci* (questi ultimi sono impiegati nelle linee a tensione più elevata), vedi Figura 3.1. Le distanze dei conduttori mutui e verso terra devono garantire la *tenuta dielettrica* nelle condizioni atmosferiche più sfavorevoli. L'altezza minima da terra, a metà *campata* tra due sostegni successivi, deve garantire l'incolumità delle persone e degli animali che transitano sotto la linea. Esistono anche limiti sulle distanze massime tra i conduttori e verso terra, volte a contenere l'impatto ambientale. Gli elettrodotti di maggiore potenza comprendono spesso due terne di



Fig. 3.1: Esempio di traliccio per il trasporto dell'energia elettrica.

conduttori, collegate in parallelo. oltre ai conduttori di linea è generalmente un ulteriore conduttore, detto *fune di guardia*, che connette fra loro le estremità dei tralicci metallici, è equipotenziale con essi e con il terreno e serve a proteggere l'elettrodo dalle fulminazioni atmosferiche.

Le linee aeree sono anche usate nella *trazione elettrica* ferroviaria, metropolitana e tranviaria, prevalentemente in corrente continua con tensioni tipicamente comprese tra 600 V e 3 kV. Per la trazione ferroviaria si ricorre anche alla corrente alternata monofase con tensione fino a 25 kV.

3.2 Linee in cavo

Nei sistemi elettrici di potenza in alternata trovano impiego **linee in cavo** trifasi o monofasi per tensioni fino a qualche centinaio di chilovolt e per estensioni non superiori a poche decine di chilometri.

Nei sistemi elettrici di potenza in continua, usati per i collegamenti sottomarini, si utilizzano linee in cavo unifilari o bifilari, con tensioni fino a qualche centinaio di chilovolt ed estensioni anche superiori al centinaio di chilometri.

Per le guaine dei cavi si usano materiali isolanti (gomma sintetica, polietilene, PVC). Si ricorre a *cavi unipolari* affiancati l'un l'altro oppure a *cavi multipolari* nei quali i singoli conduttori, isolati tra loro, sono raccolti all'interno di una matrice isolante che ha anche funzione meccanica. spesso i cavi sono racchiusi entro una calza conduttrice che serve da schermo elettrostatico e protezione meccanica. Il tutto è contenuto in un'ulteriore guaina isolante (vedi Figura 3.2). Grazie al loro limitato ingombro rispetto alle li-

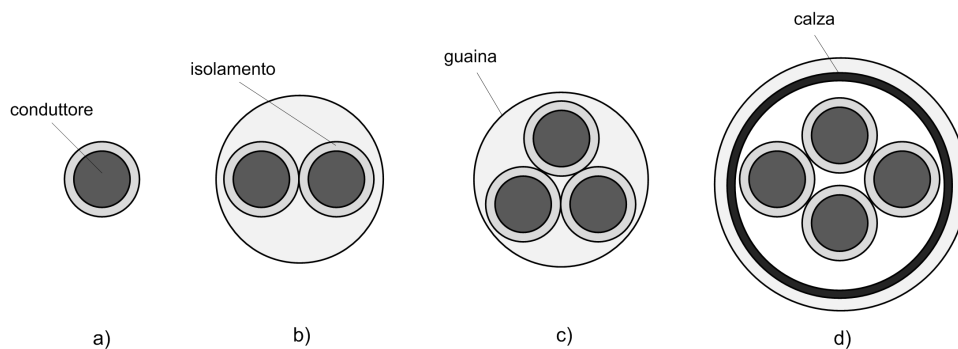


Fig. 3.2: Schemi di cavi unipolare a); bipolare b); tripolare c) e quadripolare con calza d).

nee aeree i cavi presentano grande versatilità di installazione mentre il loro isolamento conferisce un elevato grado di sicurezza. Esistono cavi dotati di guaine protettive adatte per installazioni all'esterno, in particolare per pose interrate o sommerse.

3.3 Schemi equivalenti

In una linea, sia essa aerea o in cavo, si sviluppano i seguenti fenomeni elettromagnetici:

- dissipazione ohmica di potenza associata alle correnti dei conduttori;
- accumulo di energia induttiva, associata alle correnti dei conduttori;
- dissipazione di potenza associata alle tensioni tra i conduttori;
- accumulo di energia capacitiva, associata alle tensioni tra i conduttori e verso terra.

Per effetto di tali fenomeni, in regime variabile, le tensioni tra i conduttori e le correnti non solo variano in funzione del tempo, ma in un determinato istante possono presentare valori diversi nelle diverse sezioni della linea. La descrizione accurata del suo comportamento richiede quindi un **modello a costanti distribuite**, con cui ad ogni tratto dl vengono attribuite resistenza, induttanza, conduttanza e capacità che tengono conto dei relativi fenomeni elettromagnetici.

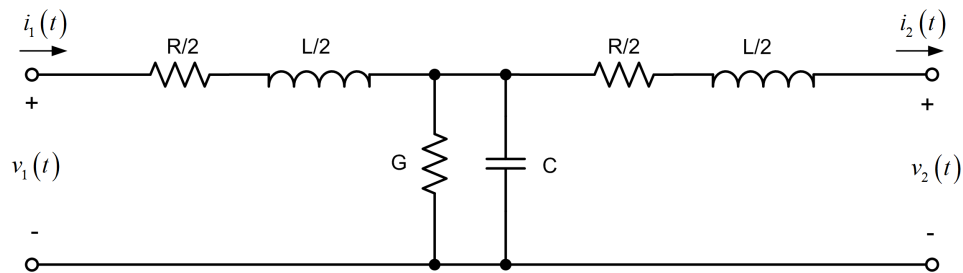


Fig. 3.3: Modello di linea bifilare.

In una prima approssimazione può essere adottato un **modello semplificato a costanti concentrate**: nel caso di una **linea bifilare** si può considerare il doppio bipolo di Figura 3.3, costituito dai bipoli ideali aventi parametri R , L , C e G . I primi due sono anche detti *parametri longitudinali* e sono associati ai fenomeni legati alla corrente dei conduttori; gli ultimi due sono detti *parametri trasversali* e sono correlati alla tensione tra essi.

In realtà le approssimazioni introdotte da tale modello sono tanto più accettabili quanto più trascurabili sono i fenomeni di *propagazione elettromagnetica* che si manifestano nella linea, vale a dire quanto più è breve la linea e quanto più lente sono le variazioni temporali di tensioni e correnti. In particolare alla *frequenza industriale* di 50 Hz il modello può ritenersi adeguato per linee di lunghezza inferiore a qualche centinaio di chilometri.

Descriviamo brevemente quali siano i valori dei parametri del modello in Figura 3.3:

- **Resistenza longitudinale.** Per una linea bifilare di lunghezza l , costituita da due conduttori di resistività ρ e sezione S , la *resistenza longitudinale* è esprimibile come:

$$R = \frac{2\rho l}{S} \quad (3.1)$$

di solito vengono impiegati ottimi conduttori, come il rame ($\rho = 2 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$) o l'alluminio ($\rho = 2,8 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$).

- **Induttanza longitudinale.** Per una linea bifilare di lunghezza l , costituita da due conduttori con sezione circolare di raggio $r_0 = \sqrt{S/\pi}$, posti a distanza h , l'*induttanza longitudinale* è esprimibile come

$$L = \frac{\mu l}{\pi} \left(\ln \frac{h}{r_0} + \frac{1}{4} \right) \quad (3.2)$$

il primo addendo in parentesi tiene conto dell'induzione esterna ai conduttori, il secondo di quella interna; mentre quest'ultimo è costante, il primo varia debolmente con h e r_0 .

- **Capacità trasversale.** Per una linea bifilare di lunghezza l , costituita da due conduttori con sezione circolare di raggio r_0 , posti a distanza h , la *capacità trasversale* è esprimibile come

$$C = \frac{\varepsilon \pi l}{\ln \frac{h-r_0}{r_0}} \quad (3.3)$$

- La **conduttanza trasversale** dipende dai fenomeni dissipativi che si verificano nel dielettrico interposto tra i due conduttori. Può essere trascurata poiché risulta sempre di modesta entità.

3.3.1 Schema della linea in continua

In regime stazionario le induttanze equivalgono a cortocircuiti e le capacità a circuiti aperti, quindi per una **linea bifilare** in continua, lo schema equivalente è quello riportato in Figura 3.4, derivato da quello di Figura 3.3, dove compare solo la resistenza longitudinale R dei due conduttori, con valore pari alla (3.1). Questo modello è valido anche per una **linea unifilare** in continua, ma in questo caso va considerata la resistenza del singolo conduttore e si ha $R = \rho l/S$, pari a metà della (3.1).

3.4 Topologia delle linee elettriche di potenza

Una linea elettrica compresa in un sistema elettrico di potenza può alimentare uno o più carichi. In relazione alle condizioni di alimentazione della linea si possono presentare le seguenti topologie.

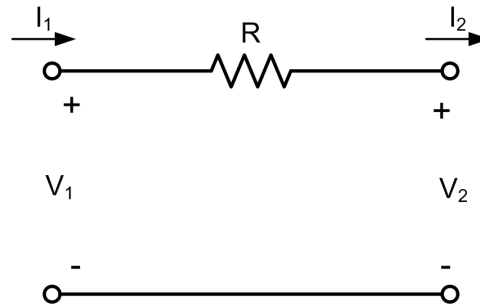


Fig. 3.4: Modello circuitale di una linea bifilare in corrente continua.

- **Linea a sbalzo.** La linea è alimentata da una sola estremità, ove viene fornita tutta la potenza assorbita dai carichi; si può presentare solo un carico connesso all'estremità opposta (Figura 3.5 a)) oppure più carichi distribuiti lungo la linea (Figura 3.5 b)). Questa è la topologia più semplice ma garantisce la minore continuità di esercizio, dato che in caso di interruzione, tutti i carichi a valle di essa rimangono privi di alimentazione.
- **Linea alimentata alle due estremità.** L'alimentazione alle due estremità avviene tipicamente alla stessa tensione (Figura 3.5 c)). Tale topologia garantisce una buona continuità di esercizio dato che interrompendo la linea, tutti i carichi continuano ad essere alimentati da un'estremità all'altra.
- **Linea ad anello.** La linea è chiusa su se stessa in modo da formare un anello ed è alimentata in corrispondenza di una sua qualunque sezione (Figura 3.5 d)). Il comportamento è analogo a quello della linea alimentata alle due estremità.

3.5 Caduta di tensione sulla linea

I generatori che alimentano una linea di potenza applicano un livello di tensione V_A pressoché costante, indipendentemente dalle condizioni di carico. Parametro fondamentale della linea è la **caduta di tensione** sulla linea:

$$\Delta V = V_A - V_{min} \quad (3.4)$$

per le linee in continua V_A è la tensione applicata dal generatore e V_{min} la tensione minima applicata all'utente più sfavorito. Per le linee in alternata V_A e V_{min} sono valori efficaci; per le linee trifasi si fa riferimento alle tensioni concatenate. La caduta di tensione dipende dalle caratteristiche elettriche della linea ma anche dal numero di carichi, dalla loro dislocazione e dalle potenze che assorbono.

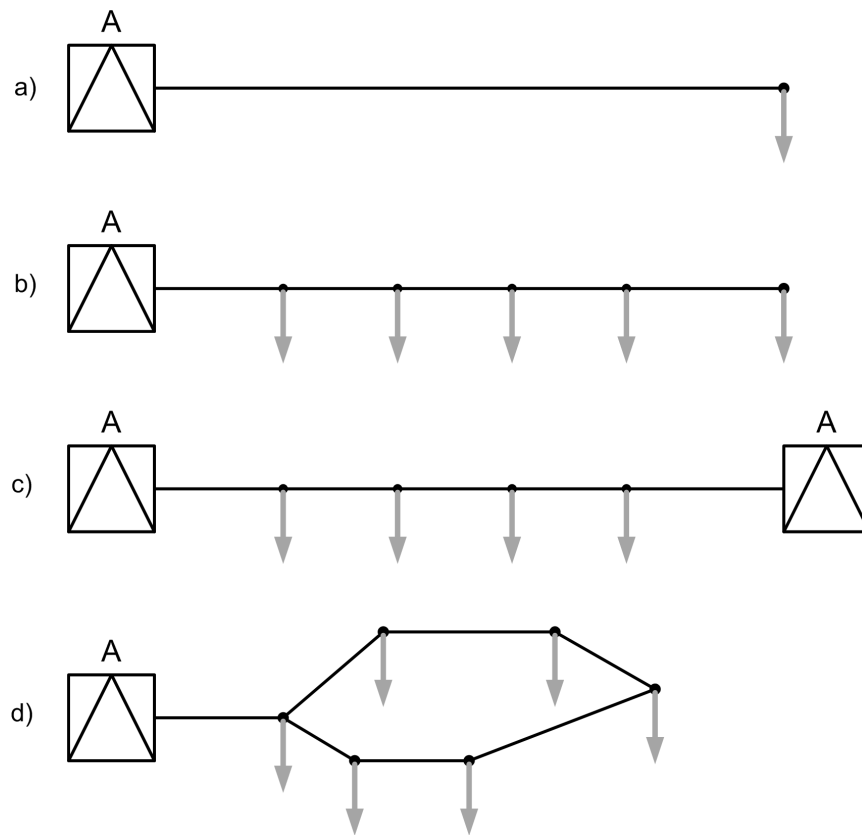


Fig. 3.5: Esempi di topologia di una linea elettrica: linea a sbalzo a) e b); linea alimentata alle due estremità c); linea ad anello d).

Le linee elettriche sono dimensionate in modo tale che in ogni condizione normale di funzionamento ΔV sia sempre molto contenuta, entro pochi per cento della tensione di alimentazione, per garantire che ai carichi siano applicate tensioni che si scostano di poco dalla tensione nominale. Una valutazione sufficientemente accurata della caduta di tensione in linea può essere eseguita assumendo di conoscere le correnti assorbite dai carichi e, nel caso di sistemi in alternata, anche i fattori di potenza $\cos \phi$ e la loro natura.

Si consideri ora una linea bifilare a sbalzo che alimenta k carichi di potenza nominale P_{nh} (con $h = 1, \dots, k$) posti nelle sezioni alle distanze l_{Ah} dall'estremità A ove è collegato il generatore, come illustrato in Figura 3.6. Ai fini del calcolo della caduta di tensione si può assumere che la linea

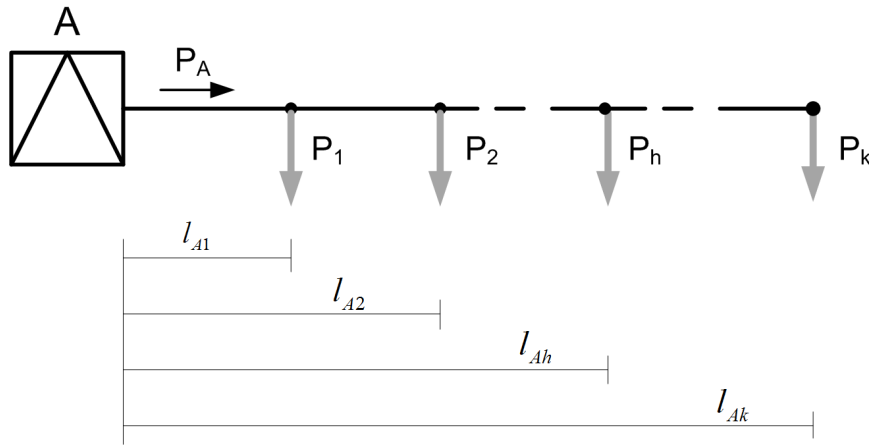


Fig. 3.6: Esempio di linea bifilare a sbalzo che alimenta k carichi.

sia alimentata a tensione imposta V_A , come se il generatore fosse ideale. Si applica quindi il teorema di sostituzione ai carichi, ponendo al loro posto generatori ideali di corrente che imprimono le loro correnti I_h e rappresentando i tratti di linea con le loro rappresentazioni simboliche. Si ottiene lo schema equivalente di Figura 3.7. L'impedenza della linea dall'estremità A

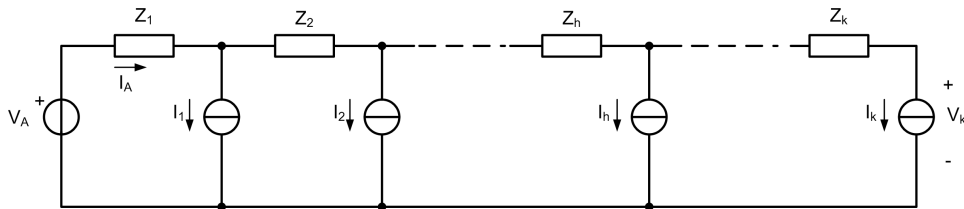


Fig. 3.7: Modello circuitale di una linea a sbalzo.

fino alla sezione di prelievo h -esima, vale:

$$Z_{Ah} = \sum_{i=1}^h Z_i = R_{Ah} + jX_{Ah} = \left(\frac{2\rho}{S} + j2X_l \right) l_{Ah} \quad (3.5)$$

Si consideri ora una linea bifilare alimentata alle due estremità e che alimenti k carichi di potenza nominale P_{nh} (con $h = 1, \dots, k$) posti nelle sezioni alle distanze l_{Ah} dall'estremità **A**, come indicato in Figura 3.8. Anche in questo

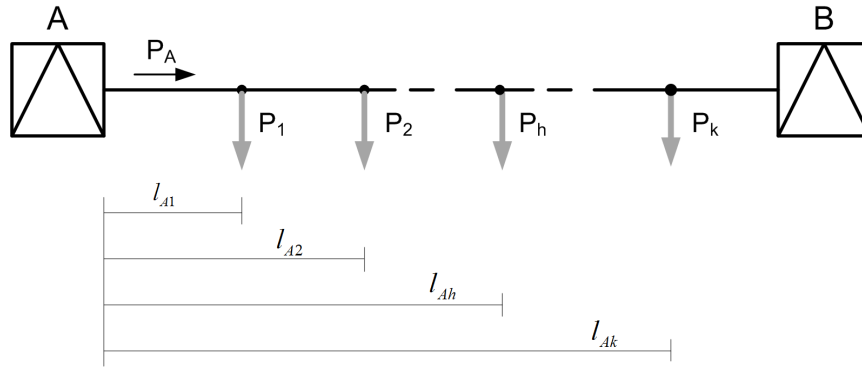


Fig. 3.8: Esempio di linea bifilare alimentata alle due estremità che alimenta k carichi.

caso si possono sostituire i generatori con due generatori ideali di tensione e k generatori ideali di corrente. I tratti di linea sono rappresentati dalle impedenze Z_h e il circuito equivalente è riportato in Figura 3.9.

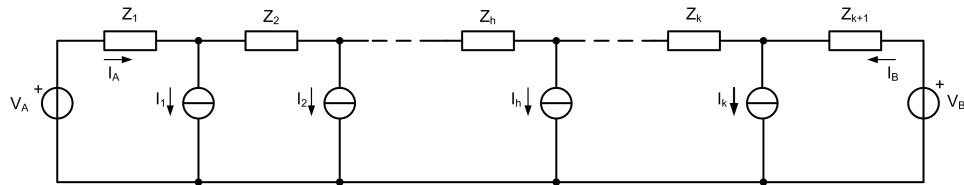


Fig. 3.9: Modello circuitale di una linea alimentata alle due estremità.

3.6 Comportamento termico delle linee

Una linea percorsa da corrente è sede di dissipazione per *effetto Joule*, che ne provoca il riscaldamento. La **sovratemperatura** rispetto all'ambiente produce uno scambio termico per convezione ed irraggiamento, così la temperatura della linea sale fino a raggiungere l'equilibrio termico.

- **Linee aeree.** In una linea aerea realizzata con conduttori privi di isolamento, le dissipazioni sono in genere tali da comportare un sovrariscaldamento modesto.

- **Linee in cavo.** L'isolamento peggiora lo scambio termico con l'ambiente e impone di limitare la temperatura massima onde prevenire il danneggiamento. Per questo motivo i costruttori forniscono tabelle che indicano, per ogni tipo di cavo e per ogni *sezione normalizzata* S , la corrente massima in regime permanente, detta **portata del cavo**, corrispondente alle diverse condizioni di posa.

Un fenomeno specifico che si manifesta solo nei conduttori delle linee in alternata è l'**effetto pelle**, caratterizzato dallo *spessore di penetrazione*, che per il rame e per la frequenza industriale $f = 50$ Hz vale circa 10 mm. Quindi se i conduttori hanno diametri superiore ad un paio di centimetri si verifica una cattiva utilizzazione della loro sezione e dissipazioni elevate. Per tale motivo 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 dimensionata per la totale corrente elettrica. L'anima di acciaio ha solo funzione meccanica, consentendo una maggiore lunghezza delle campate tra i tralicci.

Componenti dei Sistemi Elettrici

I SISTEMI elettrici di potenza e le apparecchiature elettriche comprendono una grande varietà di componenti: una certa quantità di questi componenti serve al normale utilizzo, mentre altri ancora sono necessari alla protezione in caso di guasto. Alla descrizione dei principali di questi conviene premettere alcune sintetiche considerazioni di carattere generale.

4.1 Sovratensioni e sovracorrenti

4.1.1 Sovratensioni

In un sistema elettrico possono manifestarsi tensioni superiori a quelle nominali, definite **sovratensioni**, che possono essere così distinte:

- *sovratensioni di origine interna*: sono dovute a *manovre* di chiusura o apertura di circuiti (*sovratensione di manovra*), oppure a rapide variazioni di carico o a fenomeni di risonanza. Possono anche essere causati da guasti, quali contatti accidentali e cedimenti di isolamenti. Queste sovratensioni possono superare di alcune volte le tensioni nominali ed hanno di norma tempi caratteristici di evoluzione (*transitori*) dell'ordine dei millisecondi;
- *sovratensioni di origine esterna*: sono dovute a fenomeni di induzione o a fulminazioni dirette (*sovratensioni di origine atmosferica*). Esse presentano intensità molto maggiori delle tensioni nominali e fronti assai ripidi, tipicamente con tempi di salita dell'ordine del microsecondo o meno e tempi di discesa di qualche decina di microsecondo.

Le sovratensioni possono produrre il cedimento degli isolamenti di uno o più componenti che, se solidi, possono risultare danneggiati in modo irreversibile. La conseguente scarica elettrica può produrre un cortocircuito

dove si dissipa una grande energia, provocando anche delle vere e proprie esplosioni. Per prevenire tali inconvenienti, gli isolamenti dei componenti elettrici sono dimensionate per tensioni molto maggiori delle nominali, garantendo così un elevato margine di sicurezza.

4.1.2 Sovracorrenti

In un sistema elettrico possono manifestarsi correnti superiori a quelle nominali, chiamate **sovracorrenti**, che possono essere così definite

- *sovracorrenti dovute a sovraccarico transitorio*: possono verificarsi a seguito di *manovre*, quali l'avviamento di motori asincroni o l'inserzione di trasformatori a vuoto. In tal caso l'apertura è inopportuna e dannosa;
- *sovracorrenti dovute a sovraccarico permanente*: si verificano ad esempio quando vengono inseriti utilizzatori con potenza complessiva maggiore di quella per la quale è dimensionato l'impianto e comportano un comportamento un lento surriscaldamento dei conduttori. Per prevenire sovratemperature pericolose è necessario aprire i circuiti solo nel caso in cui la sovracorrente permanga a lungo;
- *sovracorrente di cortocircuito (o di guasto)*: si manifestano quando tra due elementi non equipotenziali si stabilisce un collegamento elettrico accidentale, che crea una maglia a bassa impedenza, detto **anello di guasto**, dove si instaura in tempi brevissimi la **corrente di cortocircuito (o di guasto)** che ha carattere persistente e valore efficace anche molto maggiore di quello nominale. I conduttori subiscono quindi un rapido surriscaldamento ed intense sollecitazioni elettrodinamiche, che possono produrre la distruzione rispettivamente per fusione e cedimento meccanico. In questo caso è necessaria l'apertura tempestiva del circuito.

Per proteggere i circuiti elettrici contro le sovracorrenti sono quindi necessari dispositivi capaci di aprirli in modo selettivo, discriminando le entità e le durate delle sovracorrenti. Sovratensioni e sovracorrenti sono spesso correlate, ad esempio una sovratensione può causare il cedimento dell'isolamento producendo così un cortocircuito che diviene a sua volta causa di una sovracorrente.

4.2 Apertura e chiusura dei circuiti elettrici

Si possono distinguere i seguenti casi di apertura di un circuito elettrico, in ordine crescente di severità:

1. **apertura a vuoto**: con corrente nulla (o molto minore di quella nominale);

2. **apertura a carico:** con corrente non nulla ma non superiore a quella nominale;
3. **apertura con sovracorrente:** con corrente maggiore di quella nominale.

Quando avviene in presenza di corrente elettrica, a carico o con sovratensione, l'apertura del circuito comporta l'*interruzione della corrente*.

Esistono diversi tipi di *dispositivi di apertura*, ciascuno dei quali si caratterizza per la capacità di effettuare l'apertura in uno o più dei casi elencati. Negli impianti di potenza l'apertura viene tipicamente eseguita separando due contatti, detti *elettrodi* o *poli*, inizialmente in contatto elettrico. Nei dispositivi di apertura reversibili (*interruttori*, *sezionatori*) questi elettrodi, fortemente premuti l'un l'altro a circuito chiuso, vengono separati e allontanati. Per l'apertura con sovracorrente trovano impiego, oltre agli interruttori di potenza, anche dispositivi non reversibili (*fusibili*), nei quali la separazione degli elettrodi si realizza con la distruzione di un elemento conduttore che li connette a circuito chiuso.

Tra i due elettrodi separati si frappone un mezzo dielettrico, in genere fluido, idoneo a sopportare la tensione applicata tra essi a circuito aperto. Nei dispositivi destinati ad aprire nelle condizioni più severe (interruttori di potenza e fusibili) gli elettrodi e il mezzo dielettrico sono contenuti all'interno di un'apposita *camera di interruzione*.

Quando l'apertura avviene in presenza di corrente, questa non si interrompe istantaneamente al cessare del contatto elettrico tra gli elettrodi, ma permane per un certo tempo attraverso un **arco elettrico**. Se l'apertura è effettuata allontanando gli elettrodi l'uno dall'altro, prima ancora del loro distacco la superficie di contatto tra essi diminuisce riducendosi a pochi punti ove la corrente si addensa causando intensi surriscaldamenti localizzati. Qui al distacco si producono elettroni liberi per emissione termoionica, che vengono accelerati dall'intenso campo elettrico dovuto alla tensione presente tra gli elettrodi ancora molto vicini. Questi elettroni urtano le molecole del fluido dielettrico, ionizzandolo ed innescando così tra gli elettrodi un arco elettrico che consente il perdurare della corrente, come è illustrato in Figura 4.1.

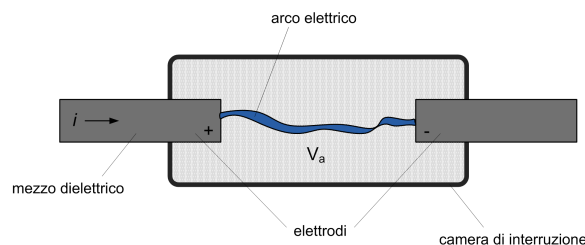


Fig. 4.1: Esempio di arco elettrico.

L'arco elettrico si comporta come un *resistore non lineare* con tensione d'arco v_a che è una funzione decrescente della corrente i . In esso viene dissipata la potenza $P_a = v_a i$ che, se l'arco permane troppo a lungo, provoca la rapida erosione degli elettrodi e perfino l'esplosione del dispositivo di apertura. Inoltre la tensione d'arco v_a cresce all'aumentare della distanza tra gli elettrodi (allungamento dell'arco) e al diminuire della temperatura, man mano che il fluido deionizza (raffreddamento dell'arco). Queste dipendenze sono importanti affinché l'arco può estinguersi, oltre che spontaneamente, allorché l'evoluzione circuitale fa annullare la corrente, anche rendendo la tensione d'arco maggiore della tensione che il circuito esterno applica tra gli elettrodi.

A corrente azzerata, l'arco si reinnesca se la tensione applicata dal circuito esterno risulta maggiore di quella che comporta la reionizzazione del fluido, detta **tensione di ripresa** v_r . Anche questa cresce all'aumentare della distanza tra gli elettrodi e al diminuire della temperatura del fluido.

In conclusione sia v_a che v_r crescono se si allontanano gli elettrodi e si raffredda il fluido dielettrico.

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 reinnescimento dopo il primo azzeramento, l'arco si spegne nuovamente al successivo zero di corrente e un ulteriore reinnescimento risulta poco probabile, dato che nel frattempo la v_r è aumentata, quindi di norma, dopo alcuni periodi l'estinzione è definitiva.

La corrente continua, contrariamente a quella sinusoidale, 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.

La **chiusura** di un circuito elettrico può avvenire in presenza o assenza di tensione. Spesso è effettuata da un dispositivo reversibile 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'innescamento 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*. La chiusura può inoltre provocare le sovracorrenti precedentemente descritte.

4.3 Interruttori di potenza

L'*interruttore elettrico di potenza* è un componente reversibile di manovra e protezione, capace di aprire e chiudere un circuito allontanando ed avvicinando gli elettrodi. Esistono *interruttori unipolari* che aprono e chiudono una

sola coppia di elettrodi, ma anche *interruttori multipolari* (*bipolari, tripolari,...*) dotati di più coppie di elettrodi, azionate da un unico attuatore meccanico.



Fig. 4.2: Simbolo grafico di un interruttore di potenza manuale a) ed automatico b).

La manovra può essere sia *manuale*, comandata da un operatore, che *automatica*, asservita ad un dispositivo detto **relè** che interviene allorché rileva specifiche condizioni anomale. Negli schemi impiantistici gli interruttori di potenza con comando manuale ed automatico vengono rappresentati con gli schemi riportati nella parte a) e b) rispettivamente di Figura 4.2.

I limiti di funzionamento di un interruttore, dichiarati dal costruttore e certificati da prove eseguite in laboratori qualificati, sono specificati principalmente dai seguenti parametri:

- *tensione nominale di esercizio* V_n : costituisce i livelli di tensione che, in condizioni di normale funzionamento, può essere applicata tra i diversi poli e tra i due elettrodi di uno stesso polo quando sono aperti. Nel caso di sistemi trifase V_n rappresenta la tensione concatenata;
- *corrente nominale* I_n : costituisce la massima corrente di regime permanente che l'interruttore può portare quando è chiuso;
- *potere nominale di interruzione* I_{in} : costituisce la massima corrente che l'interruttore è in grado di interrompere; essendo sempre $I_{in} > I_n$ è necessario che l'interruzione della corrente sia tempestiva.

4.4 Sezionatori

Il **sezionatore** è un dispositivo reversibile di manovra idoneo ad eseguire l'apertura in assenza di corrente (a vuoto) e la chiusura in assenza di tensione tra gli elettrodi. Entrambe le manovre solitamente sono lente e possono essere sia manuali che motorizzate. Non dovendo in alcun caso avvenire a carico, sono in genere asservite ad un dispositivo di interblocco. La Figura 4.3 rappresenta un sezionatore.

Un sezionatore è caratterizzato dalla *tensione nominale di esercizio* V_n e dalla *corrente nominale* I_n , definite come per gli interruttori, ed anche dalla *corrente di cortocircuito di breve durata* I_{cc} che costituisce la massima corrente che il sezionatore in posizione di chiusura può sopportare per il tempo di un secondo. A parità di tensioni e correnti nominali, i sezionatori sono più economici degli interruttori. Negli schemi impiantistici vengono rappresentati con lo schema di Figura 4.4.

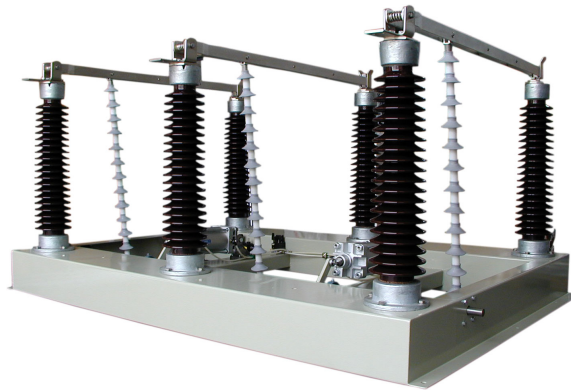


Fig. 4.3: Esempio di sezionatore trifase.



Fig. 4.4: Simbolo grafico di un sezionatore.

4.4.1 Interruttore di manovra

L'*interruttore di manovra* (o *sezionatore sotto carico*) è un dispositivo reversibile di manovra idoneo ad eseguire l'apertura e la chiusura a carico con correnti e tensioni non maggiori di quelle nominali. Entrambe le manovre devono essere quindi relativamente rapide, come negli interruttori, e ciò si ottiene usualmente con molle precaricate che entrano in funzione quando la manovra viene avviata da un dispositivo di sgancio, azionato manualmente o automaticamente.

Un interruttore di manovra è caratterizzato dalla *tensione nominale di esercizio* V_n , dalla *corrente nominale* I_n e dalla *corrente di cortocircuito di breve durata* I_{cc} , definite come per i sezionatori. A parità di tensioni e correnti nominali gli interruttori di manovra sono più economici degli interruttori di potenza, ma più costosi dei semplici sezionatori. Negli schemi impiantistici



Fig. 4.5: Simbolo grafico di un interruttore di manovra manuale a) e automatico b).

vengono rappresentati con lo schema di Figura 4.5.

4.4.2 Teleruttori o contattori

Analogamente all'interruttore di manovra il **teleruttore** o **contattore** è un dispositivo reversibile di manovra, idoneo ad eseguire l'apertura e la chiusura a carico, con correnti e tensioni non superiori di quelle nominali. Sono

impiegati principalmente in bassa tensione anche se ne esistono modelli per la media tensione. A parità di valori nominali sono molto più economici e compatti degli interruttori. Negli schemi impiantistici i contattori con co-



Fig. 4.6: Simbolo grafico per un contattore manuale a) e automatico b).

mando manuale e automatico vengono rappresentati con i simboli in Figura 4.6.

4.5 Relè

Il **relè** è un dispositivo che permette di azionare in modo automatico componenti quali interruttori e contattori. Esso è sensibile ad una specifica grandezza fisica, detta *grandezza di comando*, tipicamente una tensione o una corrente. Quando questa grandezza supera un prestabilito *valore di soglia*, il relè modifica il suo stato determinando un'azione meccanica. In relazione alla grandezza di comando (corrente, tensione, potenza, frequenza, ecc.) un relè viene classificato come *amperometro*, *voltmetrico*, *wattmetrico*, *frequenzimetro*, ecc.

Ciascun tipo di relè si caratterizza per la **caratteristica di intervento**, che esprime il *tempo di intervento* necessario al cambiamento di stato in funzione della *grandezza di comando*. Relè basati su differenti principi di funzionamento presentano diverse caratteristiche di intervento: si distinguono ad esempio relè elettromagnetici, elettrodinamici, termici, ecc. Le diverse caratteristiche di intervento rendono i vari relè idonei ad assolvere funzioni speciali.

4.5.1 Relè elettromagnetico

Un **relè elettromagnetico** è costituito da una bobina disposta intorno ad un nucleo che fa parte di un circuito magnetico comprendente una piccola ancora mobile trattenuta da una molla in modo da formare un traferro (vedi Figura 4.7-a). Quando la bobina viene eccitata dalla corrente I , sull'ancora si esercita una forza elettrodinamica proporzionale al suo quadrato, che tende a muoverla riducendo il traferro. Non appena la corrente I supera la soglia I_s tale forza eccede quella della molla e l'ancora si sposta bruscamente, in un intervallo di intervento t_m molto piccolo, provocando un'azione meccanica, come l'apertura o la chiusura di contatti elettrici o il comando di altri dispositivi.

Come illustra la *caratteristica di intervento* (vedi Figura 4.7-b), per $I < I_s$ il relè non interviene mai, mentre per $I > I_s$ il tempo di intervento t_m

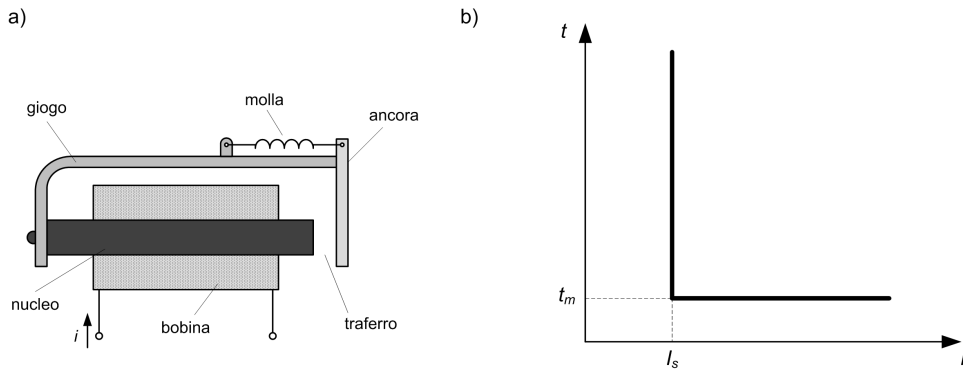


Fig. 4.7: Relè elettromagnetico e sua caratteristica di intervento.

è sostanzialmente costante. Dato che la forza dipende dal quadrato della corrente, questo tipo di relè può essere adoperato sia in corrente continua che alternata.

4.5.2 Relè differenziale

Un **relè differenziale** è costituito da un nucleo ferromagnetico attorno al quale sono disposti due avvolgimenti principali A_1 e A_2 con uguale numero N di spire, ed un avvolgimento ausiliario A_a i cui terminali sono connessi ad una bobina (vedi Figura 4.8-a). Gli avvolgimenti principali sono connessi in modo che correnti i_1 e i_2 di uguale segno producano forze magneto-motrici opposte, che danno luogo ad un flusso di induzione $\Phi_t = N(i_1 - i_2)/\mathcal{R}$ nel nucleo ferromagnetico di riluttanza $\mathcal{R}$. Se le correnti negli avvolgimenti principali si mantengono uguali, $i_1 = i_2$ si ha $\Phi_t = 0$: nell'avvolgimento ausiliario A_a non viene indotta alcuna f.e.m. cosicché è $i_a = 0$. Se invece è $i_1 \neq i_2$, ossia in presenza della **corrente differenziale** $i_\Delta = i_1 - i_2 \neq 0$ variabile nel tempo, compare un flusso $\Phi_t \neq 0$ variabile che produce una f.e.m. indotta nell'avvolgimento A_a e quindi una corrente $i_a \neq 0$ nella bobina.

La grandezza di comando è dunque costituita dalla corrente differenziale i_Δ della quale in regime sinusoidale si considera il valore efficace I_Δ : appena esso supera il valore di soglia $I_{\Delta s}$, la bobina produce un'azione meccanica analoga a quella del relè elettromagnetico. La caratteristica di intervento è quindi simile a quella di quest'ultimo (vedi Figura 4.8-b): se $I_\Delta < I_{\Delta s}$ il relè non interviene mai, se $I_\Delta > I_{\Delta s}$ il tempo di intervento t_m è sostanzialmente costante.

4.5.3 Relè termico

Un **relè termico** sfrutta la dilatazione termica di un suo elemento percorso da corrente, il quale viene riscaldato dalla potenza dissipata per effetto joule

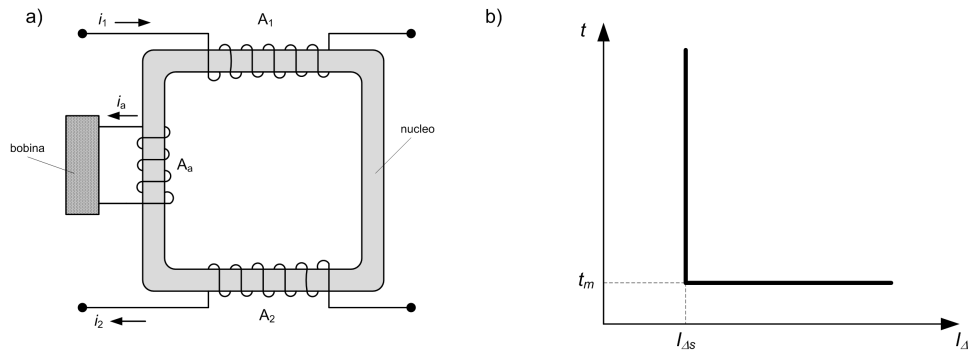


Fig. 4.8: Relè differenziale e sua caratteristica di intervento.

$P_d = Ri^2$. L'elemento fondamentale del relè termico è infatti costituito da due lamelle conduttrici di materiale differente, come illustrato in Figura 4.9: infatti avendo proprietà termiche diverse, i due materiali si dilatano in maniera differente, storcendosi da un lato e consentendo così di poter azionare un interruttore. Per semplicità si possono considerare costanti la resistenza

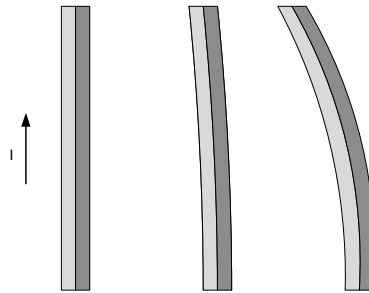


Fig. 4.9: Principio di funzionamento di un relè termico.

R dell'elemento e la corrente I (e quindi la potenza P_d), allora a partire da condizioni di riposo, nelle quali l'elemento è in equilibrio termico con l'ambiente, la sua temperatura T cresce nel tempo con legge esponenziale:

$$T(t) = T_a + \Delta T_M \left(1 - e^{-t/T_t}\right) \quad (4.1)$$

dove T_a è la temperatura dell'ambiente, ΔT_M è il valore asintotico cui tende la sovratemperatura rispetto all'ambiente e T_t è la costante di tempo termica. Quanto più è maggiore è I , tanto più rapida è la crescita di T (vedi Figura 4.10-a). Durante il processo può essere raggiunta la temperatura di soglia T_s alla quale la dilatazione dell'elemento provoca un'azione meccanica. Detta I_s la corrente minima per la quale ciò avviene, T_s viene raggiunta in un tempo tanto minore quanto più è $I > I_s$: pertanto il relè termico presenta la caratteristica di intervento esemplificata in Figura 4.10-b, che è detta *caratteristica di intervento a tempo inverso*. Poiché il riscaldamento dipende dal

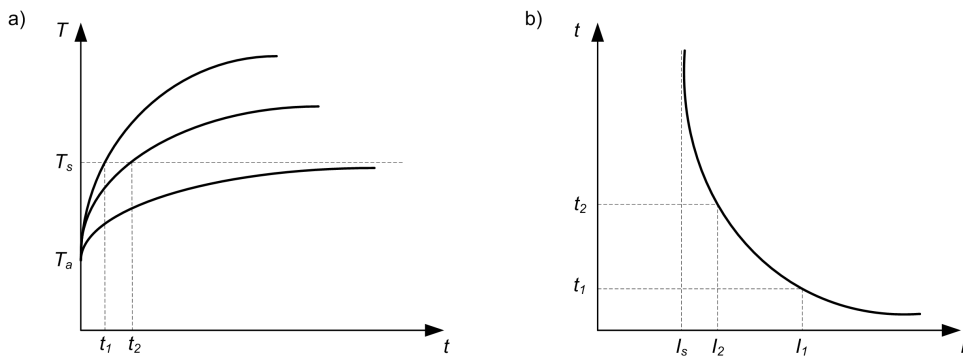


Fig. 4.10: Esempi di caratteristiche di intervento per un relè termico.

quadrato della corrente, anche questo tipo di relè funziona sia in corrente continua che alternata.

4.6 Interruttori automatici

Asservendo un interruttore ad un relè si ottiene un **interruttore automatico**, che interviene allorché l'azione del relè libera un nottolino di sgancio. La caratteristica di intervento complessiva è simile a quella del relè, ma presenta tempi di intervento maggiori, comprendendo anche tutti i ritardi da quando la grandezza di comando supera la soglia a quando l'interruttore apre. Negli interruttori multipolari i relè producono l'apertura simultanea di tutti i poli.

Collegando la bobina di un relè elettromagnetico ad un interruttore, si ottiene un **interruttore di massima corrente con relè elettromagnetico**: non appena la corrente nel relè supera la soglia I_s , il relè scatta e l'interruttore si apre. Se utilizzo un relè termico, con lo stesso principio, ottengo un **interruttore di massima corrente con relè termico**.

4.6.1 Interruttore differenziale (salvavita)

Gli avvolgimenti principali del relè differenziale svengono collegati in serie ai fili della linea (vedi Figura 4.11), rappresentato in Figura 4.11. Si ottiene un **interruttore differenziale**, comunemente detto **salvavita**, avente caratteristica di intervento complessiva analoga a quella di Figura 4.8-b. A seconda del numero di poli dell'interruttore si realizzano interruttori differenziali per sistemi monofasi o trifasi. Le correnti differenziali di soglia $I_{\Delta s}$ sono comprese tra 10 mA e 1A. I valori minori (da 10 a 30 mA) vengono impiegati nella protezione delle persone, mentre i valori più elevati trovano impiego nella protezione degli impianti.

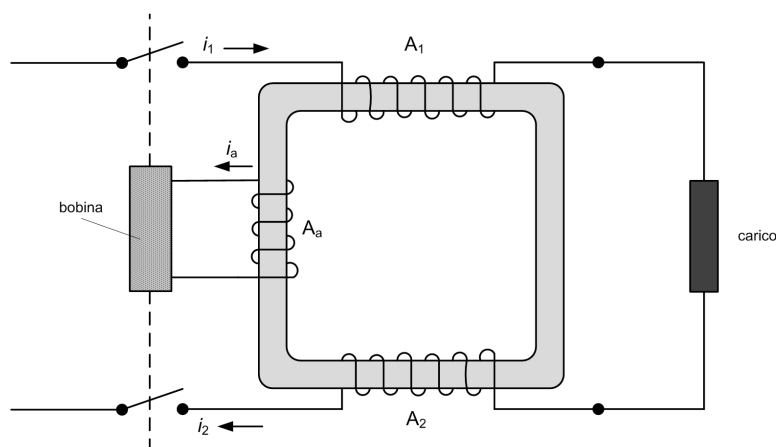


Fig. 4.11: Schema di principio di un salvavita.

4.6.2 Interruttore magnetotermico

Utilizzando sia un relè elettromagnetico di massima corrente che uno termico si ottiene un **interruttore magnetotermico**: le due caratteristiche di intervento danno luogo ad una caratteristica di intervento complessiva del tipo esemplificato in Figura 4.12. Per $I < I_s$ il dispositivo non interviene; per $I_s < I < I_m$ l'intervento è dovuto al relè termico; per $I > I_m$ l'intervento è dovuto al relè elettromagnetico. Pertanto il dispositivo risulta idoneo a garantire la protezione sia contro i *sovraccarichi* che contro i *cortocircuiti*, per i quali l'intervento è particolarmente rapido.

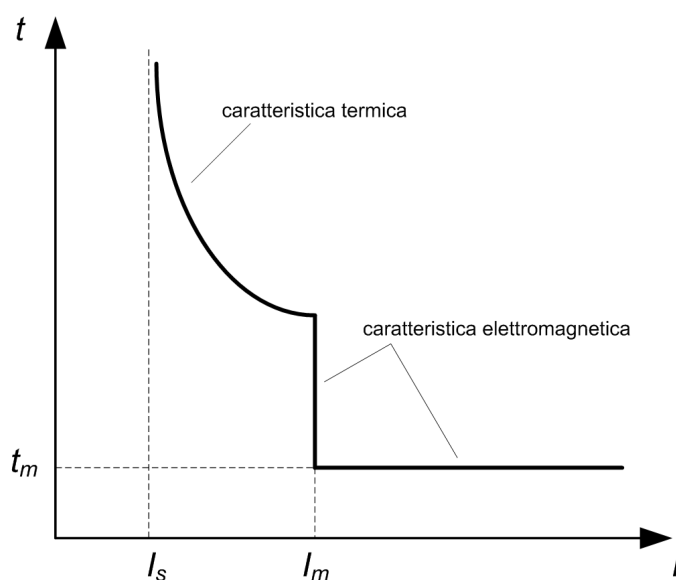


Fig. 4.12: Caratteristica di intervento di un interruttore magnetotermico.

4.7 Fusibili

I **fusibili** sono dispositivi capaci di eseguire l'apertura in modo irreversibile: possono essere utilizzati una volta soltanto e quindi devono essere sostituiti dopo ogni loro intervento. Per contro sono semplici, affidabili ed economici: per questo vengono frequentemente usati per la protezione contro le sovracorrenti. Negli schemi impiantistici i fusibili sono indicati con il simbolo della Figura 4.13-a, o anche con quello della Figura 4.13-b nel quale il tratto annerito specifica il morsetto che dopo l'intervento rimane in tensione.



Fig. 4.13: Simboli grafici adoperati per i fusibili.

Un fusibile è costituito fondamentalmente da un conduttore realizzato in lega a bassa temperatura di fusione, alloggiato dentro un contenitore (camera di interruzione) e con le estremità collegate a due elettrodi.

Il principio di funzionamento è il seguente: quando è percorso da corrente il conduttore si scalda e, se la corrente supera la soglia I_s , raggiunge la temperatura di fusione T_s e si distrugge, interrompendo il collegamento tra gli elettrodi.

4.8 Isolatori

Gli **isolatori** sono componenti destinati a sostenere meccanicamente i conduttori in tensione garantendone l'isolamento elettrico. Essi devono resistere alle sollecitazioni di natura meccanica ed elettrodinamica trasmesse dai conduttori e al tempo stesso devono sopportare le tensioni alle quali questi possono portarsi: vengono quindi realizzati con materiali di elevate qualità meccaniche e dielettriche. Esistono isolatori per alta, media e bassa tensione, idonei per installazioni all'esterno ovvero in ambienti interni.

Negli impieghi per esterno si utilizzano isolatori in porcellana o in vetro pirex. Un esempio di isolatori per esterno è riportato in Figura 4.14. Negli impieghi interni (e per media tensione) sono largamente utilizzati gli isolatori monoblocco in porcellana o in resina epossidica caricata con quarzo, in grado di sopportare elevati momenti flettenti.

4.9 Scaricatori

Gli **scaricatori** sono componenti di protezione contro le sovratensioni transitorie che vengono installati in prossimità delle apparecchiature da proteg-



Fig. 4.14: Esempio di isolatori per esterno.

gere. Negli schemi impiantistici sono indicati con i simboli di Figura 4.15.



Fig. 4.15: Simboli grafici utilizzati per gli scaricatori.

La loro versione tradizionale (detto anche **spinterometro**) è costituita da due elettrodi sagomati posti ad opportuna distanza mutua in aria, uno collegato alla linea da proteggere e l'altro a terra. Al manifestarsi di una sovratensione, tra essi si innesca un arco elettrico che provoca l'immediata riduzione della tensione. In Figura 4.16 è rappresentato un esempio di spinterometro.

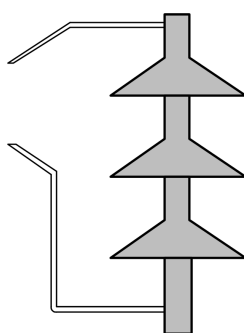


Fig. 4.16: Esempio di spinterometro.

Sicurezza negli Impianti Elettrici

LE persone che utilizzano apparecchiature elettriche o operano in loro prossimità sono soggette al rischio di **infortunio elettrico** che può avvenire quando esse vengono in contatto contemporaneamente con più parti conduttrici poste reciprocamente in tensione.

5.1 Infortunio elettrico

La *soglia di percezione* della corrente elettrica nell'uomo, per un contatto tra i polpastrelli è circa di 0.5 mA in corrente alternata alla frequenza industriale (50-60 Hz) e di 2 mA in corrente continua. Con intensità maggiori si producono nel corpo umano i seguenti effetti patofisiologici.

- *Tetanizzazione muscolare*: i muscoli, sottoposti ad una corrente alternata, subiscono una sequenza di stimoli elettrici; non riuscendo a contrarsi e rilassarsi con la frequenza della corrente, i muscoli restano contratti permanentemente, come avviene nelle infezioni da tetano (da cui il termine *tetanizzazione*). Tale circostanza è particolarmente grave quando un oggetto in tensione rispetto a terra viene impugnato volontariamente, poiché la tetanizzazione paralizza i muscoli impedendone il rilascio. La massima corrente per cui si riesce a lasciare la presa viene chiamata **corrente di rilascio** e si aggira sui $10 \div 30$ mA a frequenza industriale.
- *Blocco respiratorio*: una corrente sufficientemente elevata (maggiore di 50 mA a frequenza industriale) che interessi la regione toracico-polmonare può provocare la tetanizzazione dei muscoli respiratori e

quindi paralizzare la respirazione, con ipossia¹ e danni irreversibili al cervello se la paralisi non cessa entro pochi minuti.

- *Fibrillazione ventricolare*: una corrente alternata sufficientemente elevata (maggiore di 50 mA a frequenza industriale) che interessi la regione toracica, può provocare la perdita del coordinamento dei muscoli cardiaci che iniziano a pulsare in modo scoordinato; allora il cuore non riesce più a pompare il sangue causando ancora ipossia e danni irreversibili al cervello, se la fibrillazione non cessa entro pochi minuti.
- *Arresto cardiaco*: forti intensità di corrente possono provocare l'arresto cardiaco anziché la fibrillazione ventricolare.
- *Ustioni*: densità di correnti di pochi mA/mm² sulla superficie di contatto tra cute e conduttori in tensione provocano surriscaldamenti per *effetto Joule* che se perdurano qualche secondo sono sufficienti a causare ustioni anche gravi; densità via via maggiori producono la carbonizzazione dei tessuti superficiali e di quelli interni o addirittura di interi arti.

Tetanizzazione muscolare, blocco respiratorio e fibrillazione ventricolare, che sono provocati principalmente dalla sequenza di stimoli tipici della *corrente alternata*, possono manifestarsi anche in *corrente continua*, ma solo a correnti molto più elevate. La corrente continua ha invece effetti paragonabili a quella alternata per quanto riguarda l'arresto cardiaco e le ustioni e, a differenza di quella alternata, può anche produrre gravi fenomeni di **elettrolisi** dei liquidi organici.

5.1.1 Limiti di corrente

Per una data frequenza la **corrente pericolosa** I_p e la permanenza Δt sono tra loro correlate, potendo essere tollerate correnti tanto maggiori quanto minore è la loro durata. Tale correlazione può essere espressa dalla **soglia media di pericolosità** (vedi Figura 5.1)

$$I_p = I_0 + \frac{Q}{\Delta t} \quad (5.1)$$

che individua il limite al di sotto del quale la corrente è percepibile ma non pericolosa. Al di sopra di tale limite la corrente deve considerarsi potenzialmente pericolosa, iniziando a manifestarsi la tetanizzazione.

¹L'**ipossia** è una condizione patologica determinata da una carenza di ossigeno nell'intero corpo (ipossia generalizzata) o in una sua regione (ipossia tissutale). Essa genera uno stato di confusione e spaesamento, paragonabile a quello di ubriachezza. A differenza di quest'ultima, tuttavia, la persona colpita non riesce a realizzare le condizioni del suo stato. Questo può generare una sopravvalutazione delle proprie ridotte capacità percettive, che possono essere anche fatali.

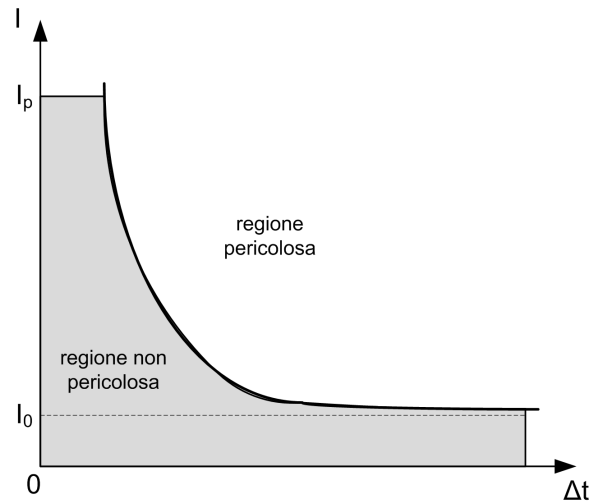


Fig. 5.1: Soglia media di pericolosità.

I parametri I_0 e Q che compaiono nella (5.1) dipendono marcatamente dalla frequenza della corrente: a frequenza industriale si può assumere $I_0 = 10 \div 30$ mA e $Q \approx 10$ mAs. Per frequenze minori la curva di pericolosità presenta valori più elevati fino a raggiungere $I_0 \approx 60$ mA in corrente continua. Per frequenze elevate risultano pure tollerabili correnti maggiori, perché esse, diventando superficiali per l'effetto pelle, tendono a non interessare gli organi interni. Pertanto la maggiore pericolosità della corrente elettrica si presenta proprio alle frequenze industriali, con le quali interagisce la maggior parte delle persone.

5.1.2 Limiti di tensione

Il corpo umano presenta un comportamento prevalentemente resistivo. Peraltro la tensione $V_p = R_p I_p$ che corrisponde alla corrente pericolosa (5.1) è di difficile definizione perché la resistenza del corpo R_p può variare in un campo molto ampio, dipendendo da molteplici fattori quali i punti di contatto, l'estensione della superficie di contatto, la pressione di contatto, lo spessore della pelle e il suo grado di umidità. Inoltre R_p decresce al crescere della tensione e varia nel tempo durante la persistenza del contatto. Con tensioni sinusoidali di valore efficace di qualche decina di volt difficilmente si ha $R_p < 2$ kΩ. Per questo motivo si considera che, per la media degli individui, non siano pericolose tensioni sinusoidali con valore efficace $U \leq 50$ V e tensioni continue $U \leq 120$ V, applicate per un tempo illimitato.

Questi livelli corrispondono ai limiti previsti dalle *norme tecniche* per i sistemi di categoria 0, detti a *bassissima tensione* (vedi Tabella 1.2), che pertanto non comportano pericoli per l'incolumità delle persone.

Invece i sistemi di categoria 1 ($50 \div 1000$ V in c.a. e $120 \div 1500$ V in c.c.) presentano livelli di tensione pericolosi. Dato che con essi interagisce la quasi totalità della popolazione, generalmente priva di competenze tecniche, questi sistemi richiedono misure di protezione particolarmente efficaci contro gli infortuni elettrici.

Con i sistemi di categoria 2 e 3, aventi tensioni maggiori, interagisce solo personale specializzato e specificamente addestrato.

5.2 Contatti diretti e indiretti

I tipi di contatti elettrici ai quali può essere sottoposto un individuo si distinguono in diretti e indiretti:

- un **contatto diretto** si verifica quando un individuo viene in contatto con varie parti attive, ovvero normalmente in tensione;
- un **contatto indiretto** si verifica quando un individuo viene in contatto con parti metalliche che si trovano in tensione accidentalmente ed imprevedibilmente. Ciò può accadere perché sollecitazioni di varia natura (termiche, meccaniche, ecc.) possono produrre cedimenti degli isolanti o degli involucri protettivi delle parti in tensione. In questo modo parti metalliche, dette **masse** accessibili alle persone, perché normalmente non in tensione rispetto a terra, possono divenire equipotenziali con i conduttori in tensione.

5.2.1 Protezione contro i contatti diretti

La protezione contro i contatti diretti si attua prevenendo i contatti accidentali con le parti in tensione. Nel caso dei sistemi elettrici di categoria 1 essa può effettuarsi per mezzo dei seguenti accorgimenti:

1. *isolamento delle parti attive* (ossia in tensione) con materiali isolanti non rimovibili;
2. *involucri o barriere* tali da impedire ogni contatto con parti attive;
3. *ostacoli o distanziamento* tali da impedire il contatto accidentale con le parti attive;
4. *interruttori differenziali ad alta sensibilità*, con correnti differenziali di sogli $I_{\Delta s} \leq 30$ mA (vedi paragrafo 4.6.1). Si tratta di un metodo di protezione addizionale: questi interruttori possono infatti intervenire efficacemente contro i contatti diretti che si verificassero malgrado gli accorgimenti precedenti. La corrente differenziale I_{Δ} che determina l'intervento del relè, circola anche nel corpo umano, restandovi applicata fino all'apertura dell'interruttore.

5.2.2 Protezione contro i contatti indiretti

La protezione contro i contatti indiretti si realizza nei seguenti modi:

1. *messa a terra* delle masse, realizzata connettendole all'*impianto di terra*, che ha lo scopo di evitare che, in caso di guasto, esse assumono potenziali elevati rispetto a terra;
2. *interruzione automatica dell'alimentazione*: è garantita da interruttori automatici che intervengono in caso di guasto in modo da impedire che le masse assumano potenziali elevati per tempi tali da divenire pericolose;
3. *doppio isolamento* delle parti in tensione che rende bassissima la probabilità di un cedimento completo dell'isolamento e permette di non ricorrere a dispositivi di interruzione. Gli apparecchi che ne sono dotati recano il simbolo



4. *separazione elettrica*, che si attua in alternativa all'interruzione automatica, fornendo l'alimentazione attraverso un trasformatore di isolamento e permette di evitare l'interruzione in caso di guasto. Esso viene utilizzato nei locali ad uso medico.

5.3 Impianto di terra

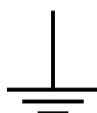
Un **impianto di terra** è costituito da un sistema di conduttori che permettono di collegare a terra in modo sicuro determinati elementi conduttori (*messa a terra*). Tale collegamento può avere le seguenti funzioni.

1. **Messa a terra di potenza.** All'impianto di terra sono collegate le *masse* metalliche delle apparecchiature che fanno parte dell'impianto elettrico. Questo collegamento, imposto dalla normativa vigente, mantiene le masse al potenziale di terra in condizioni di normale funzionamento e limita le loro tensioni rispetto a terra in caso di guasto. Esso realizza la *protezione mediante messa a terra*, descritta nel seguito.
2. **Messa a terra di funzionamento.** All'impianto di terra possono essere collegate parti attive di un impianto o di un sistema elettrico. Esempi importanti sono costituiti dai collegamenti a terra dei centri stella dei trasformatori trifasi di potenza. In altri casi la connessione permette di sfruttare il terreno come conduttore sede di corrente: esempi si

hanno nella trazione elettrica ferroviaria ed anche nei collegamenti sottomarini di potenza in corrente continua con cavi unipolari, che utilizzano il mare come secondo conduttore.

3. **Messa a terra per lavori.** Quando una porzione di sistema elettrico viene portata fuori servizio per eseguire lavori, essa deve essere sezionata dalla parte dell'impianto che resta in tensione e collegata a terra in maniera sicura e visibile. A tale scopo essa viene collegata all'impianto di terra per mezzo di sezionatori di terra o di connessioni provvisorie.

Ogni edificio è dotato di un impianto di terra. Negli schemi circuitali il collegamento a terra è indicato con il simbolo seguente



5.4 Elementi dell'impianto di terra

L'impianto di terra è costituito dalle seguenti parti:

- il **dispersore**, totalmente immerso nel terreno, è costituito da uno o più elementi conduttori collegati tra loro;
- il **collettore** (o **nodo principale**) **di terra**, costituito da un morsetto o da una sbarra collegato sia al dispersore che alle masse;
- il **conduttore di terra**, che collega gli elementi del dispersore tra loro ed al collettore di terra;
- i **conduttori di protezione**, detti **PE**, che collegano il collettore di terra alle masse delle apparecchiature elettriche;
- i **conduttori equipotenziali** che collegano il collettore di terra alle masse estranee.

5.4.1 Il dispersore di terra

Il dispersore di terra garantisce un buon contatto elettrico tra impianto di terra e terreno. Affinché la corrente possa essere dispersa nel terreno dovrà esserci almeno un secondo dispersore, posto a distanza più o meno grande dal primo, che permette la chiusura del circuito.

Quando, in caso di guasto, la *corrente di terra* I_t attraversa il dispersore, essa produce nel terreno un campo di corrente. Se i due dispersori sono a distanza elevata rispetto alle loro dimensioni, il campo di corrente in prossimità di ciascuno non è influenzato dall'altro e tutto avviene come se la corrente si richiudesse a distanza infinita. La configurazione del campo di corrente in vicinanza del dispersore dipende dalla sua forma e dalla profondità alla quale esso è interrato. Per esemplificare il comportamento si

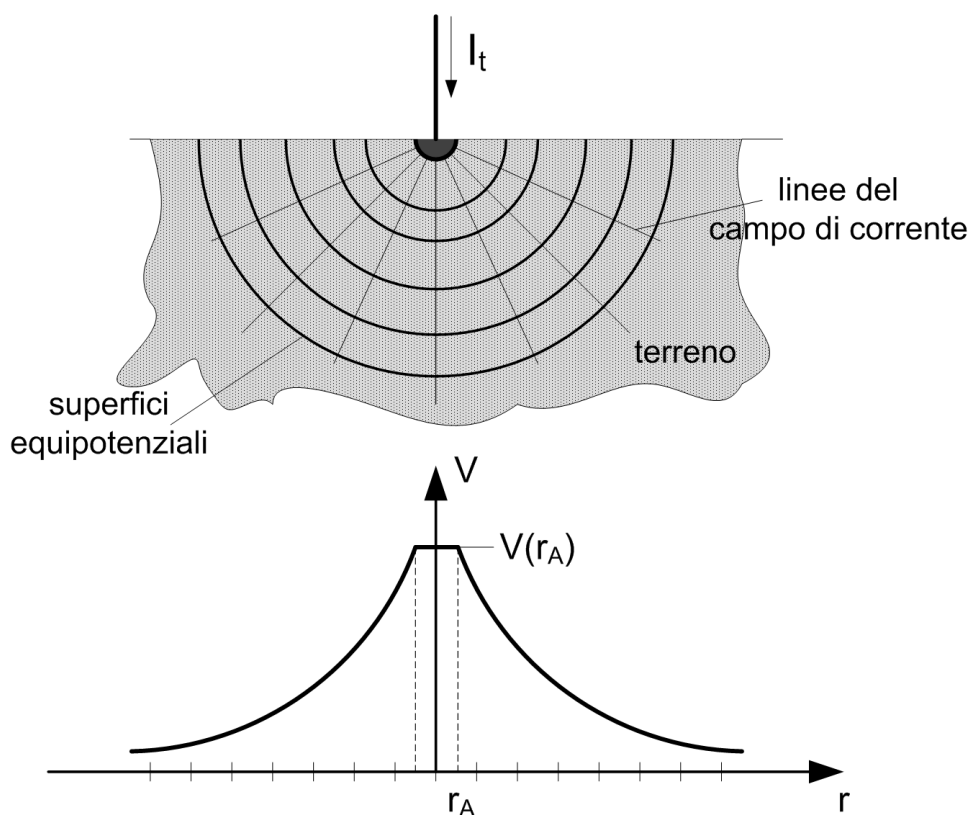


Fig. 5.2: Esempio di dispersore e campo di corrente di terra.

può considerare un dispersore emisferico immerso in un terreno costituito da un mezzo uniforme con resistività ρ : le linee del campo di corrente sono semirette uscenti radialmente dal dispersore e le superfici equipotenziali sono semisfere concentriche, come illustrate in Figura 5.2. Lungo qualunque direzione radiale, e quindi anche in corrispondenza della superficie del terreno, il potenziale elettrico assoluto (nullo all'infinito), che è pari alla tensione rispetto all'infinito, ha andamento iperbolico in funzione della

distanza r , come espresso dalla:

$$V(r) = \frac{\rho I_t}{2\pi r} \quad (5.2)$$

Il valore massimo $V(r_A) = V_A$, si presenta sulla superficie del dispersore. Il

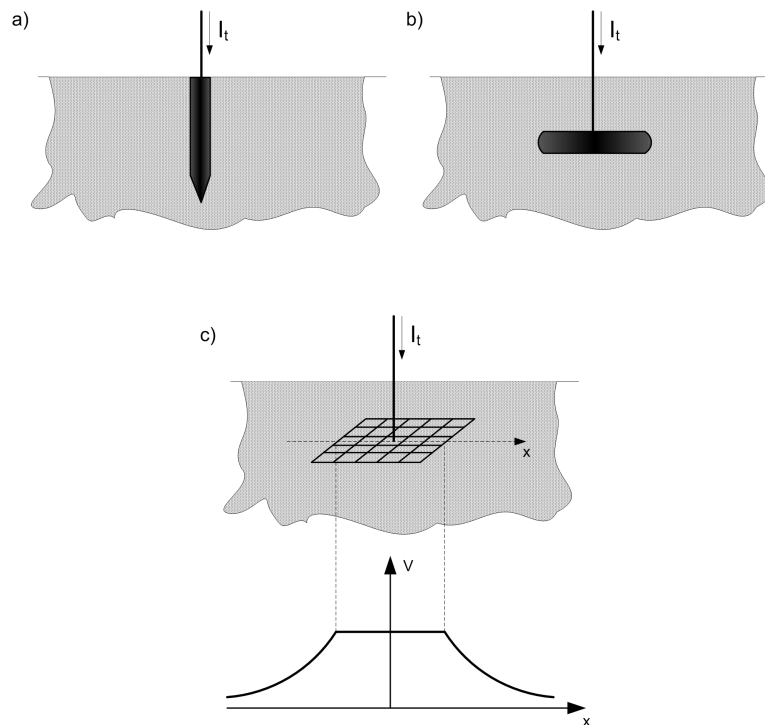


Fig. 5.3: Diversi tipi di dispersore: picchetto a); piastra b) e grata c).

dispersore emisferico consente una semplice analisi del campo di corrente, grazie alla sua simmetria, ma non viene normalmente impiegato. Infatti nella pratica si utilizzano strutture più semplici ed economiche, come quelle indicati in Figura 5.3 e costituite rispettivamente da un picchetto, da una piastra e da una grata: quest'ultima rende equipotenziale il terreno sotto cui è interrata.

In ogni caso il potenziale V dipende da forma e dimensioni del dispersore ed anche dalla resistività del terreno, che può essere disomogeneo. Il potenziale assume sempre valore massimo in corrispondenza del dispersore e decresce in funzione della distanza da questo.

La posizione del dispersore viene segnalata da un cartello del tipo raffigurato in Figura 5.4.



Fig. 5.4: Cartelli che indicano la posizione di un dispersore di terra.

5.5 Tensioni e resistenza di terra

Si definisce **tensione totale di terra** U_t la tensione che si stabilisce tra il dispersore e punti sufficientemente lontani da potersi considerare all'infinito, allorché è presente la corrente di terra I_t . Essendo $V(\infty) = 0$, essa vale (con riferimento alla Figura 5.5)

$$U_t = V_A - V(\infty) = V_A \quad (5.3)$$

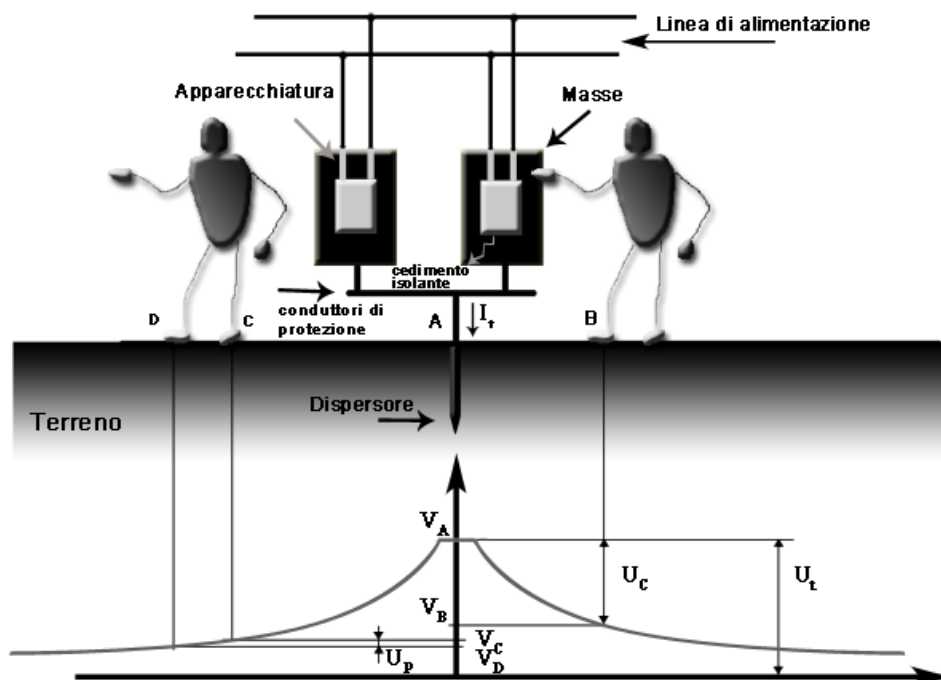


Fig. 5.5: Esempio di messa a terra.

Si definisce **resistenza di terra** R_t il rapporto tra la tensione di terra e la corrente di terra:

$$R_t = \frac{U_t}{I_t} \quad (5.4)$$

Dato che il terreno ha comportamento prevalentemente resistivo, la (5.4) vale sia in regime stazionario che sinusoidale.

Se il terreno è costituito da un mezzo lineare la resistenza di terra non dipende dalla corrente ma soltanto dalla resistività del terreno e dai parametri geometrici che caratterizzano il dispersore stesso: nel caso di dispersore emisferico e terreno omogeneo vale $R_t = \rho/2\pi r_A$.

E' detta **tensione di contatto** quella alla quale può essere soggetta una persona in caso di *contatto indiretto*. Essa si manifesta il più delle volte tra una mano che tocca una *massa* e i piedi che sono a contatto con il terreno.

Nell'esempio di Figura 5.5, dove le masse sono collegate all'impianto di terra e in questo è presente la corrente di terra I_t , assumendo che le masse stesse siano equipotenziali con il dispersore, la *tensione di contatto* viene a coincidere con la differenza tra il potenziale del dispersore (A) e del punto di contatto a terra (B):

$$U_c = V_A - V_B \quad (5.5)$$

e risulta una frazione della tensione totale di terra:

$$U_c \leq U_t.$$

E' definita **tensione di passo** quella che, in seguito alla presenza di corrente di terra I_t , può risultare applicata tra i piedi di una persona posti alla distanza di passo, convenzionalmente pari ad un metro. La tensione di passo coincide quindi con la massima differenza di potenziale tra due punti distanti un metro, come C e D in Figura 5.5:

$$U_p = V_C - V_D \quad (5.6)$$

e anche essa risulta una frazione della tensione totale di terra:

$$U_p \leq U_t.$$

Nel caso esemplificato in Figura 5.5, se l'apparecchiatura si trova a notevole distanza dal dispersore cui è collegata, la *tensione di contatto* viene quasi a coincidere con la tensione totale di terra, mentre è piccola la *tensione di passo*.

Inoltre quanto maggiore è la profondità di interrimento del dispersore tanto più elevata risulta la tensione di contatto e tanto minore la tensione di passo, tendendo ai valori $U_c = U_t$ e $U_p = 0$.

Un dispersore particolarmente efficace è quello a grata, in quanto rende equipotenziale tutta l'area sotto alla quale è interrato e quindi ivi si annullano le tensioni di contatto e di passo.

Impianti Elettrici Utilizzatori

UN **impianto utilizzatore** è l'insieme dei circuiti di alimentazione degli apparecchi utilizzatori e delle prese a spina (comprese le relative apparecchiature di manovra, di sezionamento, di interruzione, di protezione, ecc.) che stanno a valle di un punto di fornitura. Esso viene anche detto **rete di distribuzione interna**.

Esistono impianti utilizzatori in media tensione, ovvero appartenenti alla categoria 2 ed impianti utilizzatori in bassa tensione, ovvero appartenenti alle categorie 1 e 0, di cui discuteremo nel presente capitolo.

6.1 Impianti utilizzatori in bassa tensione

Gli impianti utilizzatori in bassa tensione, che tipicamente alimentano carichi trifase a 380 V o monofasi a 220 V, sono connessi ai secondari di trasformatori con le fasi collegate a stella, centro stella accessibile e neutro distribuito insieme alle tre fasi.

Ai fini anti-infortunistici le norme prevedono che i sistemi elettrici con tensioni alternate fino a 1000 V (BT) rispettino specifiche modalità di messa a terra del neutro e delle masse.

In relazione alle modalità di messa a terra, tali norme distinguono i sistemi elettrici in base ad una sigla composta da gruppi di lettere, con i seguenti significati:

- *Prima lettera* - condizione del sistema di alimentazione rispetto a terra:

T: un punto del sistema (in genere il neutro) è collegato direttamente a terra;

I: il sistema è isolato da terra, oppure un suo punto (in genere il neutro) è collegato a terra tramite un'impedenza elevata.

- *Seconda lettera* - condizioni della masse rispetto a terra:
 - T**: le masse sono collegate direttamente a terra con impianto di terra proprio;
 - N**: le masse sono collegate al punto di messa a terra del sistema di alimentazione.
- *Eventuali lettere successive* - condizione dei conduttori di neutro e di protezione:
 - S**: funzioni di neutro (N) e di protezione (PE) svolte da conduttori separati;
 - C**: funzioni di neutro e di protezione svolte da un unico conduttore comune (PEN).

Dato che la normativa impone il collegamento a terra della masse, risultano possibili le seguenti combinazioni delle prime due lettere: **TT**, **TN** e **IT**.

6.2 Sistema TT

Il **sistema TT** viene sempre impiegato per alimentare impianti utilizzatori di piccola potenza, privi di cabina di trasformazione propria, quali sono le utenze domestiche.

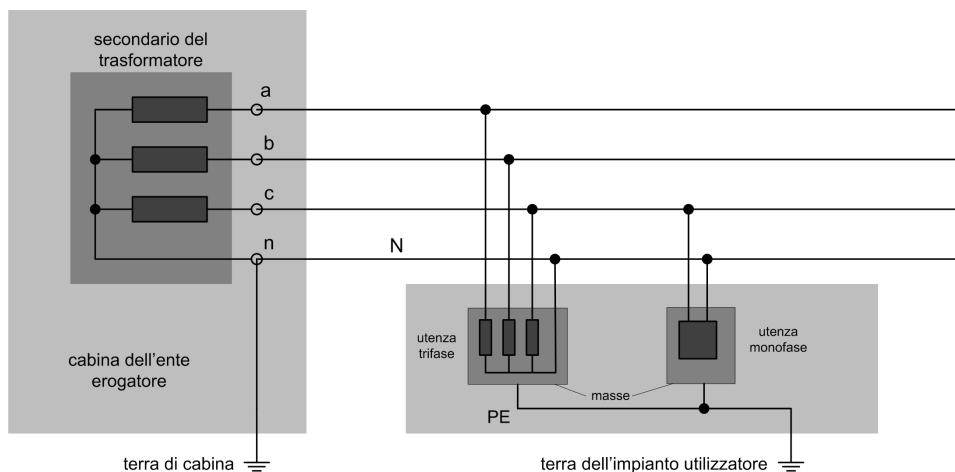


Fig. 6.1: Esempio di sistema TT.

In questo sistema il neutro (N) è collegato all'impianto di terra della cabina elettrica, che appartiene all'ente erogatore: gli impianti utilizzatori devono essere dotati di impianto di terra proprio, necessariamente distinto da quello della cabina, per connettersi le masse delle proprie apparecchiature tramite i conduttori di protezione (PE). La situazione è illustrata in Figura 6.1,

dove a titolo di esempio sono rappresentate due utenze, una trifase ed una monofase.

6.2.1 Sicurezza e protezione nei sistemi TT

Un *guasto fase-terra*, causato dal cedimento dell'isolamento tra una fase e la massa di un'apparecchiatura, può dare luogo ad un infortunio per contatto indiretto. Con esso si forma un *anello di guasto* che comprende i due dispersori ed il terreno (vedi Figura 6.2) e quindi presenta impedenza complessiva Z_t data dalla somma della resistenza di terra R_t del dispersore dell'utenza, della resistenza di terra R_n del dispersore di cabina, dell'impedenza Z_g a secondario del trasformatore e dell'impedenza Z_l della linea fino al punto di guasto. In tale anello agisce la f.e.m. E_g indotta a secondario del trasformatore e pertanto, a regime, viene a stabilirsi la corrente di guasto:

$$I_g = \frac{E_g}{Z_t} = \frac{E_g}{R_t + R_n + Z_g + Z_l} \quad (6.1)$$

questa può avere valore efficace maggiore o minore di quella nominale, in

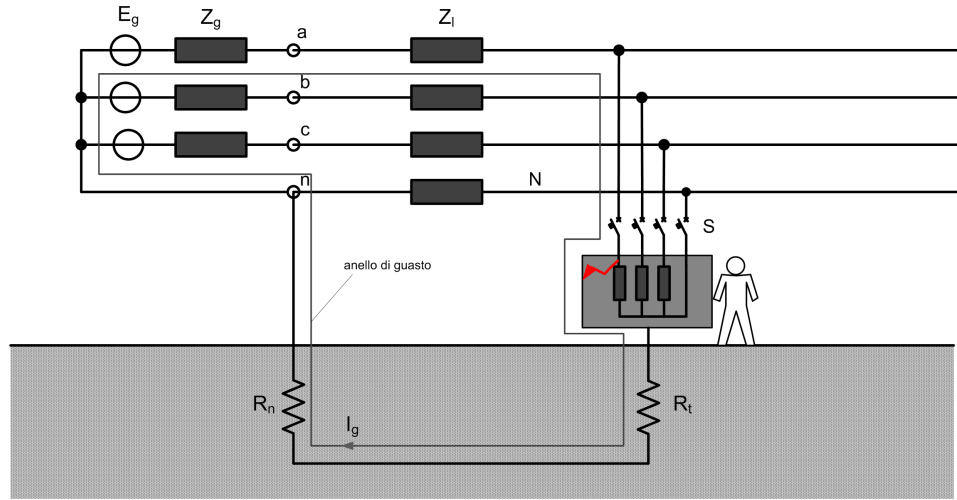


Fig. 6.2: Anello di guasto in un sistema TT.

relazione a quanto vale Z_t rispetto all'impedenza complessiva dei carichi connessi alla linea. La tensione di contatto, mai maggiore della tensione di terra, risulta:

$$U_c \leq U_t = R_t I_g = \frac{R_t}{Z_t} E_g \quad (6.2)$$

Pertanto con il sistema TT la tensione di contatto U_c risulta una frazione del valore efficace della tensione stellata E_g , tanto minore quanto minore è la resistenza R_t dell'impianto di terra rispetto alla totale impedenza dell'anello di guasto. Le impedenze del trasformatore e della linea sono di

solito trascurabili rispetto alle resistenze di terra dei dispersori e quindi è $U_c \leq E_g R_t / (R_t + R_n)$; se ad esempio è $R_t = R_n$ si ha $U_c \leq E_g / 2$.

Se la resistenza di terra R_t non è sufficientemente piccola, U_c può raggiungere valori pericolosi per le persone: è allora necessario predisporre un dispositivo di protezione, tipicamente un interruttore automatico (S, in Figura 6.2), capace di interrompere tempestivamente la corrente di guasto. La normativa impone la condizione:

$$R_t I_a \leq 50 \quad (6.3)$$

dove R_t è espressa in Ω e I_a è la corrente, espressa in Ampère, che provoca l'intervento automatico del dispositivo di protezione. Quindi, essendo $U_c \leq U_t$, in caso di contatto indiretto a seguito di un guasto fase-terra, una persona non può essere sottoposta ad una tensione di contatto maggiore di 50 V per tempi maggiori a quelli di intervento. La condizione (6.3) impone che sia $I_a \leq 50 / R_t$.

Per questi valori di corrente sono particolarmente indicati gli *interuttori differenziali* (vedi il paragrafo 4.6.1), nei quali la corrente differenziale è pari alla corrente dell'anello di guasto. Il valore di R_t deve comunque essere inferiore al limite massimo di 20 Ω , ammissibile per legge.

6.3 Sistema TN

Il **sistema TN** viene sempre impiegato nel caso di forniture di potenza medio-alta, che alimentano impianti utilizzatori dotati di cabina di trasformazione propria, quali sono i grandi impianti utilizzatori (condomini, piccole imprese, ecc.).

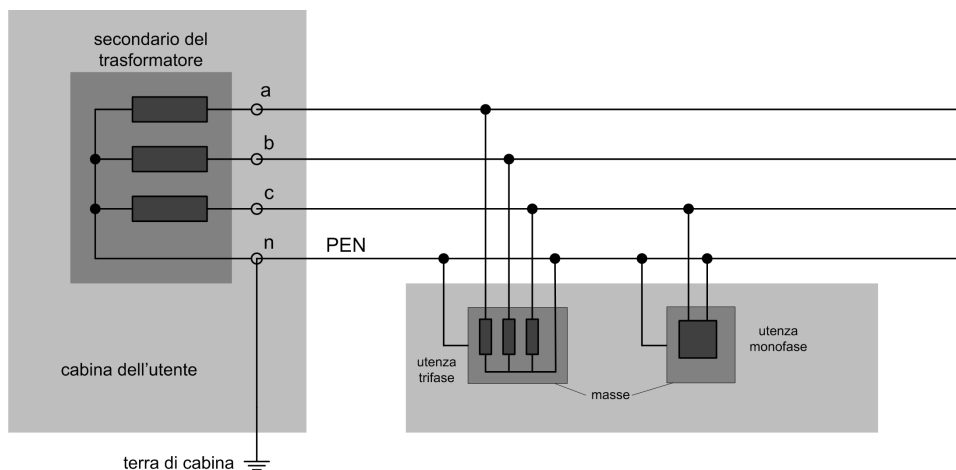


Fig. 6.3: Esempio di sistema TN-C.

In questo sistema all'impianto di terra della cabina elettrica sono collegati sia il neutro che il **conduttore di protezione** delle masse delle utenze. Si distinguono i seguenti tipi di sistema TN:

1. **TN-C**: in cui le funzioni di neutro e di protezione sono svolte dall'unico conduttore PEN (vedi Figura 6.3);
2. **TN-S**: in cui le due funzioni sono svolte separatamente dal neutro N e dal conduttore di protezione PE (vedi Figura 6.4);
3. **TN-C-S**: in cui le due funzioni sono in parte combinate in un unico conduttore e in parte separate.

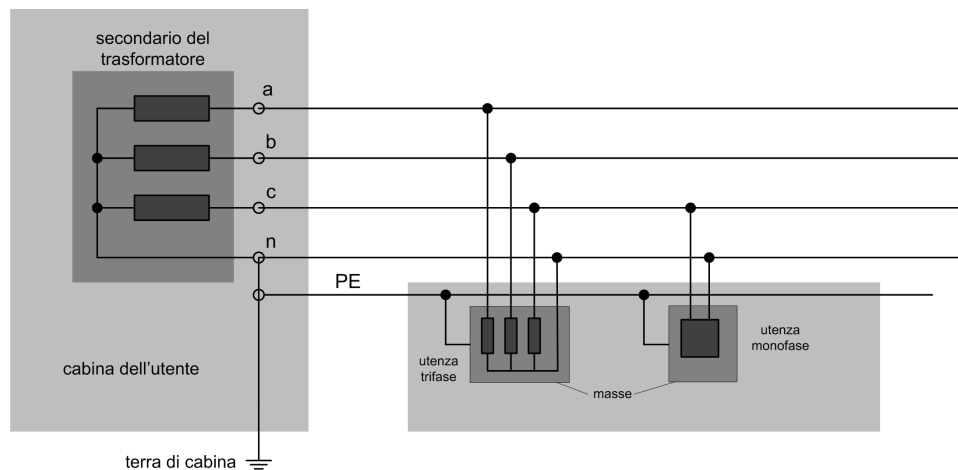


Fig. 6.4: Esempio di sistema TN-S.

6.3.1 Sicurezza e protezione nei sistemi TN

In caso di *guasto fase-terra* (causato dal cedimento dell'isolamento tra una fase e la massa di un'apparecchiatura), rimane individuato un *anello di guasto* che non interessa il terreno, ma comprende il conduttore di protezione (PEN o PE, vedi Figura 6.5) e quindi presenta impedenza complessiva Z_t data dalla somma delle impedenze Z_g di cortocircuito a secondario del trasformatore, Z_l della linea e Z_p del conduttore di protezione fino al punto di guasto. In tale anello agisce la f.e.m. E_g indotta a secondario del trasformatore e pertanto, a regime, viene a stabilirsi la corrente di guasto:

$$I_g = \frac{E_g}{Z_t} = \frac{E_g}{Z_g + Z_l + Z_p} \quad (6.4)$$

sempre nettamente maggiore della corrente nominale dell'impianto I_n .

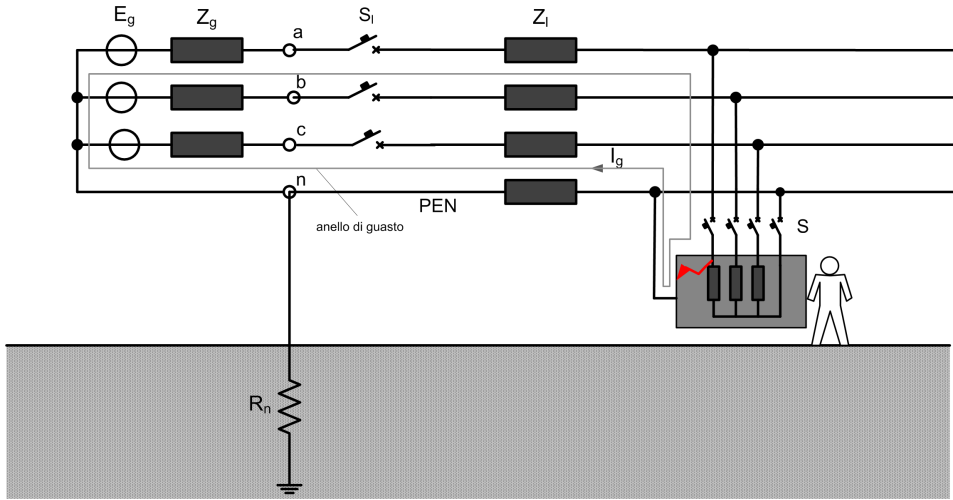


Fig. 6.5: Anello di guasto in un sistema TN.

Il terreno, che non è interessato da I_g , risulta in ogni punto equipotenziale con il centro stella del sistema, sicché la tensione di contatto U_c , pari alla differenza di potenziale tra il punto di contatto sulla massa e il centro stella, è uguale alla tensione su Z_p :

$$U_c = Z_p I_g = \frac{Z_p}{Z_t} E_g \quad (6.5)$$

Quindi con il sistema TN la tensione di contatto U_c risulta una frazione del valore efficace della tensione stellata E_g , ma può comunque raggiungere valori pericolosi per le persone: è allora necessario predisporre un dispositivo di protezione, tipicamente un interruttore automatico (indicato con S in Figura 6.5), capace di interrompere tempestivamente la corrente di guasto. In particolare la normativa impone la condizione:

$$Z_t I_a \leq E_g \quad (6.6)$$

dove Z_t è la massima impedenza dell'anello di guasto, cioè quella relativa al guasto più lontano, I_a è la corrente per cui il dispositivo automatico interviene automaticamente. La (6.6) garantisce pertanto che anche nelle condizioni più sfavorevoli sia sempre $I_g = E_g / Z_g \geq I_a$ e quindi che in ogni caso l'intervento della protezione sia garantito.

Essendo $I_g \gg I_n$ il dispositivo di protezione può essere sia un interruttore differenziale (salvavita) che un interruttore magnetotermico.

6.4 Sistema IT

Il **sistema IT** viene utilizzato solo dove sussistono particolari esigenze di continuità di esercizio (sale operatorie, aeroporti, impianti a ciclo continuo,

impianti di bordo, ecc.) e richiede che l'impianto utilizzatore sia dotato di cabina di trasformazione realizzata dall'utente; il neutro generalmente non viene distribuito. I secondari del trasformatore hanno il centro stella connesso all'impianto di terra della cabina mediante un'impedenza con modulo Z_n elevato, invece le masse sono collegate all'impianto di terra locale, come illustrato in Figura 6.6.

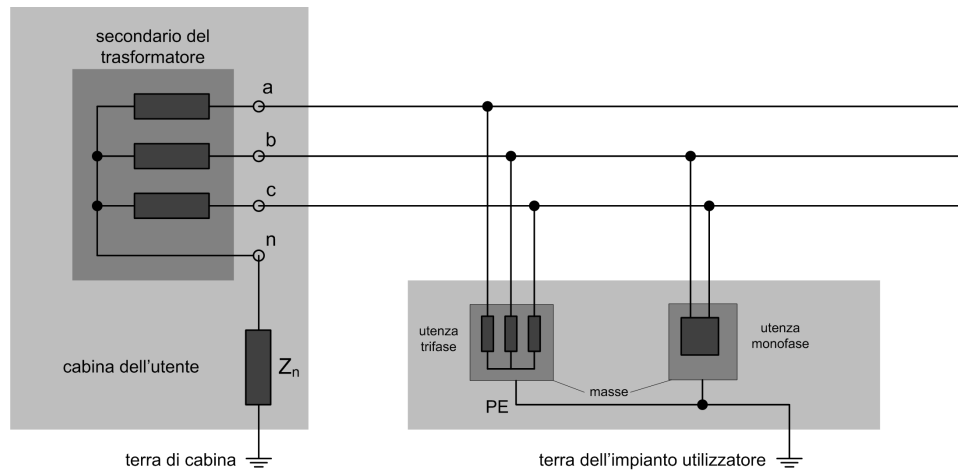


Fig. 6.6: Esempio di sistema IT.

6.4.1 Sicurezza e protezione nei sistemi IT

In caso di *guasto fase-terra* (causato dal cedimento dell'isolamento tra una fase e la massa di un'apparecchiatura), si forma un *anello di guasto* che, comprendendo Z_n (vedi Figura 6.7), ha alta impedenza e quindi la corrente di guasto I_g nei conduttori di protezione e nel terreno è modesta. In particolare la normativa impone la condizione:

$$R_t I_g \leq 50 \quad (6.7)$$

dove R_t è espressa in Ω e I_g in A. La (6.7) implica che la tensione di contatto $U_c \leq U_t = R_t I_g$ non superi i 50 V, cosicché non è richiesto l'intervento delle protezioni. Inoltre la fase in guasto si porta ad un potenziale prossimo a quello del terreno, così il centro stella si porta ad un potenziale verso terra prossimo a $-E_g$ e le altre due fasi a potenziali prossimi alle due concatenate.

Se si manifesta un secondo guasto tra un'altra fase e terra, si realizza un *guasto fase-fase*, con un anello di guasto a bassa impedenza, dove agiscono due tensioni stellate con somma pari a quella concatenata: la nuova corrente di guasto, molto elevata, fa intervenire le protezioni di massima corrente.

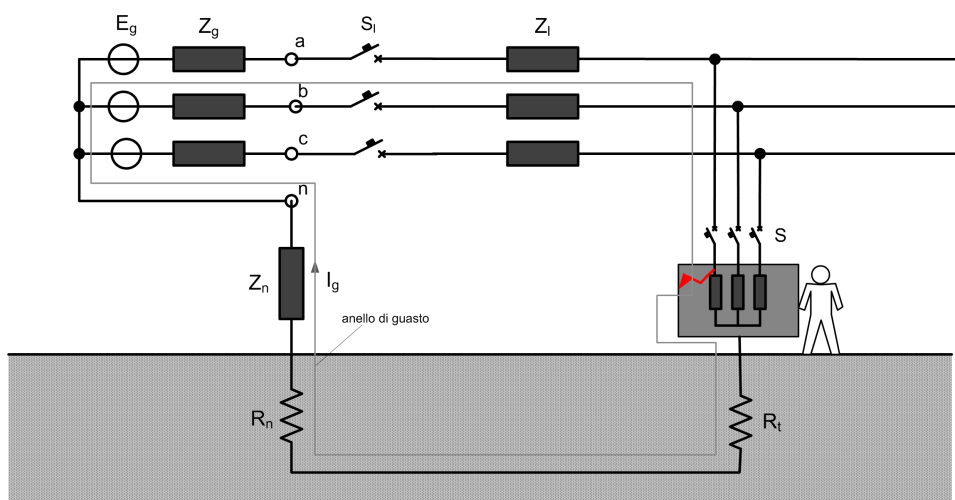


Fig. 6.7: Anello di guasto in un sistema IT.

6.5 Impianti elettrici in luoghi speciali

Oltre a quanto esposto nei paragrafi precedenti, la normativa tecnica stabilisce imposizioni particolari per gli impianti elettrici in luoghi destinati ai seguenti usi particolari:

- locali adibiti ad uso medico;
- locali con pericolo di esplosione ed incendio;
- locali di pubblico spettacolo.

Normativa Elettrica

LA progettazione, costruzione e conduzione dei dispositivi elettrici, quali le macchine, le apparecchiature, i componenti, e degli impianti elettrici devono avvenire in conformità a specifiche *disposizioni normative*, sia giuridiche che tecniche.

In Italia le prime sono costituite da leggi e decreti della Repubblica e la loro mancata osservanza può comportare sanzioni, anche di tipo penale, nei confronti di progettisti, costruttori e conduttori.

Le seconde, molto più dettagliate delle prime, precisano i criteri che rendono affidabili e non pericolosi i sistemi elettrici. Esistono diversi tipi di **norme tecniche**, con diversi ambiti territoriali. In Italia le norme di maggiore importanza sono stabilite dal **Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI)**. Norme analoghe sono in vigore nelle altre nazioni; queste norme tecniche nazionali in gran parte si riconducono alle norme di specifici comitati internazionali (EN, IEC, UNI, ISO, CENELC, ecc.) ai quali aderiscono i diversi comitati nazionali.

Le norme tecniche hanno, almeno in linea di principio, carattere di *direttiva*, non impositivo; di fatto invece la rispondenza risulta obbligatoria.

7.1 Norme giuridiche

Tra le imposizioni stabilite in materia elettrica dalla normativa giuridica, hanno particolare rilevanza le seguenti: art. 437 del Codice Penale, D.P.R. n.547 del 25.4.55, Legge n. 186 del 1.3.68, D.M. 20.11.68, Legge n. 46 del 5.3.90 e dai relativi regolamenti di attuazione. In particolare essi impongono quanto segue.

I) Codice Penale**art. 437:**

Chiunque omette di collocare impianti, apparecchi o segnali destinati a prevenire disastri o infortuni sul lavoro, ovvero li rimuove o li danneggia, è punito con la reclusione da sei mesi a cinque anni [c.p. 28, 29, 32-quater; c.n.1122]. Se dal fatto deriva un disastro o un infortunio, la pena è della reclusione da tre a dieci anni [c.p. 451].

II) D.P.R. n.547 del 25.4.55: “Norme per la prevenzione degli infortuni sul lavoro”**art. 267:**

Gli impianti elettrici, in tutte le loro parti costitutive, devono essere costruiti, installati e mantenuti in modo da prevenire i pericoli derivanti da contatti accidentali con gli elementi sotto tensione ed i rischi di incendio e di scoppio derivanti da eventuali anomalie che si verificano nel loro esercizio.

III) Legge n. 186 del 1.3.68: “Disposizioni concernenti la produzione di materiali, apparecchiature, macchinari, installazione e impianti elettrici ed elettronici”**art. 1**

Tutti i materiali, le apparecchiature, i macchinari, le installazioni e gli impianti elettrici ed elettronici devono essere realizzati e costruiti a regola d'arte.

art. 2

I materiali, le apparecchiature, i macchinari, le installazioni e gli impianti elettrici ed elettronici realizzati secondo le norme del Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI) si considerano costruiti a regola d'arte.

IV) Legge n. 46 del 5.3.90: “Norme per la sicurezza degli impianti”**art. 1 (Ambito di applicazione)**

1. Sono soggetti all'applicazione della presente legge i seguenti impianti relativi agli edifici adibiti ad uso civile:

- a) *gli impianti di produzione, di trasporto, di distribuzione e di utilizzazione dell'energia elettrica all'interno degli edifici a partire dal punto di consegna dell'energia fornita dall'ente distributore;*

...omissis

2. *Sono altresì soggetti all'applicazione della presente legge impianti di cui al comma 1), lettera a, relativi agli immobili adibiti ad attività produttive, al commercio, al terziario e ad altri usi.*

art. 2 (Soggetti abilitati)

1. *Sono abilitate all'installazione, alla trasformazione, all'ampliamento e alla manutenzione degli impianti di cui all'articolo 1 tutte le imprese, singole o associate, regolarmente iscritte nel registro delle ditte di cui al regio decreto 20 settembre 1934, n. 2011, e successive modificazioni ed integrazioni, o nell'albo provinciale delle imprese artigiane di cui alla legge 8 agosto 1985, n. 443.*
2. *L'esercizio delle attività di cui al comma 1 è subordinato al possesso dei requisiti tecnico-professionali, di cui all'articolo 3, da parte dell'imprenditore, il quale, qualora non ne sia in possesso, prepone all'esercizio delle attività di cui al medesimo comma 1 un responsabile tecnico che abbia tali requisiti.*

art. 6 (Progettazione degli impianti)

1. *Per l'installazione, la trasformazione e l'ampliamento degli impianti di cui ai commi 1, lettere a), b), c), e) e g), e 2 dell'articolo 1 è obbligatoria la redazione del progetto da parte di professionisti, iscritti negli albi professionali, nell'ambito delle rispettive competenze.*
2. *La redazione del progetto per l'installazione, la trasformazione e l'ampliamento degli impianti di cui al comma 1 è obbligatoria al di sopra dei limiti dimensionali indicati nel regolamento di attuazione di cui all'articolo 15.*
3. *Il progetto di cui al comma 1 è depositato:*
 - a) *presso gli organi competenti al rilascio di licenze di impianto o di autorizzazioni alla costruzione quando previsto dalle disposizioni legislative e regolamentari vigenti;*
 - b) *presso gli uffici comunali, contestualmente al progetto edilizio, per gli impianti il cui progetto non sia soggetto per legge ad approvazione.*

art. 7 (Installazione degli impianti)

1. *Le imprese installatrici sono tenute ad eseguire gli impianti a regola d'arte utilizzando allo scopo materiali parimenti costruiti a regola d'arte. I materiali ed i componenti realizzati secondo le norme tecniche di sicurezza dell'Ente italiano di unificazione (UNI) e del Comitato elettrotecnico italiano (CEI), nonché nel rispetto di quanto prescritto dalla legislazione tecnica vigente in materia, si considerano costruiti a regola d'arte.*
2. *In particolare gli impianti elettrici devono essere dotati di impianti di messa a terra e di interruttori differenziali ad alta sensibilità o di altri sistemi di protezione equivalenti.*

3. *Tutti gli impianti realizzati alla data di entrata in vigore della presente legge devono essere adeguati, entro tre anni da tale data, a quanto previsto dal presente articolo.*

art.9 (Dichiarazione di conformità)

1. *Al termine dei lavori l'impresa installatrice è tenuta a rilasciare al committente la dichiarazione di conformità degli impianti realizzati nel rispetto delle norme di cui all'articolo 7. Di tale dichiarazione, sottoscritta dal titolare dell'impresa installatrice e recante i numeri di partita IVA e di iscrizione alla camera di commercio, industria, artigianato e agricoltura, faranno parte integrante la relazione contenente la tipologia dei materiali impiegati nonché, ove previsto, il progetto di cui all'articolo 6.*

V) D.M. 20.11.68: "Riconoscimento di efficacia, ai fini della sicurezza, dell'isolamento speciale completo di cui devono essere dotati gli utensili e gli apparecchi elettrici mobili senza collegamento elettrico a terra"

Questo decreto precisa che i prototipi di tali apparecchi ai fini della sicurezza dell'utilizzo, devono essere collaudati e certificati ad opera dell'**Istituto Italiano del Marchio di Qualità (IMQ)**, o da istituto equivalente nazionale o estero. I singoli apparecchi devono recare il simbolo relativo, illustrato in Figura 7.1.



Fig. 7.1: Logo IMQ.

Obiettivo fondamentale del legislatore è impedire che i sistemi elettrici rechino danno alle persone e alle cose. Il titolo VII del D.P.R. n.547/55 (composto da altri 83 articoli, oltre al 267 precedentemente riportato) fissa prescrizioni specifiche in materia elettrica, intese a soddisfare questo principio in ambito lavorativo (artt. 271, 273, 276, 281, 285, 293, 294, 295, 300, 326, 328, 337, 339, 341, 343).

Inoltre queste disposizioni sono insufficienti a coprire tutti gli aspetti dei sistemi elettrici. Per questo motivo la Legge n.186 stabilisce un criterio preciso ed esaustivo: è sufficiente applicare le Norme del *Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI)*. Da un punto di vista teorico non è proibito disattendere tali norme: basta realizzare "a regola d'arte". Tuttavia può essere difficile dimostrare che sia a regola d'arte un impianto o un'apparecchiatura non

conformi alle norme CEI. In altre parole si potrebbe incorrere nei seguenti rischi:

- in sede di collaudo le autorità preposte possono negare l'approvazione, impedendone quindi la messa in servizio;
- in caso di vertenza giuridica possono essere comminate sanzioni penali o civili;
- le Compagnie assicurative possono sospendere le loro garanzie.

Oltre a ciò il funzionamento di macchine e impianti non a norma può risultare precario o impossibile.

Sempre nello spirito di garantire la sicurezza degli impianti elettrici, la Legge n. 46/90, imponendo la redazione del progetto ad opera di professionisti competenti e l'esecuzione ad opera di imprese abilitate che ne certificano la conformità alle norme, ha inteso sottrarre queste realizzazioni all'improvvisazione e all'incompetenza che sono le principali cause degli infortuni elettrici, spesso mortali.

In base al regolamento di attuazione sono esenti dall'obbligo del progetto solo utenze di potenza modesta in unità immobiliari di limitata superficie. Anche questa legge indica che il rispetto delle Norme CEI costituisce condizione sufficiente per un'esecuzione a regola d'arte.

7.1.1 Testo unico sulla sicurezza sul lavoro: il D.Lgs. 9 aprile 2008, n. 81

Per **testo unico in materia di salute e sicurezza nei luoghi di lavoro** si intende, nell'ambito dell'ordinamento giuridico italiano, l'insieme di norme contenute nel **decreto legislativo 9 aprile 2008 n. 81**. Tale decreto, a sua volta successivamente integrato dal D.Lgs. n. 106 del 3 agosto 2009 recante disposizioni integrative e correttive, sostituisce il vecchio **decreto legislativo 19 settembre 1994, n. 626**, atto normativo della Repubblica Italiana emanato nel 1994 per regolamentare la sicurezza sui luoghi di lavoro, emanato in attuazione di alcune direttive dell'unione europea.

Il D.Lgs. 81/2008 propone un sistema di gestione della sicurezza e della salute in ambito lavorativo preventivo e permanente, attraverso:

- l'individuazione dei fattori e delle sorgenti di rischi;
- la riduzione, che deve tendere al minimo del rischio;
- il continuo controllo delle misure preventive messe in atto;
- l'elaborazione di una strategia aziendale che comprenda tutti i fattori di una organizzazione (tecnologie, organizzazione, condizioni operative).

Il decreto, inoltre, ha definito in modo chiaro le *responsabilità* e le *figure in ambito aziendale* per quanto concerne la sicurezza e la salute dei lavoratori.

Al testo degli articoli del decreto¹ sono stati aggiunti altri **51 allegati tecnici** che riportano in modo sistematico e coordinato le prescrizioni tecniche di quasi tutte le norme più importanti emanate in Italia dal dopoguerra ad oggi.

Per quanto riguarda gli impianti elettrici, le parti del decreto interessati sono gli articoli 80-87, contenuti nel **Capo III** (*Impianti e apparecchiature elettriche*) del **Titolo III** (*Uso delle attrezzature di lavoro e dei dispositivi di protezione individuale*), che riportiamo di seguito, includendo le modifiche riportate dal **D.Lgs. 106/2009**.

Titolo III USO DELLE ATTREZZATURE DI LAVORO E DEI DISPOSITIVI DI PROTEZIONE INDIVIDUALE

Capo III Impianti e apparecchiature elettriche

Art. 80 Obblighi del datore di lavoro

1. *Il datore di lavoro prende le misure necessarie affinché i lavoratori siano salvaguardati dai tutti i rischi di natura elettrica connessi all'impiego dei materiali, delle apparecchiature e degli impianti elettrici messi a loro disposizione ed, in particolare, da quelli derivanti da:*
 - a) *contatti elettrici diretti;*
 - b) *contatti elettrici indiretti;*
 - c) *innesco e propagazione di incendi e di ustioni dovuti a sovra-temperature pericolose, archi elettrici e radiazioni;*
 - d) *innesco di esplosioni;*
 - e) *fulminazione diretta ed indiretta;*
 - f) *sovratensioni;*
 - g) *altre condizioni di guasto ragionevolmente prevedibili.*
2. *A tale fine il datore di lavoro esegue una valutazione dei rischi di cui al precedente comma 1, tenendo in considerazione:*

¹Il testo del decreto è reperibile on-line al seguente indirizzo: <http://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2008-04-09;81!vig=>

- a) *le condizioni e le caratteristiche specifiche del lavoro, ivi comprese eventuali interferenze;*
 - b) *i rischi presenti nell'ambiente di lavoro;*
 - c) *tutte le condizioni di esercizio prevedibili.*
3. *A seguito della valutazione del rischio elettrico il datore di lavoro adotta le misure tecniche ed organizzative necessarie ad eliminare o ridurre al minimo i rischi presenti, ad individuare i dispositivi di protezione collettivi ed individuali necessari alla conduzione in sicurezza del lavoro ed a predisporre le procedure di uso e manutenzione atte a garantire nel tempo la permanenza del livello di sicurezza raggiunto con l'adozione delle misure di cui al comma 1.*
- 3bis. *Il datore di lavoro prende, altresì, le misure necessarie affinché le procedure di uso e manutenzione di cui al comma 3 siano predisposte ed attuate tenendo conto delle disposizioni legislative vigenti, delle indicazioni contenute nei manuali d'uso e manutenzione delle apparecchiature ricadenti nelle direttive specifiche di prodotto e di quelle indicate nelle pertinenti norme tecniche.*

Art. 81

Requisiti di sicurezza

1. *Tutti i materiali, i macchinari e le apparecchiature, nonché le installazioni e gli impianti elettrici ed elettronici devono essere progettati, realizzati e costruiti a regola d'arte.*
2. *Ferme restando le disposizioni legislative e regolamentari di recepimento delle direttive comunitarie di prodotto, i materiali, i macchinari, le apparecchiature, le installazioni e gli impianti di cui al comma precedente, si considerano costruiti a regola d'arte se sono realizzati secondo le pertinenti norme tecniche.*

Art. 82

Lavori sotto tensione

1. *E' vietato eseguire lavori sotto tensione. Tali lavori sono tuttavia consentiti nei casi in cui le tensioni su cui si opera sono di sicurezza, secondo quanto previsto dallo stato della tecnica o quando i lavori sono eseguiti nel rispetto delle seguenti condizioni:*
 - a) *le procedure adottate e le attrezzature utilizzate sono conformi ai criteri definiti nelle norme tecniche;*
 - b) *per sistemi di categoria 0 e I purché l'esecuzione di lavori su parti in tensione sia affidata a lavoratori riconosciuti dal datore di lavoro come idonei per tale attività secondo le indicazioni della pertinente normativa tecnica;*

- c) *per sistemi di II e III categoria purchè:*
- (1) *i lavori su parti in tensione siano effettuati da aziende autorizzate, con specifico provvedimento del Ministero del lavoro, della salute e delle politiche sociali, ad operare sotto tensione;*
 - (2) *l'esecuzione di lavori su parti in tensione sia affidata a lavoratori abilitati dal datore di lavoro ai sensi della pertinente normativa tecnica riconosciuti idonei per tale attività.*
2. *Con decreto del Ministro del lavoro e della previdenza sociale, da adottarsi entro dodici mesi dalla data di entrata in vigore del presente decreto legislativo, sono definiti i criteri per il rilascio delle autorizzazioni di cui al comma 1, lettera c), numero 1).*
 3. *Hanno diritto al riconoscimento di cui al comma 2 le aziende già autorizzate ai sensi della legislazione vigente.*

Art. 83

Lavori in prossimità di parti attive

1. *Non possono essere eseguiti lavori non elettrici in vicinanza di linee elettriche o di impianti elettrici con parti attive non protette, o che per circostanze particolari si debbano ritenere non sufficientemente protette, e comunque a distanze inferiori ai limiti di cui alla tabella 1 dell'allegato IX, salvo che vengano adottate disposizioni organizzative e procedurali idonee a proteggere i lavoratori dai conseguenti rischi.*
2. *Si considerano idonee ai fini di cui al comma 1 le disposizioni contenute nelle pertinenti norme tecniche.*

Art. 84

Protezioni dai fulmini

1. *Il datore di lavoro provvede affinché gli edifici, gli impianti, le strutture, le attrezzature, siano protetti dagli effetti dei fulmini realizzati secondo le norme tecniche.*

Art. 85

Protezione di edifici, impianti strutture ed attrezzature

1. *Il datore di lavoro provvede affinché gli edifici, gli impianti, le strutture, le attrezzature, siano protetti dai pericoli determinati dall'innescò elettrico di atmosfere potenzialmente esplosive per la presenza o sviluppo di gas, vapori, nebbie infiammabili o polveri combustibili infiammabili, o in caso di fabbricazione, manipolazione o deposito di materiali esplosivi.*

2. *Le protezioni di cui al comma 1 si realizzano utilizzando le specifiche disposizioni di cui al presente decreto legislativo e le pertinenti norme tecniche di cui all'allegato IX.*

Art. 86**Verifiche e controlli**

1. *Ferme restando le disposizioni del decreto del Presidente della Repubblica 22 ottobre 2001, n. 462, in materia di verifiche periodiche, il datore di lavoro provvede affinché gli impianti elettrici e gli impianti di protezione dai fulmini siano periodicamente sottoposti a controllo secondo le indicazioni delle norme di buona tecnica e la normativa vigente per verificarne lo stato di conservazione e di efficienza ai fini della sicurezza.*
2. *Con decreto del Ministro dello sviluppo economico, di concerto con il Ministro del lavoro, della salute e delle politiche sociali, adottato sentita la Conferenza permanente per i rapporti tra lo Stato, le regioni e le province autonome di Trento e di Bolzano, sono stabilite le modalità ed i criteri per l'effettuazione delle verifiche e dei controlli di cui al comma 1.*
3. *L'esito dei controlli di cui al comma 1 è verbalizzato e tenuto a disposizione dell'autorità di vigilanza.*

Art. 87**Sanzioni a carico del datore di lavoro, del dirigente, del noleggiatore e del concedente in uso**

1. *Il datore di lavoro è punito con la pena dell'arresto da tre a sei mesi o con l'ammenda da 2.500 a 6.400 euro per la violazione dell'articolo 80, comma 2.*
2. *Il datore di lavoro e il dirigente sono puniti con la pena dell'arresto da tre a sei mesi o con l'ammenda da 2.500 a 6.400 euro per la violazione:*
 - a) *dell'articolo 70, comma 1;*
 - b) *dell'articolo 70, comma 2, limitatamente ai punti 3.2.1, 5.6.1, 5.6.6, 5.6.7, 5.9.1, 5.9.2, 5.13.8 e 5.13.9 dell'allegato V, parte II;*
 - c) *dell'articolo 71, commi 1, 2, 4, 7 ed 8;*
 - d) *degli articoli 75 e 77, commi 3, 4, lettere a), b) e d), e 5;*
 - e) *degli articoli 80, comma 2, 82, comma 1, 83, comma 1 e 85, comma 1.*
3. *Il datore di lavoro e il dirigente sono puniti con la pena dell'arresto da due a quattro mesi o con l'ammenda da 1.000 euro a 4.800 euro per la violazione:*

- a) *dell'articolo 70, comma 2, limitatamente ai punti 2.10, 3.1.8, 3.1.11, 3.3.1, 5.1.3, 5.1.4, 5.5.3, 5.5.8, 5.7.1, 5.7.3, 5.12.1, 5.15.2, 5.16.2, 5.16. 4, dell'allegato V, parte II;*
 - b) *dell'articolo 71, comma 3, limitatamente ai punti 3.1.3, 3.1.4, 3.1.5, 3.1.6, 3.1.7, 3.2.1 dell'allegato VI;*
 - c) *dell'articolo 77, comma 4, lettere e), f) ed h);*
 - d) *dell'articolo 80, commi 3 e 4.*
4. *Il datore di lavoro e il dirigente sono puniti con la sanzione amministrativa pecuniaria da euro 500 a euro 1.800 per la violazione:*
- a) *dell'articolo 70, comma 2, limitatamente ai punti dell'allegato V, parte II, diversi da quelli indicati alla lettera a) del comma 3 e alla lettera b) del comma 2;*
 - b) *dell'articolo 71, comma 3, limitatamente ai punti dell'allegato VI diversi da quelli indicati alla lettera b) del comma 2, e commi 6, 9, 10 e 11;*
 - c) *dell'articolo 77, comma 4, lettere c) e g);*
 - d) *dell'articolo 86, commi 1 e 3.*
5. *La violazione di più precetti riconducibili alla categoria omogenea di requisiti di sicurezza relativi ai luoghi di lavoro di cui all'allegato V, parte II, punti 1, 2, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16 è considerata una unica violazione, penale o amministrativa a seconda della natura dell'illecito, ed è punita con la pena o la sanzione amministrativa pecuniaria rispettivamente previste dai precedenti commi. L'organo di vigilanza è tenuto a precisare in ogni caso, in sede di contestazione, i diversi precetti violati.*
6. *La violazione di più precetti riconducibili alla categoria omogenea di requisiti di sicurezza relativi ai luoghi di lavoro di cui all'allegato VI, punti 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2, 3.1, 3.2, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 è considerata una unica violazione ed è punita con la pena prevista dal comma 2, lettera b). L'organo di vigilanza è tenuto a precisare in ogni caso, in sede di contestazione, i diversi precetti violati.*
7. *Il venditore, il noleggiatore o il concedente in uso è punito con la sanzione amministrativa pecuniaria da 750 a 2.700 euro per la violazione dell'articolo 72.*

ALLEGATO IX

Valori delle tensioni nominali di esercizio delle macchine ed impianti elettrici

U_n (kV)	D (m)
≤ 1	3
$1 < U_n \leq 30$	3.5
$30 < U_n \leq 132$	5
> 132	7

Tabella 7.1: allegato IX — Distanze di sicurezza da parti attive di linee elettriche e di impianti elettrici non protette o non sufficientemente protette da osservarsi, nell'esecuzione di lavori non elettrici, al netto degli ingombri derivanti dal tipo di lavoro, delle attrezzature utilizzate e dei materiali movimentati, nonché degli sbandamenti laterali dei conduttori dovuti all'azione del vento e degli abbassamenti di quota dovuti alle condizioni termiche. U_n è la tensione nominale.

In relazione alla loro tensione nominale i sistemi elettrici si dividono in:

- *sistemi di Categoria 0 (zero), chiamati anche a bassissima tensione, quelli a tensione nominale minore o uguale a 50 V se a corrente alternata o a 120 V se in corrente continua (non ondulata);*
- *sistemi di Categoria I (prima), chiamati anche a bassa tensione, quelli a tensione nominale da oltre 50 fino a 1.000 V se in corrente alternata o da oltre 120 V fino a 1.500 V compreso se in corrente continua;*
- *sistemi di Categoria II (seconda), chiamati anche a media tensione quelli a tensione nominale oltre 1.000 V se in corrente alternata od oltre 1.500 V se in corrente continua, fino a 30.000 V compreso;*
- *sistemi di Categoria III (terza), chiamati anche ad alta tensione, quelli a tensione nominale maggiore di 30.000 V.*

Qualora la tensione nominale verso terra sia superiore alla tensione nominale tra le fasi, agli effetti della classificazione del sistema si considera la tensione nominale verso terra.

Per sistema elettrico si intende la parte di un impianto elettrico costituito da un complesso di componenti elettrici aventi una determinata tensione nominale.

7.2 Le Norme CEI

Le norme del Comitato Elettrotecnico Italiano (Norme CEI) sono in costante aggiornamento, per adattarsi continuamente non solo agli sviluppi tecnologici, ma anche all'evoluzione del concetto di sicurezza. Sono costituite da un vasto numero di fascicoli che coprono estesamente l'intera materia elettrica.

L'elenco dettagliato delle norme CEI è ovviamente presente sul sito del Comitato Elettrotecnico Italiano (<http://www.ceiweb.it/>), ove è possibile anche l'acquisto. A titolo puramente indicativo si riporta il seguente elenco parziale:

- CEI 0-1 - Adozione di nuove norme come base per la certificazione dei prodotti nei paesi membri del CENELEC
- CEI 0-2 - Guida per la definizione della documentazione di progetto degli impianti elettrici
- CEI 0-3 - Legge 46/90. Guida per la compilazione della dichiarazione di conformità e relativi allegati
- CEI 0-4/1 - Documenti CEI normativi e non normativi
- CEI 0-5 - Dichiarazione CE di conformità. Guida all'applicazione delle Direttive Nuovo Approccio e della Direttiva Bassa Tensione (Memorandum CENELEC N°3)
- CEI 0-6 - Qualificazione delle imprese di installazione di impianti elettrici
- CEI 0-10 - Guida alla manutenzione degli impianti elettrici
- CEI 0-11 - Guida alla gestione in qualità delle misure per la verifica degli impianti elettrici ai fini della sicurezza
- CEI 0-13 - Protezione contro i contatti elettrici - Aspetti comuni per gli impianti e le apparecchiature
- CEI 0-14 - Guida all'applicazione del DPR 462/01 relativo alla semplificazione del procedimento per la denuncia di installazioni e dispositivi di protezione contro le scariche atmosferiche, di dispositivi di messa a terra degli impianti elettrici e di impianti elettrici pericolosi
- CEI 0-15 - Manutenzione delle cabine elettriche MT/BT dei clienti/utenti finali
- CEI 3-4 - Segni grafici per schemi
- CEI 3-15 - Segni grafici per schemi
- CEI 3-19 - Segni grafici per schemi
- CEI 3-20 - Segni grafici per schemi
- CEI 3-23 - Segni grafici per schemi

- CEI 11-1 - Impianti di produzione, trasporto e distribuzione dell'energia elettrica - Norme generali
- CEI 11-8 - Impianti di produzione, trasporto e distribuzione dell'energia elettrica - Impianti di terra
- CEI 11-17 - Impianti di produzione, trasporto e distribuzione dell'energia elettrica - Linee in cavo
- CEI 11-18 - Impianti di produzione, trasporto e distribuzione dell'energia elettrica - Dimensionamento degli impianti in relazione alle tensioni
- CEI 17-1 - Interruttori a corrente alternata a tensione superiore a 1000 V
- CEI 17-4 - Sezionatori e sezionatori di terra a corrente alternata a tensione superiore a 1000 V
- CEI 17-5 - Apparecchiature a bassa tensione - Parte 2: Interruttori automatici
- CEI 17-6 - Apparecchiature prefabbricate con involucro metallico per tensioni da 1 a 52kV
- CEI 17-9 - Interruttori di manovra e interruttori di manovra-sezionatori per alta tensione
- CEI 17-11 - Apparecchiature a bassa tensione - Parte 3: interruttori di manovra, sezionatori, interruttori di manovra-sezionatori e unità combinate con fusibili
- CEI 17-13 - Apparecchiature assiemate di protezione per bassa tensione (quadri BT)
- CEI 32-1 - Fusibili a tensione non superiore a 1000 V per corrente alternata e a 1500 V per corrente continua
- CEI 32-3 - Fusibili a tensione superiore a 1000 V
- CEI 36 - Isolatori per tensione superiore a 1000 V
- CEI 37 - Scaricatori
- CEI 42 - Tecnica delle prova ad alta tensione
- CEI 44 - Equipaggiamento elettrico delle macchine industriali
- CEI 64 - Effetti della corrente attraverso il corpo umano

- CEI 64-2 - Impianti elettrici nei luoghi con pericolo di esplosione
- CEI 64-4 - Impianti elettrici nei locali adibiti ad uso medico
- CEI 64-7 - Impianti elettrici di illuminazione pubblica
- CEI 64-8 - Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e a 1500 V in corrente continua
- CEI 64-10 - Impianti elettrici nei luoghi di pubblico spettacolo e di trattenimento
- CEI 64-11 - Impianti elettrici nei mobili
- CEI 64-12 - Guida per l'esecuzione dell'impianto di terra negli edifici per uso residenziale e terziario
- CEI 64-14 - Guida alle verifiche degli impianti elettrici utilizzatori
- CEI 64-15 - Impianti elettrici negli edifici pregevoli per rilevanza storica e/o artistica
- CEI 64-16 - Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e a 1500 V in corrente continua. Protezione contro le interferenze elettromagnetiche (EMI) negli impianti elettrici
- CEI 64-17 - Guida all'esecuzione degli impianti elettrici nei cantieri
- CEI 64-50 - Edilizia ad uso residenziale e terziario. Guida per l'integrazione degli impianti elettrici utilizzatori e per la predisposizione di impianti ausiliari, telefonici e di trasmissione dati negli edifici Criteri generali
- CEI 64-51 - Edilizia ad uso residenziale e terziario. Guida per l'integrazione degli impianti elettrici utilizzatori e per la predisposizione di impianti ausiliari, telefonici e di trasmissione dati negli edifici Criteri particolari per centri commerciali
- CEI 64-52 - Edilizia ad uso residenziale e terziario. Guida per l'integrazione degli impianti elettrici utilizzatori e per la predisposizione di impianti ausiliari, telefonici e di trasmissione dati negli edifici Criteri particolari per edifici scolastici
- CEI 64-53 - Edilizia ad uso residenziale e terziario. Guida per l'integrazione degli impianti elettrici utilizzatori e per la predisposizione di impianti ausiliari, telefonici e di trasmissione dati negli edifici Criteri particolari per edifici ad uso prevalentemente residenziale

- CEI 64-54 - Edilizia ad uso residenziale e terziario. Guida per l'integrazione degli impianti elettrici utilizzatori e per la predisposizione di impianti ausiliari, telefonici e di trasmissione dati negli edifici Criteri particolari per locali di pubblico spettacolo
- CEI 64-55 - Edilizia ad uso residenziale e terziario. Guida per l'integrazione degli impianti elettrici utilizzatori e per la predisposizione di impianti ausiliari, telefonici e di trasmissione dati negli edifici Criteri particolari per strutture alberghiere
- CEI 64-56 - Edilizia ad uso residenziale e terziario. Guida per l'integrazione degli impianti elettrici utilizzatori e per la predisposizione di impianti ausiliari, telefonici e di trasmissione dati negli edifici Criteri particolari per locali ad uso medico
- CEI 64-57 - Edilizia ad uso residenziale e terziario. Guida per l'integrazione degli impianti elettrici utilizzatori e per la predisposizione di impianti ausiliari, telefonici e di trasmissione dati negli edifici Impianti di piccola produzione distribuita
- CEI 64-100/1 - Edilizia residenziale. Guida per la predisposizione delle infrastrutture per gli impianti elettrici, elettronici e per le comunicazioni
- CEI 70-1 - Grado di protezione degli involucri (codice IP)
- CEI 81-1 - Protezione delle strutture contro i fulmini
- CEI 81-3 - Valori medi del numero dei fulmini a terra per anno e per chilometro quadrato dei Comuni d'Italia, in ordine alfabetico
- CEI 81-4 - Protezione delle strutture contro i fulmini. Valutazione del rischio dovuto al fulmine

Bibliografia

- [1] G. Figini and U. Torelli. *Impianti elettrici civili. Manuale di applicazione delle norme CEI*. Hoepli, 2 edition, 2000.
- [2] M. Guarnieri and A. Stella. *Principi ed Applicazioni di Elettrotecnica*, volume 2. Edizioni Progetto Padova, Padova, 2003.
- [3] F. Iliceto. *Impianti Elettrici*, volume 3. Patron, 1984.
- [4] F. Iliceto and S. Rosati. *Impianti di distribuzione dell'energia elettrica*. Siderea, Roma, 1998.

Indice analitico

- Aerogeneratori, 11
- Alternatori, 2, 5
- Anello
 - di Guasto, 26, 51, 53
- Apertura
 - a Carico, 27
 - a Vuoto, 26
 - con Sovratensione, 27
- Arco Elettrico, 27
- Art. 267 DPR 547/55, 58
- Art. 437 CP, 58
- Biomasse, 12
- c.a., 2
- c.c., 2
- Cabine
 - di Trasformazione, 14
- Caduta
 - di Tensione, 20
- Camera
 - di Interruzione, 27
- Campata, 16
- Campi
 - Geotermici, 10
- Capacità
 - Trasversale, 19
- Caratteristica
 - di Intervento, 31
- Cavo
 - Multipolare, 17
 - Unipolare, 17
- CEI, 57
- Centrale
 - a Bacino, 6
 - a Biomassa, 12
 - a Serbatoio, 6
 - ad Acqua Fluente, 6
 - di Pompaggio, 6
 - Elettronucleare, 8
 - Eolica, 11
 - Geotermica, 9
 - Idroelettrica, 6
 - Mareomotrice, 10
 - Solare, 11
 - Termoelettrica, 8
- Centrale Elettriche
 - di Generazione, 5
 - di Produzione, 5
- Collettore, 44
- Comitato Elettrotecnico Italiano, 57
- Condotte Forzate, 6
- Conduttanza
 - Trasversale, 19
- Conduttore
 - di Protezione, 44
 - di Terra, 44
 - Equipotenziale, 44
- Contatto

Diretto, 42
Indiretto, 42
Contattore, 30
Convertitori Statici, 2
Corrente
 Alternata, 2
 Continua, 2
 di Cortocircuito, 26
 di Guasto, 26
 di Rilascio, 39
 di Terra, 45
 Differenziale, 32
 Pericolosa, 40
Costanti
 Concentrati, 18
 Distribuite, 18
D.Lgs 106/2009, 61
D.Lgs. 626/1994, 61
D.Lgs. 81/2008, 61
Decreti, 57
Dinamo, 2
Dispersore, 44
Distribuzione, 1
DM 20.11.68, 60
Doppio Isolamento, 43
Effetto
 Joule, 23, 40
 Pelle, 24
Elettrodi, 27
Elettrodotti, 16
Elettrolisi, 40
Energia
 Elettrica, 1
Enti
 Distributori, 2
 Erogatori, 2
Frequenza
 Industriale, 4
Fune
 di Guardia, 16
Fusibile, 27, 36

Grandezza
 di Comando, 31
Gruppo Elettrogeno, 12
Guasto
 Fase-fase, 55
 Fase-terra, 51, 53, 55
Impianto
 di Terra, 43
 Utilizzatore, 49
IMQ, 60
Induttanza
 Longitudinale, 19
Infortunio
 Elettrico, 39
Interruttore, 27
 di Manovra, 30
 di Potenza, 28
 Differenziale, 34
 Magnetotermico, 35
 Multipolare, 29
 Unipolare, 28
Interruttore
 Automatico, 34
Interruzione
 della Corrente, 27
Isolatore, 36
Isolatori
 a Pali, 16
Istituto
 del Marchio di Qualità, 60
IT, 54
Legge n. 186/68, 58
Legge n. 46/90, 58
Leggi, 57
Linea
 Aerea, 15, 16
 in Cavo, 15, 17
 Unifilare, 19
Linee
 Bifilari, 15
 Unifilari, 15
Linee Elettriche, 13

- di Distribuzione, 13
 - di Trasmissione, 13
 - di Trasporto, 13
- Linee elettriche, 15
- Manovra, 25
- Massa, 42, 48
- Messa a Terra, 43
- Motore Primo, 5
- Nocciolo, 8
- Normative, 57
 - Giuridiche, 57
 - Tecniche, 57
- Norme
 - CEI, 60, 61, 67
- Pannelli
 - Solari, 11
- Parametri
 - Longitudinali, 18
 - Trasversali, 18
- PE, 44
- PEN, 50
- Plutonio, 8
- Poli, 27
- Portata
 - del Cavo, 24
- Produzione, 1
- Propagazione
 - Elettromagnetica, 18
- Relè, 29, 31
 - Differenziale, 32
 - Elettromagnetico, 31
 - Termico, 32
- Resistenza
 - di Terra, 48
- Resistenza
 - Lungitudinale, 19
- Salvavita, 34
- Scaricatore, 36
- Servizio
 - di Punta, 6
- Sezionatore, 27, 29
 - sotto Carico, 30
- Sezione
 - Normalizzata, 24
- Sicurezza
 - Testo Unico, 61
- Sistema
 - Elettrico, 25
 - IT, 54
 - TN, 52
 - TT, 50
- Sistema Elettrico
 - Nazionale, 1
- Soglia
 - di Percezione, 39
 - di Pericolosità, 40
- Sovracorrente, 26
- Sovratensione, 25
 - Atmosferica, 25
 - di Manovra, 25
- Spessore
 - di Penetrazione, 24
- Spinterometro, 37
- Stazione Elevatrice, 5
- Stazioni
 - di Trasformazione, 13, 14
- Teleriscaldamento, 8
- Teleruttore, 30
- Tempo
 - di Intervento, 31
- Tensione
 - di Contatto, 48
 - di Passo, 48
 - di Ripresa, 28
 - di Terra, 47
- Tenuta
 - Dielettrica, 16
- Testo Unico, 61
- Tetanizzazione, 39
- TN, 52
- Traliccio, 16
- Transitori, 25
- Trasformatori

- di Potenza, 2
- Trasmissione, 1
- Trazione
 - Elettrica, 17
- TT, 50
- Turbine
 - a Vapore, 8
- Turboalternatori, 5
- Uranio, 8